

00162
1
lej.



La computación visual aplicada a la
documentación y estudio de monumentos.
El sitio arqueológico de Cacaxtla y
el mural O'Gorman: dos estudios de caso

Tesis

que para obtener el grado de

Doctora en Arquitectura

presenta la Maestra en Arquitectura

Geneviève Lucet Lagriffoul

269500

División de Estudios de Posgrado

de la

Facultad de Arquitectura

de la

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DIRECTOR DE TESIS

M. en Arq. Francisco Reyna Gómez

TUTORES

Dr. César González Ochoa

Dr. Víctor Guerra Ortiz

SINODALES

M. en Arq. Francisco Reyna Gómez

Dr. Carlos Chanfón Olmos

Dr. César González Ochoa

Dr. Víctor Guerra Ortiz

Dr. Alejandro Villalobos Pérez

Dr. Alberto Alonso y Coria

Dr. Leonardo Icaza Lomelí

Resumen

La computación visual aplicada a la documentación y estudio de monumentos: el sitio arqueológico de Cacaxtla y el mural O'Gorman, dos estudios de caso.

Geneviève Lucet Lagriffoul

Doctorado en Arquitectura

Posgrado de la Facultad de Arquitectura

Universidad Nacional Autónoma de México

Director de tesis: Francisco Reyna Gómez

PALABRAS CLAVES: cómputo, computación visual, imágenes por computadora, imágenes numéricas, visualización, procesamiento de imágenes, Cacaxtla, sitios arqueológicos, Mesoamérica, arqueología, arquitectura, murales, mural O'Gorman, restauración.

En este trabajo se estudia el uso y alcance de las imágenes digitales en la investigación y la documentación del patrimonio, con este fin se desarrollan dos temas: la visualización de arquitecturas desaparecidas y el registro digital de la imagen de murales.

La hipótesis plantea que el cómputo de imágenes ofrece una forma original de trabajo en el estudio de la arquitectura, lo cual abre la posibilidad de obtener resultados novedosos enriqueciendo así el abanico de herramientas que benefician el conocimiento respecto a la humanidad.

La tesis se divide en tres partes:

- La primera, ofrece una visión general en torno al trabajo de las imágenes en computadora y cómo el arquitecto puede recurrir a ellas para la realización de sus distintas actividades.

En ella, se explican los conceptos básicos de cómputo y se describen las herramientas actualmente disponibles, así como los desarrollos que se pueden esperar a futuro.

- La segunda parte aborda la reconstrucción digital del sitio arqueológico de Cacaxtla mediante la utilización de las herramientas de síntesis de imágenes. Se describe la metodología seguida para la realización del levantamiento, durante el análisis y finalmente en la reconstrucción. El cómputo se encuentra omnipresente durante todo el proceso, adicionalmente permite la visualización de los resultados con técnicas que se insertan en el marco general conocido como realidad virtual. Es importante destacar, que además de mostrar un ejemplo del uso de varias herramientas de cómputo, se realiza una aportación al conocimiento sobre Cacaxtla, al proponerse configuraciones del sitio en lo que fueron varias de sus etapas constructivas hasta su abandono. Éstas están basadas en las reglas extraídas del estudio de cómo fue diseñada la arquitectura del sitio.
- Finalment, la tercera parte se avoca al problema del registro digital del mural O'Gorman de la Biblioteca Central de la UNAM con la finalidad de disponer de una información útil en restauración. Así se cumple con el nivel de precisión requerido para el estudio del estado actual del mural y de su comportamiento en el tiempo. Cabe señalar que el tamaño del mural y su ubicación implican una solución singular de digitalización, por ello se analizan los diferentes componentes de ésta para presentar una propuesta adecuada. Adicionalmente se desarrolla un ejemplo de uso de la información digital.

La computación visual aplicada a la documentación y estudio de monumentos. El sitio arqueológico de Cacaxtla y el mural O’Gorman: dos estudios de caso.

Geneviève Lucet

Se estudia el uso y alcance de las imágenes digitales en la investigación y la documentación del patrimonio, con este fin se desarrollan dos temas: la visualización de arquitecturas desaparecidas y el registro digital de la imagen de murales.

La hipótesis plantea que el cómputo de imágenes ofrece una forma original de trabajo en el estudio de la arquitectura, lo cual abre la posibilidad de obtener resultados novedosos enriqueciendo así el abanico de herramientas que benefician el conocimiento respecto a la humanidad.

La tesis se divide en tres partes:

- La primera, ofrece una visión general en torno al trabajo de las imágenes en computadora y cómo el arquitecto puede recurrir a ellas para la realización de sus distintas actividades. En ella, se explican los conceptos básicos de cómputo y se describen las herramientas actualmente disponibles, así como los desarrollos que se pueden esperar a futuro.
- La segunda parte aborda la reconstrucción digital del sitio arqueológico de Cacaxtla mediante el uso de las herramientas de síntesis de imágenes. Se describe la metodología seguida para la realización del levantamiento, durante el análisis y en la reconstrucción. El cómputo se encuentra omnipresente durante todo el proceso, adicionalmente permite la visualización de los resultados con técnicas que se insertan en el marco general conocido como realidad virtual. Además de mostrar un ejemplo del uso de varias herramientas de cómputo, se realiza una aportación al conocimiento sobre Cacaxtla, al proponerse configuraciones del sitio en lo que fueron varias de sus etapas constructivas hasta su abandono. Éstas están basadas en las reglas extraídas del estudio de cómo fue diseñada la arquitectura del sitio.
- La tercera parte se avoca al problema del registro digital del mural O’Gorman de la Biblioteca Central de la UNAM con la finalidad de disponer de una información útil en restauración. Así se cumple con el nivel de precisión requerido para el estudio del estado actual del mural y de su comportamiento en el tiempo. Cabe señalar que el tamaño del mural y su ubicación implican una solución singular de digitalización, por ello se analizan los diferentes componentes de ésta para presentar una propuesta adecuada. Adicionalmente se desarrolla un ejemplo de uso de la información digital.

**Computer graphics applied to registering and study of monuments.
The archaeological site of Cacaxtla and the O'Gorman mural: two
case studies**

Geneviève Lucet

The use and potential of digital imaging in research and digital registering of cultural heritage is studied within two different avenues: the visualization of disappeared architecture and the digital recording of images of murals.

The main hypothesis assumes that computing procedures applied to images offer an original approach in architecture, as well as foreseeing the possibility for obtaining new information and enriching the set of tools that increase our knowledge about humankind.

The work is divided in the following parts:

- The first one offers a general vision focused to exemplify the work made upon images in a computer as well as how an architect can resort to them to perform a new set of professional activities. Within such framework the basic concepts about computing are described as well as the new tools in actual use including those developments that can be expected to occur in the future.
- The second part deals with the digital reconstruction of the archaeological site of Cacaxtla and makes use of the appropriate tools for the synthesis of images. The methodology applied to accomplish the survey for analytical and reconstructive purposes is also described. Computing techniques are omnipresent along the process leading to the so call virtual reality. Besides demonstrating the use of several computing tools throughout examples, a defined contribution to the knowledge of Cacaxtla is achieved by making it possible to propose specific configurations of the site. This is done by portraying the stages of the constructive development to the point when they were abandoned. These proposals are based upon the rules derived from the investigation of the design concepts underlying the architecture of the site.
- The third and final part is concerned with the digital register of the O'Gorman mural portrayed in the central library of our university. The process provides with a body of information necessary for the restoration process. Such digital body of data fulfills the requested precision level for studying the actual conditions of the mural and its evolution in time. It is worth to mention that the size of the mural and its specific location demand a singular digital procedure. For that reason the digital imaging processes were investigated in search of an adequate reconstructive proposal. In addition, the potential of digital information is exploited in the characterization of the surface of the O'Gorman mural.

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	1
HERRAMIENTAS DE CÓMPUTO DE IMÁGENES PARA LA ARQUITECTURA	11
A partir de fotografías	13
Pixel vs vector	18
Dibujar con computadoras	20
Trabajar en tres dimensiones	22
La maqueta vs la perspectiva	24
La maqueta física vs la maqueta virtual	25
Síntesis de imágenes	26
La maqueta virtual, modelar en tres dimensiones	28
La apariencia de los objetos	35
Visualización	41
Iluminar una escena	41
Los modelos de iluminación	42
Diseño de la iluminación	47
Efectos adicionales	49
Ver el modelo	50
Usos de la tercera dimensión	51
Generar imágenes fijas	51
Insertar una imagen calculada de un proyecto en su contexto real	52
Animaciones dirigidas	52
Animaciones en tiempo real	54
Realidad virtual	55
Realidad aumentada	61
Concepción asistida por computadora	61
De los equipos de trabajo remotos, telepresencia	64
Simulación	65
Sistemas de información geográfica	66
RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL DE SITIOS ARQUEOLÓGICOS; APLICACIÓN AL SITIO DE CACAXTLA	69
Introducción	69
Visualización de la arquitectura histórica	75

De las posibles metodologías	75
Antecedentes de reconstrucciones virtuales de monumentos	78
Cacaxtla	80
Periodo de ocupación	81
Los constructores de Cacaxtla	82
Descripción general del sitio	84
Metodología empleada en la reconstrucción virtual del sitio	88
El levantamiento	89
La metodología de análisis	92
Características de la arquitectura de Cacaxtla	94
Los acabados de las estructuras y los guardapolvos	94
Las bases de los edificios	96
Los taludes-tableros	97
Las columnas	99
Anchos de muros	104
Tipos de edificios	104
Ubicación de las puertas	105
Ejes de simetría y de composición	105
Las plazas	107
Los niveles estratigráficos	107
Reconstrucción de las etapas constructivas	108
Las etapas constructivas	109
Estudio de cada conjunto	115
Representación gráfica de la información temporal	115
Zona norte	116
Pórtico norte y muro poniente	116
Patio hundido	117
Montículo Y	118
Los edificios A y C	118
Edificio B	123
Talud del mural de La Batalla	125
Zona centro	127
Plaza norte	127
Oriente de la plaza	127
Poniente de la plaza	130
Sur de la plaza	132
Escalera poniente	133
Escalera oriente	133
Zona sur	134
Desnivel sur de la plaza norte	134
Plaza de los Altares	134
Conjunto del Palacio	134
Esquina de basamento	139
Pequeño talud	139
Atrás del cuarto de las pinturas	140
Conjunto F	140
Pórtico sur	143
Edificio de la celosía	143
Templo rojo	145

Pirámide sur	148
Conjunto de Venus	149
Talud	150
Elaboración del modelo tridimensional	151
Restitución de la pintura mural	154
Definición de los acabados	156
Los problemas encontrados en la definición de los materiales	159
Ejemplo de visualización	160
Alcances logrados	167
Las ventajas de la definición digital	167
El modelo tridimensional	168
Aportación al conocimiento sobre el sitio	170
REGISTRO Y ESTUDIO DE MURALES MEDIANTE LAS HERRAMIENTAS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES: ESTUDIO DE CASO EN LOS MURALES DE LA BIBLIOTECA CENTRAL DE LA UNAM	173
Descripción de la biblioteca	173
Descripción formal	173
Descripción de los daños	178
Presentación del problema	181
Importancia del registro en restauración	182
Técnicas de documentación de restauración	184
Propuesta: información digital	185
Antecedentes	187
Objetivos, definición de criterios y de la metodología	191
Solución: estrategia propuesta para la adquisición de las imágenes	194
La captura de imágenes	194
Selección del grado de precisión	195
Adquisición analógica de imágenes vs. adquisición digital	197
La fotografía, las longitudes del espectro visible e invisible	199
Superficie cubierta por cada imagen digitalizada	205
Superficie cubierta por cada fotografía	206
A qué distancia ubicar la cámara, qué lente utilizar, tamaño de negativo	209
Tipo de película fotográfica	210
Control de la distorsión	210
Control de la iluminación	212
Control del color	215
Estructura de soporte para la cámara	215
Definición del método de digitalización	217
Características de un sistema de digitalización	217
Sistema de digitalización propuesto	220
Organización de las imágenes	223

Procesamiento de las imágenes	223
Recuperación de los problemas debidos a la toma de imagen (cálculos digitales)	224
Esquema general de los procesos	224
Selección del esquema de color	225
La imagen acromática	226
Los diferentes esquemas de manejo del color	229
Corrección de la iluminación	249
Corrección de la distorsión debida a la lente	250
Corrección de la distorsión perspectiva, rotación y cambio de escala	251
Rotación y translación de imágenes	253
Extracción de información	253
Tratamiento previo	254
Segmentación	255
Superficie de cada zona	262
CONCLUSIONES	265
BIBLIOGRAFÍA	271
TABLA DE FIGURAS	281
LISTA DE LÁMINAS	283

Agradecimientos

A los arqueólogos que han excavado el sitio arqueológico de Cacaxtla. Gracias a su trabajo ha sido posible este proyecto.

A los arqueólogos y arquitectos encargados del sitio y quienes facilitaron su acceso para el levantamiento y la búsqueda de información.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, por proporcionar el financiamiento necesario para el desarrollo del proyecto Cacaxtla y del Mural O’Gorman, y que me otorgó una beca para la realización de mi doctorado.

A la Dirección General de Servicios de Cómputo Académico de la UNAM, organismo donde laboro y del cual he recibido un apoyo permanente.

A Claudia Lupone, restauradora de Cacaxtla, quien me llevó a conocer el sitio y en una labor conjunta realizamos un primer trabajo sobre el registro de la información para fines de restauración de bienes muebles, tema de su tesis bajo mi dirección.

A Araceli Casas, por auxiliarme en varias fases del trabajo, y de manera particular en la realización de los modelos tridimensionales.

A Selene Salas, por apoyarme en la restitución computarizada de las pinturas de Cacaxtla, tema sobre el cual desarrolla su tesis bajo mi asesoría.

Introducción

La documentación, estudio y restauración de las obras arquitectónicas están ligadas a la época en la cual se realizan y reflejan múltiples aspectos del desarrollo de su tiempo.

Por una parte, existen variaciones en la relación que establece una sociedad con sus monumentos. Así, los valores empleados en su evaluación y apreciación cambian y toman con distintos matices criterios tales como el utilitario, el histórico, el estético o el de lo espectacular¹. El peso relativo dado a estos diferentes valores influye tanto en el aspecto teórico de la restauración, en la toma de decisiones relacionadas al estudio y conservación de los monumentos; como en el marco institucional y legal de la protección del patrimonio arquitectónico.

Por otra parte, las actividades realizadas en torno al patrimonio histórico involucran múltiples técnicas que son producto del avance de otros campos del conocimiento de los que se requiere conocer sus desarrollos más recientes para definir la forma como pueden ser aprovechados para beneficio del conocimiento histórico y la restauración de monumentos. Así, la restauración de la estructura de un edificio toma en cuenta el conocimiento ingenieril de las fuerzas a las cuales están sometidos los elementos estructurales para explicar su comportamiento; de modo similar, los procesos aplicados a la conservación de la pintura mural varían en correspondencia con la producción de nuevos materiales y cuando se conoce mejor su respuesta al envejecimiento y a los factores ambientales. La evolución de la restauración no está solamente ligada a su propio fenómeno de maduración; por vía de la acumulación de información y experiencia, depende también del desarrollo propio de otras áreas.

¹ Se entiende por espectacular la puesta escenográfica del monumento donde su valoración se basa en elementos cuantitativos, físicamente o psicológicamente, que impresionan al espectador por el uso de "el más grande, el más viejo, el más...". Es un valor nuevo desarrollado por el consumismo turístico.

El cómputo es una herramienta relativamente nueva que ha tenido un impacto importante en los tiempos modernos; ha invadido la mayoría de las actividades laborales, reemplazando herramientas existentes o creando nuevas más eficientes, sin embargo su aplicación al estudio del patrimonio es todavía escasa. Mientras que las disciplinas clasificadas como científicas como la matemática, la física y la química han utilizado en forma inmediata las computadoras y han sido partícipes activos de su desarrollo, otras como arquitectura y la restauración, las integran a su forma de trabajo con mayor lentitud. El problema no es nuevo. Desde el siglo XIX, Viollet-le-Duc se lamenta diciendo que los arquitectos deben aprender de los científicos su rigor, forma de trabajar y de razonar así como su capacidad de abstracción. Hombre apasionado por los descubrimientos de su tiempo y con una visión dinámica, integra inmediatamente la fotografía al registro de los monumentos. Pero el cómputo es un área más compleja que la fotografía y existen varios factores que explican por qué se ha incorporado con tanta lentitud a las labores que giran alrededor del patrimonio.

- El cómputo es un área muy reciente. El cómputo de imágenes empezó al principio de la década de los cincuenta como forma de control aéreo para el ejército de Estados Unidos, y su evolución corresponde a la mejoría conjunta tanto de las computadoras como de los programas que permiten su aprovechamiento. Así, por ejemplo, se requirió de un monitor capaz de mostrar puntos con colores para que fueran desarrolladas las técnicas de sombreado de las entidades tridimensionales y fue a partir de los años ochenta que estas herramientas salieron de los centros de investigación o de las grandes empresas.
- Es la llegada de las microcomputadoras lo que llevó el cómputo al alcance general logrando su “masificación”. La visión de Steeve Jobs cofundador de Apple a finales de los 70 quien revolucionara el mundo con la “computadora personal” y la entrada al mercado de IBM en 1981 constituyen los grandes pasos para que el cómputo se vuelva una herramienta para todos, útil y eficaz en todas las actividades.
- El trabajo de imágenes por computadora es un área en desarrollo. En muchos casos la aplicación de los productos de investigación no es muy convincente en sus primeras

versiones y se requiere su perfeccionamiento antes de que se vuelvan realmente útiles. Así, durante años el modelado tridimensional que proponía un programa como Autocad era excesivamente tedioso o demasiado primitivo; en ambos casos se volvía inútil. Hubo que esperar a la vez la fabricación de computadoras más potentes y la integración de herramientas adicionales dentro del programa para empezar a utilizarlo. De la misma forma la "realidad virtual"² tan prometedora para el futuro continúa como un terreno experimental y de investigación. Se conocen las tendencias de las investigaciones en cómputo gráfico y se sabe que se modificarán la forma de aplicación de los recursos de cómputo y su alcance, optimizándose los resultados ya sea desde su aspecto cualitativo o a partir de su eficacia, para trabajar en forma más sencilla, intuitiva y mucho más rápida. Pero "lo mejor es el peor enemigo de lo bueno" y aun cuando se puede esperar un futuro cercano mejor, las herramientas disponibles ya permiten en la actualidad su aprovechamiento para la documentación y el estudio de los monumentos.

- El cómputo fue asociado a una imagen esotérica de "reservado para los iniciados" de los cuales no podían formar parte las disciplinas humanísticas. Es cierto que así era en sus inicios pero el advenimiento de las computadoras personales y la creación de la Macintosh en 1984 con la integración del modo gráfico como forma de interactuar entre la máquina y el hombre significaron un cambio de mentalidad en el área. Esta revolución en la interfaz, con la intención de hacerla más natural al usuario, da como resultado una simplificación del uso de los programas y de los equipos abriéndose así, a áreas poco relacionadas con los aspectos técnicos.
- Los programas no están enfocados a las necesidades específicas del estudio del patrimonio y en ese sentido, es necesario adecuarlos pues fueron concebidos para otros fines. Es un hecho que la mayoría de ellas son herramientas genéricas no enfocadas a un

² Simulación de un mundo artificial en su aspecto sensorial. Incluye entre otras posibilidades la inmersión del usuario en un mundo tridimensional mediante el uso de un casco que lo aísla de su realidad y la interacción con el uso de guantes.

oficio en particular sino a una actividad. Por ejemplo, es posible realizar dibujos técnicos pero se utiliza la misma herramienta en áreas de trabajo distintas, esto tiene el inconveniente de no ofrecer al usuario una herramienta optimizada. La tendencia se encamina a especializar los programas en la medida como los grupos de usuarios crecen.

- Para resolver necesidades específicas se requieren de conocimientos de cómputo profundos. Se mencionó anteriormente la simplificación del uso de las computadoras y de los programas; sin embargo, éstos últimos tienen grados de dificultad variados lo cual puede implicar en ciertos casos la necesidad de una capacitación de los usuarios y por lo tanto la creación de especialistas, igualmente con grados de “especialización” variables, impidiendo que ciertas herramientas sean de uso extendido. Por otra parte, no puede existir una solución a cada problema y habrá ocasiones en que será necesario crearla. En este caso, la conformación de equipos interdisciplinarios de trabajo se volverá indispensable ya que el grado de especialización requerido será muy alto.

Tal como se menciona anteriormente, se presentan grados de complejidad en el cómputo correspondientes a distintas demandas de uso. Las necesidades más generales podrán ser resueltas con herramientas comunes mientras que las especializadas requerirán de herramientas reservadas exclusivamente a los profesionales del área.

Lo que distingue la imagen por computadora y, por consecuencia, su potencial es que se trata de una representación numérica de una imagen y en ese sentido podrá ser manipulada y procesada. Mientras que la imagen tradicional es un elemento fijo, la imagen digital permite la interactividad sea retocándola, extrayendo sus características o analizándola.

En cualquier actividad se establece una estrecha dependencia entre las herramientas empleadas para su realización, las formas de trabajo y los resultados obtenidos. Al tener mejores herramientas se produce un impacto sobre alguno de los componentes del proceso, a lo mejor la forma de trabajo gana en eficiencia, productividad, calidad o los resultados alcanzan niveles que no eran permitidos con las herramientas disponibles. Por ejemplo, dado que una de las fases de la restauración consiste en la documentación de obras, al existir nuevas formas de registro más

precisas y controlables, el registro mismo de la obra y de sus daños se mejora en consecuencia. Al tener esta información mejor organizada y más accesible, los estudios basados en ella igualmente adquieren nuevos alcances por lo que el conocimiento resultante mejora, retroalimentando la actividad. Más allá del traslado de una forma de trabajo a otra, surgen también nuevas posibilidades y actividades alternas. Por ejemplo, el poder de cálculo aportado por las calculadoras y las computadoras abrió nuevas posibilidades para todo lo que puede ser plasmado en números, como son el análisis estadístico, de predicción económica o los experimentos científicos.

De la misma forma, se pueden distinguir dos formas de uso de las herramientas gráficas de cómputo para el objetivo de estudio del patrimonio. Por una parte, el reemplazo paulatino de las técnicas tradicionales por herramientas más eficientes que ofrecen ventajas como son la precisión, la facilidad de actualización y de manejo en general. Éste sería el caso de los levantamientos de monumentos y su representación mediante planos, dibujos, por mencionar algunos. Por otra parte, surge todo un espectro de exploración de actividades que eran imposibles de realizar, éste sería el caso de visualizar cómo quedaría una pintura antes de efectuar el trabajo de limpieza que quite la patina, o “vivir” un espacio arquitectónico desaparecido.

Ambos caminos son importantes y conducen a una revolución en la concepción de las formas de trabajo. Sin embargo, la tecnología debe ser superada y adecuada para su aplicación a la investigación en arquitectura y restauración. Para ello existe un primer paso consiste en el conocimiento y dominio de la herramienta, seguido por un segundo donde interviene una fase imaginativa que extrapola el uso básico a formas novedosas de aprovechamiento para finalmente, retroalimentar el desarrollo tecnológico demandando la mejoría o la creación de nuevas herramientas *ad hoc* a las actividades.

En la graficación por computadora, la restauración cuenta con una nueva herramienta que ofrece múltiples formas de uso.

Los temas de estudio relacionados al patrimonio son múltiples, pueden abarcar puntos teóricos o prácticos y tener enfoques muy variados, lo cual se refleja en la variedad de disciplinas

como arqueología, restauración, arquitectura, estética, etcétera, que han desarrollado estudios sobre ese dominio.

De la misma forma, las áreas de cómputo representan por sí solas distintas especialidades. En computación visual, las tres fundamentales son la síntesis de imágenes, el procesamiento de imágenes y la visión por computadora³. La más antigua es la relativa al procesamiento y ha llegado a un punto de estabilidad donde existen pocos desarrollos nuevos; por su parte, la síntesis de imágenes tuvo un crecimiento espectacular en los años setenta y se puede observar en la actualidad cómo los temas de investigación que giran alrededor de ésta se van enfocando hacia su aplicación como es el caso de la visualización; finalmente la visión por computadora después de haber generado mucho entusiasmo, no llegó a cumplir con las expectativas y sigue siendo un tema de investigación que ha tenido aplicaciones muy escasas y puntuales.

Para limitar el tema de la tesis, se decidió tomar dos ejemplos que muestran problemáticas muy distintas, y por consecuencia demandaran herramientas variadas del cómputo de imágenes. Ambos tienen la particularidad de presentar problemas comunes e importantes, lo que hace evidente además que la metodología empleada puede ser extendida a otros objetos de estudio.

La integración de herramientas de cómputo distintas tales como bases de datos o inteligencia artificial, puede también proporcionar un gran aporte en la documentación del patrimonio y en la generación de nuevos conocimientos. Sin embargo, estos últimos no entran en el enfoque del presente trabajo, el cual se restringe al de imágenes por computadora abarcando dos de sus principales áreas: la síntesis de imágenes y el procesamiento digital de imágenes.

En el primer caso, se sigue una metodología para obtener la creación de imágenes por la computadora. Se define un modelo tridimensional, registrado con descripciones matemáticas donde la imagen es el resultado de un cálculo en el que están involucrados simulaciones de iluminación, materiales y su proyección a un plano: sea el del monitor o el del papel en caso de

³ Estos términos quedan definidos en el primer capítulo.

una impresión. En el caso del procesamiento de imágenes, la representación digital se adquiere mediante algún dispositivo y corresponde a la proyección plana de un objeto real tridimensional. Es factible manipularla y transformarla para obtener otra imagen resaltando puntos de interés; además de que ésta puede ser analizada.

En el primer ejemplo, se trata de la problemática del estudio arquitectónico de un sitio arqueológico. El espacio de un sitio mesoamericano es difícil de entender y visualizar por el estado de deterioro que presentan las estructuras de los edificios, la pérdida de sus acabados y color y por el hecho de que las excavaciones dejan al descubierto elementos que corresponden a distintos periodos de ocupación. Las computadoras permiten el dibujo de las estructuras actuales, el modelado tridimensional y el estudio de la existencia de algunas reglas geométricas y de composición de los espacios arquitectónicos. La precisión del dibujo así lograda y la facilidad con la cual éste se puede modificar permiten evaluar las diferentes propuestas de reconstrucción. Adicionalmente, los medios digitales hacen factible modelar en tres dimensiones para reconstruir y visualizar el espacio mesoamericano sin intervenir en el sitio, proporcionando una mejor percepción de la forma como los habitantes del lugar construyeron sus espacios. En este trabajo, se desarrolla una metodología para la reconstrucción virtual del sitio de Cacaxtla y se proponen configuraciones que corresponden a varias de sus etapas constructivas.

Por su parte, el segundo estudio de caso se enfoca al problema de la documentación en restauración, aplicándolo al mural O'Gorman de la Biblioteca Central de la UNAM. Se estudian las ventajas y desventajas de la documentación digital, cómo realizarla, y qué criterios tomar en cuenta. Toda imagen presenta una serie de deformaciones en relación con el objeto fotografiado, para ello se estudia como corregir estos defectos. Finalmente, se muestra con un ejemplo la forma en que la imagen digital puede ser procesada para extraer información.

OBJETIVOS

- Demostrar mediante el desarrollo de dos estudios de caso distintos, que la integración de las herramientas gráficas de cómputo puede proporcionar un aporte significativo en la documentación y análisis del patrimonio arquitectónico.
- Adecuar las herramientas gráficas de cómputo para el registro y estudio de bienes muebles e inmuebles.
- Demostrar que la incorporación de las técnicas de síntesis de imágenes al estudio de sitios arqueológicos ofrece nuevas posibilidades para el planteamiento de hipótesis sobre la concepción arquitectónica mesoamericana y la visualización de espacios destruidos. Este premisa se comprueba mediante el estudio del sitio arqueológico de Cacaxtla.
- Demostrar que el uso de las herramientas de procesamiento de imágenes es útil en las actividades de documentación y restauración de murales, tanto para su registro preciso como para extraer información. Para ello, se aplica este desarrollo al mural O’Gorman de la Biblioteca Central de la UNAM.
- Aumentar el conocimiento general sobre los dos casos utilizados los cuales son de gran interés por su naturaleza e importancia cultural propias, *i.e.*, el mural O’Gorman de la Biblioteca Central de la UNAM y el sitio arqueológico de Cacaxtla.

HIPÓTESIS

- La documentación y el estudio del patrimonio arquitectónico encuentran en el uso de las herramientas de computación gráfica una forma adicional útil y novedosa para la extracción de datos, aumentando con ello las posibilidades de análisis y los alcances en los temas de estudio.
- La reconstrucción de sitios arqueológicos mediante el uso de sistemas de cómputo a partir del estudio de sus ruinas conlleva una lógica y disciplina de trabajo que acerca al

investigador a un sistema de deducciones y análisis que permiten un mejor entendimiento del diseño arquitectónico mesoamericano.

- La visualización de sitios arqueológicos por medio de sistemas de cómputo permite obtener representaciones de éste con un alto grado de fidelidad y ofrece varias posibilidades para su entendimiento y vivencia, ampliando así la calidad de la percepción del hecho arquitectónico.
- Al utilizar las herramientas de procesamiento de imágenes, es factible obtener un registro preciso del estado de un mural, con lo cual se mejoran las técnicas tradicionales.
- El registro digital abre un nuevo campo de estudio para la restauración, mediante el procesamiento de la información, esto permite la extracción automática de información.

METODOLOGÍA

En la primera parte se presenta un panorama general de las posibilidades de uso del cómputo visual como apoyo al quehacer y la enseñanza de la arquitectura, al registro y estudio del patrimonio cultural, también como una forma de resolver problemas específicos de estas áreas. Este apartado es esencialmente teórico, abarca herramientas de uso común y algunos de los últimos avances de la graficación por computadora, y en ningún momento pretende ser exhaustivo. Posteriormente, se desarrollan dos ejemplos de aplicación: el primero tiene que ver con el campo de la arquitectura mesoamericana y el segundo se relaciona con la documentación y estudio de murales.

La segunda parte presenta abarca la reconstrucción virtual del sitio arqueológico de Cacaxtla, de esta forma se explica la metodología seguida, las herramientas de cómputo empleadas, los problemas encontrados y los resultados obtenidos incluyendo sus limitaciones. Se describe el levantamiento de las estructuras del sitio para poder contar con una información precisa que permita llevar a cabo el análisis que sustentan las propuestas de reconstrucción virtual del sitio en distintas épocas. Se buscó entender algunos de los principios que pudieron regir la

composición arquitectónica y, por consecuencia, los resultados obtenidos abarcan más allá de la obtención de imágenes. Los pasos seguidos para cumplir con el objetivo, proporcionan una serie de nuevos conocimientos tan importantes como el resultado final. Las herramientas de cómputo empleadas provienen de programas de Diseño Asistido por Computadora (CAD)⁴ utilizados para el análisis y el modelado tridimensional de las estructuras arquitectónicas; de dibujo para la restitución de pinturas murales; y finalmente de producción de imágenes con calidad fotorrealista para visualizar el espacio arquitectónico.

En la tercera parte se estudia el problema del registro del mural O’Gorman de la Biblioteca Central de la UNAM, para fines de restauración. En relación al objetivo definido, las particularidades del mural y los criterios a tomar en cuenta para optimizar los resultados, se presenta una propuesta para poder llevarlo a cabo. Sobre algunas imágenes utilizadas como modelo, se desarrolla una metodología de corrección de los defectos inherentes a la captura de imágenes y un ejemplo de extracción de información que consiste en la cuantificación de las superficies de piedras para cada tipo de piedra, para este fin se recurre a programas de procesamiento digital de imágenes y rutinas de programación visual.

⁴ *Computer Aided Design.*

Herramientas de cómputo de imágenes para la arquitectura

El cómputo sufre de un grave problema en cuanto al uso de términos que permiten describir sus distintas áreas y herramientas. De creación reciente y con multitud de necesidades, inventa palabras reutilizando conceptos conocidos; sin embargo, el uso del vocablo preciso deja mucho que desear al difundirse y “vulgarizarse”. Áreas que fueron claramente definidas como distintas por sus especialistas, no se deslindan en forma tan precisa para las personas ajenas a ellas, y los términos que de manera evidente correspondían a unas empiezan a ser usados en otras. Adicionalmente, estas expresiones son generalmente creadas en inglés y existe la necesidad de usarlas antes de que las academias las traduzcan. Las influencias de las culturas que los generan inicialmente quedan marcadas en la expansión y la adecuación local del vocabulario, perdiendo así los usos genuinos de las raíces de los idiomas. En México se utilizan anglicismos mientras que en España y Francia, se realizó un intento de definir palabras propias que en muchos casos empiezan a ser también rebasadas por la necesidad de una adecuación rápida del diccionario. Términos como *rendering* no han encontrado traducciones satisfactorias, por ello, se acostumbra mencionar directamente la palabra sajona; *pixel*, proveniente de la abreviación de *picture element*, ha perdido todo enlace con su raíz al quedar únicamente como *pixel*.

En este sentido, el término de “computación visual” se define como el conjunto de las distintas herramientas de cómputo que permiten crear imágenes a partir de datos, o procesar y analizar imágenes existentes, hayan sido creadas éstas digitalmente o capturadas con algún dispositivo. Inicialmente empleado para definir una “forma visual” de trabajar con computadoras, se entiende cada vez más el término cuando se desea hacer referencia al trabajo de “elementos visuales” o sea: imágenes por computadora.

En esta sección se describen posibilidades diversas ofrecidas por la computación visual para la docencia y la investigación en arquitectura y en restauración. Así, se examinan algunos problemas y necesidades además de los instrumentos para resolverlos. Son ejemplos generales que no pretenden abarcar todas las posibilidades y, a través de ellos, iré definiendo algunas de las áreas del cómputo.

El cómputo abarca mucho más que el aspecto gráfico. Sin embargo, los arquitectos que por su formación acostumbran para expresarse recurrir a dibujos, planos, fotografías, etc., encuentran en la rama gráfica del cómputo, una extensión natural de su forma de trabajar y pensar. Adicionalmente, y ya que la mayoría de los elementos sobre los cuales trabaja el arquitecto son elementos visuales, la forma más inmediata para reproducirlos, estudiarlos o hablar de ellos es valiéndose de herramientas visuales.

De hecho, la computación visual ha invadido en los últimos años todas las áreas de trabajo, desde el mundo de los contadores donde las gráficas de barras permiten visualizar en forma inmediata la tendencia de un fenómeno; hasta la química donde el investigador puede construir, rotar y observar una molécula y simular sus propiedades y conducta, por ejemplo bajo el efecto de distintas temperaturas. La aceptación y uso de estas herramientas se fundamenta en el hecho de que “en todas las áreas del conocimiento se ha llegado a tal complejidad que las lenguas naturales y los lenguajes matemáticos son incapaces, por sí mismos, de expresar sintéticamente e instantáneamente las diversas relaciones que descubren a lo largo de sus procesos de investigación todo estudioso o creador ha buscado un “metalenguaje gráfico” capaz de apoyar o traducir el lenguaje específico de investigación de su disciplina o actividad” (Antonio Muñoz Carrio en la Introducción a Jacques Bertin, 1988).

También, la gráfica tradicionalmente empleada para expresar una idea y comunicarla, cambia totalmente su sentido al ser la resultante del procesamiento de datos. Se vuelve entonces una forma de entender la información “escondida” atrás de ellos y entender fenómenos que de otra forma no habrían sido “visibles”.

Toda herramienta tiene un potencial que puede ser aprovechado para fines distintos. De modo similar a como el arquitecto puede utilizar un lápiz para dibujar, también acostumbra pensar y estimular su imaginación dibujando; asimismo, la propia herramienta de cómputo se utiliza para dibujar o encontrar explicaciones a un plano, con lo cual genera nuevos conocimientos sobre su diseño y aporta conocimientos novedosos en el proceso de investigación.

A PARTIR DE FOTOGRAFÍAS

La fotografía es un medio ampliamente utilizado en arquitectura desde su invento en el siglo XIX (Figura 1). Gracias a ella se fija, y conserva una imagen de algo visible en un lugar y momento específicos. Como forma de documentación resulta ser una ayuda invaluable para la memoria y la experiencia del fotógrafo puede ser transmitida y compartida a terceros ayudando en el proceso de enseñanza. Sin embargo, su tratamiento digital permite modificarla, hacer más visible ciertas partes de su contenido y realizar cálculos y análisis.

Las fotografías, las diapositivas o el video pueden ser llevados a forma digital mediante dispositivos de digitalización con objeto de ser examinados y trabajados desde las computadoras. Estos últimos años han visto el nacimiento de cámaras que reemplazan el sistema de impresión de la señal luminosa sobre una película por un registro digital, generando archivos que pueden ser transferidos y leídos directamente desde los programas de cómputo para la edición de imágenes. Esta tecnología ahorra tiempo al usuario que quiere trabajar las imágenes con una computadora al evitar los pasos intermedios como son llevar su película fotográfica a revelar, para poder después digitalizar las imágenes.

Una imagen digital, sea obtenida directamente en forma digital o mediante la digitalización, tiene la ventaja de no deteriorarse con el tiempo y poder ser modificada, como se verá más adelante. Si se desea una copia en papel, se imprime directamente la imagen, si se requiere en diapositiva, se utiliza un equipo especial el cual imprime películas fotográficas.

Además de ser visibles en un monitor de computadora, las imágenes también pueden aparecer en una televisión o ser proyectadas en la pantalla de un auditorio.

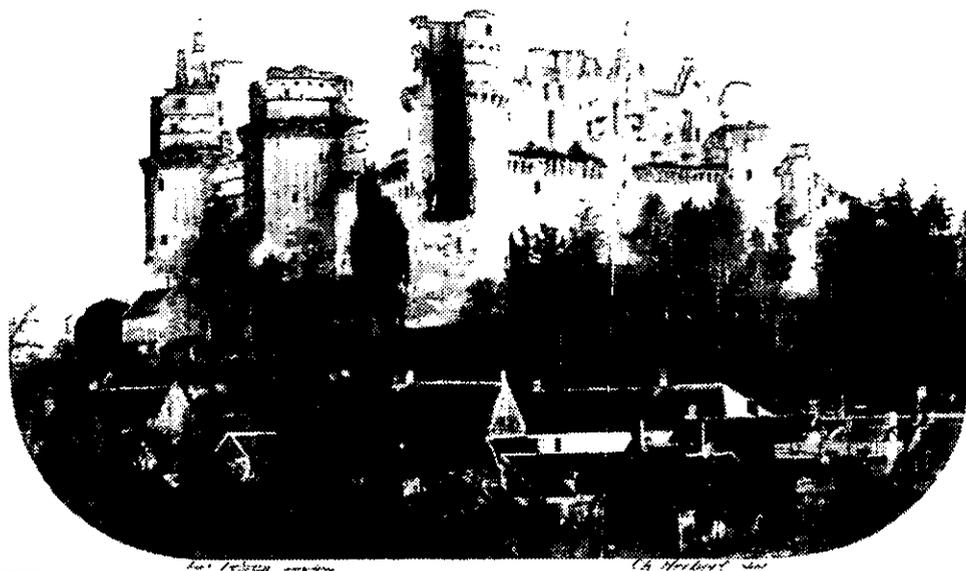


Figura 1. Castillo de Pierrefonds, Francia. Fotografía tomada poco antes de que Viollet-le-Duc empezara la reconstrucción en 1858. (Fotografía de los archivos de los monumentos históricos franceses registrada con el número CNMHS-76C1N5)

Asimismo, las imágenes digitales pueden enviarse directamente por la red Internet, como sucedería cuando un reportero toma una fotografía desde el otro lado del planeta y la manda vía telefónica a su periódico donde llega en unos minutos. Las páginas gráficas de información del WWW⁵ integran multitud de imágenes que permiten mostrar desde la fotografía de los miembros que conforman los equipos de trabajo, hasta presentaciones completas de proyectos o colecciones de obras. Se pueden encontrar documentos variados tales como fotografías, planos de

⁵ World Wide Web. La telaraña informática que interconecta las computadoras a nivel mundial. El usuario lee páginas gráficas y al señalar algunas palabras claves puede ser transportado, sin darse cuenta, a páginas ubicadas en cualquier lugar del planeta.

monumentos o representaciones de manuscritos, accesibles desde cualquier computadora con conexión a la red, en todo el planeta.

La fotografía es uno de los métodos más utilizados para la documentación de obras, sean éstas pinturas, esculturas o monumentos. Mediante el registro en forma digital se aumenta el potencial de la fotografía y se puede lograr un registro mucho más preciso al utilizar las herramientas que permiten la corrección de defectos inherentes al proceso fotográfico. Esto es lo que se estudia en relación al mural O'Gorman de la Biblioteca Central de la UNAM. Las imágenes pueden también ser integradas a sistemas masivos de información organizados en bases de datos y complementadas con datos de tipo texto. Es posible así, buscar y encontrar las construcciones de cierta época que correspondan a criterios específicos de selección y obtener su descripción correspondiente. En muchos países, los inventarios de monumentos están organizados en bases de datos donde se hacen referencias numéricas a los elementos gráficos archivados en forma tradicional; actualmente se puede integrar toda la información en un solo sistema.

Al aprovechar la ventaja de contar con una imagen que se puede editar desde programas de dibujo sencillos, se abre un amplio espectro de posibilidades. El maestro, puede preparar una clase aislando las partes importantes de una imagen y puede integrar éstas a apuntes; también puede modificar el color de los elementos y retocar partes. Es posible juntar dos imágenes en una sola, mostrando por ejemplo la planta de un edificio al lado de la fotografía de su fachada y añadir un comentario; puede en fin, modificar la información para hacer más explícito el conocimiento que desea transmitir a sus alumnos.

Imágenes defectuosas, con poco contraste o sobreexpuestas pueden ser corregidas (Figura 2). Estas posibilidades se incorporan en las técnicas definidas como de **procesamiento de imágenes**. Ésta es el área más antigua del cómputo visual, con un auge en los años 60. Su crecimiento es en la actualidad menor, no obstante su uso está muy difundido. El procesamiento permite trabajar la imagen para mejorar sus cualidades visuales o para hacer más visible la información buscada. Algunas de estas posibilidades se encuentran en programas gráficos de amplio uso como *Photoshop*, mientras que para tener un acceso más completo a las técnicas es

necesario recurrir a programas especiales de procesamiento que permiten el acceso a los distintos parámetros de control de las rutinas y encadenar varias de ellas en una programación para automatizar procesos. Adicionalmente, se pueden programar rutinas complementarias para realizar funciones específicas no presentes en las herramientas.

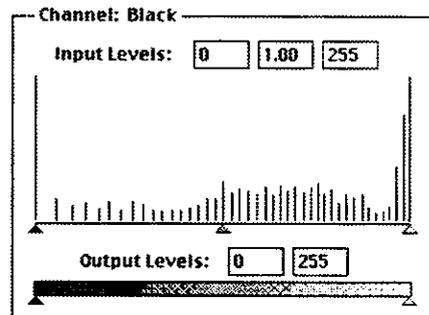
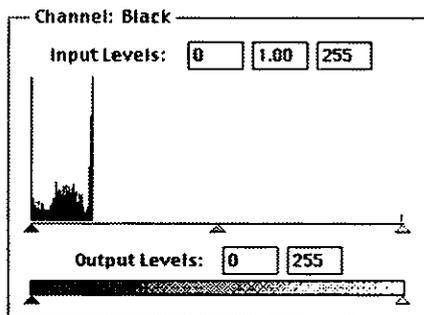


Figura 2. Toma fotográfica inicial y la imagen obtenida después de su procesamiento para resaltar contrastes. En la parte inferior, los histogramas correspondientes (ver definición pág. 217).

pero hoy en día se pueden utilizar fotografías normales e involucrar así menos recursos. La precisión lograda es inferior y la información obtenida no sirve como levantamiento arquitectónico, pero cuando se trata solamente de definir un ambiente para usarlo en realidad virtual la precisión es un conflicto menor en relación con el tiempo ahorrado. El problema no es trivial, si se considera que varias escenas distintas pueden generar la misma imagen. Cómo saber por ejemplo, si un objeto que se ve con disminución de sus medidas aparece así por el efecto de perspectiva o fue construido de esta manera; el *trompe l'oeil* lleva este nombre, justamente por el engaño visual que representa. Tampoco se debe olvidar la anécdota de Breton cuando pide al carpintero la construcción de una mesa a partir de un dibujo en perspectiva y obtiene una mesa con pies de distintas alturas. Así que el proceso no logra ser todavía totalmente automatizado y requiere la intervención del usuario en la toma de las decisiones principales.

PIXEL VS VECTOR

En el apartado anterior la información de las imágenes está basada en píxeles, la unidad mínima de información gráfica. El pixel se puede comparar a un grano de arena; varios granos juntos definen una superficie. Si se dibuja una línea en la arena, los granos correspondientes se hundieren por donde pasa la línea, si se desea borrar parte de esta línea, con la mano se alisa la superficie. Cada grano es independiente de sus vecinos y solamente el cambio de las características de una secuencia de granos expresa una forma, en este caso una línea. Cada pixel tiene, además de una ubicación específica en una malla ortogonal, características de color, y los programas de manejo de imágenes registran los atributos de cada uno, siendo el conjunto aquél que define la imagen. Una imagen definida con píxeles es llamada *bitmap* o *raster*. El pixel es también la unidad de los monitores; los más comunes en ambientes PC son de 640 x 480 píxeles. En el caso de las impresoras, no se habla de píxeles sino de puntos lo cual es esencialmente lo mismo; 600 dpi o puntos por pulgada corresponden a la capacidad de una impresora para

Al procesar las imágenes es posible aislar partes correspondientes a características definidas, mediante técnicas de segmentación de imágenes⁶ como sería, por ejemplo, detectar las zonas verdes en un aglomeración urbana y calcular su superficie. En vez de hacerlo manualmente se puede estudiar primero la forma con la cual esta característica se expresa, en este caso el color verde, y programar una serie de acciones con el objeto de que el sistema pueda realizar automáticamente la tarea. Estas técnicas son bastante utilizadas en relación con los estudios del planeta a partir de imágenes de satélite, para examinar la hidrografía, las expansiones urbanas y la contaminación, por mencionar algunos aspectos y corresponde a un objetivo de trabajo específico en la interpretación de imágenes.

Con las técnicas de **visión por computadora**, se tiene además la posibilidad de reconocer formas, y de “entender” el contenido de una imagen para extraer información emulando el sistema visual humano. Para el humano, el reconocimiento de objetos correspondientes a una forma plasmada en una fotografía o un dibujo es inmediato pues el sistema visual es parte del sistema nervioso, así, la información es llevada al cerebro encargado de interpretarla y relacionarla con información complementaria.⁷ Para la computadora, un imagen no tienen sentido hasta darle una serie de elementos y criterios. Cuando la visión por computadora empezó, generó mucho entusiasmo pero en la actualidad su campo de aplicación es escaso, y el problema se ha revelado mucho más complejo que como se pensaba. Ha sido factible utilizarla en ambientes controlados como en robótica de procesos industriales; sin embargo, fuera de ello no ha tenido la capacidad de solucionar otros problemas, por lo que sale poco de los ambientes de investigación.

Uno de los desarrollos actuales de la visión consiste en reconstruir formas tridimensionales a partir de fotografías, las cuales son por definición proyecciones bidimensionales de un mundo tridimensional. Tradicionalmente se empleaba la fotogrametría

⁶ Segmentar una imagen consiste en reducirla a elementos de interés o elementos estructurales encontrados mediante técnicas automatizadas.

⁷ De hecho, el reconocimiento de formas requiere de un proceso de abstracción donde se relaciona la representación plana en papel con el mundo tridimensional y adicionalmente del conocimiento previo de los objetos o de objetos similares.

- El modo *bitmap* permite un trabajo sutil de los colores con una gran riqueza gráfica.
- Es una representación que depende de los periféricos en cuanto a color y definición.
- Los archivos son generalmente muy grandes.
- No existen objetos, sólo una secuencia de píxeles así que al modificar, como por ejemplo mover, una parte del dibujo, se afectan otras partes.

Estas características definen usos distintos y muy pocos programas integran ambas. La definición por pixel permite representaciones fotográficas, artísticas y completas del color, mientras que la definición vectorial es utilizada para el dibujo técnico y la construcción de modelos tridimensionales.

Cuando se digitaliza con un *scanner*⁸, se captura una imagen donde cada pixel representa una cierta superficie de la imagen original. Si se desea convertir un plano digitalizado de esta forma a un plano definido vectorialmente para aprovechar las herramientas CAD, existen dos técnicas. En la primera, el programa vectorial presenta la imagen en el fondo para redibujar encima usando las herramientas de línea, círculo, etcétera; en la segunda, se utilizan paquetes que en forma automatizada reconocen los patrones y convierten las secuencias de píxeles en entidades geométricas; el proceso en raras ocasiones se lleva a cabo sin que el resultado muestre “basura” o errores de interpretación. Otra forma consiste en digitalizar con una tableta, lo cual corresponde a un proceso parecido a calcar el plano, con un lápiz electrónico conectado a la computadora.

DIBUJAR CON COMPUTADORAS

Uno de los primeros usos del cómputo para el arquitecto se encuentra en la elaboración de planos y en la reproducción de su forma de trabajo tradicional, donde plasma en papel la descripción de los proyectos. Por una parte, esta representación es la expresión de una idea y de una forma de resolver un programa arquitectónico; por otra, es el medio con el cual se transmite

⁸ Aparato que captura una imagen o un documento leyéndolo punto por punto para generar un archivo *bitmap*.

imprimir 600 puntos negros sobre una distancia de una pulgada. La impresión de una línea negra tiene relación en realidad con la impresión de una secuencia de puntos negros.

Por otra parte, los programas para dibujo técnico conservan en una base de datos, una información definida vectorialmente, es decir con la definición geométrica de las formas y de sus puntos significativos. El registro de una línea tiene como información las coordenadas de cada una de sus extremidades en un sistema cartesiano, asociadas a la definición geométrica de esta entidad mediante una ecuación. Se podría comparar con una cuerda fijada en sus extremidades mediante dos clavos. Al mover una extremidad, se redibuja automáticamente toda la línea. Esta definición geométrica tiene las ventajas ligadas a la conservación de las propiedades matemáticas de la geometría de los objetos.

Cada forma de definición de las gráficas tiene características propias que se pueden resumir en los siguientes puntos (Couwenbergh, 1998):

- En el sistema vectorial:
 - La descripción de los objetos es independiente de la definición de los periféricos, así al imprimir tomarán la mejor calidad ofrecida por éste.
 - Los elementos gráficos son objetos que pueden ser organizados en forma jerárquica para formar objetos más complejos.
 - Cada objeto puede ser modificado sin tocar a los demás.
 - El tamaño de los archivos es mucho más reducido que en el caso de las imágenes *bitmap*.
 - Es factible realizar mediciones sobre tamaño, punto medio, el ángulo entre dos líneas, la superficie de figuras cerradas, etcétera.
- En el modo *bitmap*:
 - Cuando se agranda la imagen o se requiere una vista cercana, los píxeles crecen con lo que se presentan efectos de escalera en las líneas que no siguen la trama ortogonal.
 - La forma de trabajo reproduce la de los diseñadores gráficos, con brochas, lápices y aerosoles, entre otros.

edificio, todos los planos de instalaciones se pueden volver a imprimir, reflejando automáticamente este cambio; esto es justamente parte de las ventajas de no tener información duplicada.

El dibujo se realiza en escala real, es decir se decide inicialmente a qué corresponde la unidad de dibujo, en arquitectura es generalmente el metro. Se dibuja sin conversión mental, al representar un muro de 3.20 metros, se indican 3.20 unidades, y al momento de imprimir se escoge la escala. Por ejemplo, si se determina que una unidad del dibujo quedará impresa de un centímetro, esto correspondería a una escala de 1/100. Contrariamente a la forma tradicional de trabajo, el mismo dibujo puede quedar impreso en distintas escalas según las necesidades.

Adicionalmente se pueden realizar cálculos para conocer, por ejemplo, superficies de muros, de cuartos y tuberías. Es posible ligar el archivo de dibujo con bases de datos u hojas de cálculo para facilitar la evaluación cuantitativa del material y la estimación de costos.

TRABAJAR EN TRES DIMENSIONES

La arquitectura es la estructuración del espacio y por definición es una actividad que considera información tridimensional. El arquitecto imagina el espacio y, por las limitantes de la hoja de papel, lo representa con un sistema descriptivo codificado bidimensional, donde muestra la volumetría mediante distintas proyecciones.

La evolución de los sistemas de representación de edificios y conjuntos urbanísticos tiene varias fases en la historia. De la representación por medio de plantas y fachadas a escala hasta la perspectiva, reconocida como de Brunelleschi, se pasa a una búsqueda de control de la representación que va más allá de la descripción, la cual conlleva una preocupación por ver la arquitectura espacialmente antes de construirla. Existe en este proceso una necesidad de poseer un sistema adecuado que permita visualizar el objeto con mayor realismo que lo que se disponía anteriormente. Corresponde a “la búsqueda de un fenómeno de identidad entre representación y visión” (Bertol, 1997). Esta búsqueda es muy comparable a aquella que favorece desarrollar

la información para la realización de la obra. Es un código abstracto de representación del resultado de un proceso creativo e imaginativo. Tiene la gran limitante de ser plano cuando la arquitectura corresponde al trabajo del espacio y de los volúmenes; por lo tanto, existe una gran distancia entre el objeto y su representación. Como se verá más adelante, la computadora permite que el plano sea el resultado de un trabajo conceptual y espacial, donde primero se trabaja en tres dimensiones para visualizar el proyecto. Sin embargo la mayoría de los arquitectos siguen reproduciendo su forma habitual de trabajo y utilizan los programas solamente para dibujar, sin aprovechar estas nuevas capacidades.

Las herramientas CAD son generalmente usadas para el dibujo asistido por computadoras más que para el diseño asistido. Aun así, las ventajas encontradas han hecho que en los últimos años, los restiradores se hayan vuelto casi obsoletos. Dibujar con una computadora es realizarlo en forma precisa, rápida, sin pelear con tinta china y contando con una gran flexibilidad para hacer cualquier modificación al dibujo. Los programas son muy intuitivos para los arquitectos, quienes pueden aprender rápidamente a usarlos.

Los programas CAD proporcionan las herramientas necesarias para hacer figuras geométricas, insertar textos y acotaciones. Éstas últimas están ligadas a los puntos que miden y aun cuando el dibujo sea modificado, la acotación correspondiente se actualiza automáticamente. Los elementos como muebles y simbología estándar quedan registrados en forma de librería insertada en los planos. Los elementos repetitivos son dibujados una sola vez e incorporados múltiples veces, pudiendo ser girados y cambiados de escala. Así que además de contar con precisión, se obtiene un gran ahorro de tiempo al no tener que dibujar dos veces el mismo elemento.

La información gráfica está registrada en forma vectorial en una base de datos y puede ser separada en distintas capas. Éstas son como hojas transparentes superpuestas y se aprovechan para organizar la información en forma complementaria y no repetitiva. En una capa se registra la estructura del edificio, en otra las instalaciones eléctricas, en otra más los muebles, etcétera, y al momento de imprimir, se decide qué información imprimir. Al modificar la estructura del

formas de visualización por computadora con el objeto de obtener una mejor descripción y mayor vivencia del espacio arquitectónico.

Al visualizar con mayor realismo⁹ los proyectos arquitectónicos se facilita el ejercicio de la crítica sobre ellos. Además, se puede convertir el cómputo en un medio de creación para mejorar el espacio al trabajar su diseño, los materiales y la luz en forma interactiva, viendo inmediatamente el impacto de las modificaciones. En el caso de un sitio arqueológico, la visualización posibilita vivir un espacio histórico desaparecido que no es factible reconstruir.

La visualización es más compleja que el dibujo por computadora, por consiguiente tiene varios niveles de profundidad en su uso y es una herramienta en constante desarrollo. Lo que un usuario podía esperar de su computadora hace diez años no se puede comparar con lo que obtiene en la actualidad. Los programas favorecen mayores alcances en la medida que van incluyendo nuevos algoritmos¹⁰ resultados de las últimas investigaciones, los cuales, en muchas ocasiones pueden ser implementados gracias al hecho que las computadoras procesan la información mucho más rápidamente y con mayor calidad gráfica.

Como es de esperar, estos desarrollos no fueron impulsados por las necesidades de los arquitectos. Inicialmente fueron las grandes empresas armamentistas y de ingeniería (industria espacial y automotriz) las que empujaron la creación de las herramientas de modelación, simulación y visualización. La fuerza económica y estratégica que representan así como su natural enlace con la tecnología, permitieron que estas áreas hayan sido las principales estimuladoras del desarrollo del cómputo, desde la creación misma de las computadoras. La simulación de vuelo, fundamental en el entrenamiento de los pilotos, representó un paso

⁹ A lo largo de la tesis el concepto de "realismo" es utilizado en su sentido común. El realismo obtenido en visualización consiste en una representación fiel del objeto.

¹⁰ Secuencia ordenada de una serie de instrucciones para resolver un problema en forma lógica. (Ver ejemplo pág. 44 "Iluminación global")

importante para mejorar la interacción en “tiempo real”¹¹ entre el usuario y la máquina. En estos sistemas, se hacía una reproducción de una cabina de avión y se proyectaban las imágenes que correspondían a un aeropuerto. Al maniobrar los distintos controles, se reproducía la velocidad del avión y sus movimientos; al tiempo que las imágenes se actualizaban automáticamente. Hoy en día, este sistema se mejora permanentemente recurriendo a técnicas de “realidad virtual” con inmersión del usuario en el mundo virtual.

La visualización con materiales y luces requirió de equipos personales más rápidos, con gran capacidad de memoria volátil y de almacenamiento, y ello aparece para el gran público aunque con un mínimo de calidad, a finales de la década de los ochenta. Hace apenas unos años, la realización de un video tenía que ser realizado en estaciones de trabajo. Por ejemplo, en la reconstrucción virtual de la Frauenkirche de Dresden¹², realizada al principio de los noventa, la elaboración del modelo y del video que dura 3 min 35 seg requirió de 9000 horas máquina con principalmente cuatro y después ocho estaciones de trabajo IBM RISC 6000 interconectadas por red. El costo fue sumamente elevado y la realización se debe al hecho que IBM la tomó como una inversión publicitaria de prestigio. Aunque con una calidad inferior y para modelos de tamaño limitado, es actualmente factible realizar una animación con una computadora personal.

La maqueta vs la perspectiva

El arquitecto encuentra en el dibujo de perspectivas un acercamiento a la visión del espacio. Igualmente, durante el proceso creativo o para representaciones finales, recurre a maquetas para ver o mostrar la integración volumétrica y la iluminación, buscando así tener una percepción más fiel del objeto.

¹¹ El tiempo real en cómputo significa que el usuario obtiene una respuesta de la computadora a su solicitud, que sus sentidos perciben como inmediata. Por ejemplo, en el caso de un recorrido dentro de una arquitectura, las vistas se actualizan inmediatamente, siguiendo el movimiento indicado mediante algún periférico como el ratón. Para obtener esta respuesta, la computadora tiene que ejecutar los cálculos necesarios en forma muy rápida.

¹² Monumento histórico de Dresden.

La perspectiva plasma en papel la visión del espacio. Como búsqueda de visualización es más cercana a la realidad que el sistema de proyección ortogonal, pero no deja de ser una convención de representación en un plano, *i.e.*, ofrece una forma de percepción plana de un volumen lo cual tiene muchas limitantes. Cuando una imagen representa un elemento bidimensional se tiene en ésta toda la representación del objeto, como sería el caso de la fotografía de una acuarela. Sin embargo, a partir del momento que en una imagen se plasma un objeto tridimensional, se describe solamente la parte visible de éste. Por ejemplo, si la acuarela representa un edificio, solamente se conoce la parte representada y no sus partes ocultas.

Al contrario, la maqueta presenta una descripción completa de la volumetría. El observador puede moverse alrededor para observarla desde distintos puntos de vista. Zevi (1959), en su búsqueda de nuevas formas de representación de la arquitectura para mostrar su componente espacial, reconoce las ventajas de la maqueta en relación con los dibujos, sin embargo recalca su deficiencia porque necesariamente falsifica la proporción entre el hombre y el edificio.

La maqueta física vs la maqueta virtual

El modelo tridimensional computarizado es en este sentido parecido a una maqueta, sin embargo supera sus alcances en múltiples formas, *v. gr.*,

- El realismo obtenido a partir de un modelo virtual es mayor al logrado mediante una maqueta, gracias a la integración de la definición de los acabados, a la simulación del comportamiento de la luz y a la incorporación de los ambientes naturales como son los paisajes. En el caso de un proyecto, es factible explorar varias soluciones en la búsqueda del ambiente adecuado, si se cambian materiales y colores además de la ubicación de las luces artificiales.
- El modelo virtual permite la realización de simulaciones como por ejemplo, el fenómeno de iluminación. La iluminación natural o artificial y los acabados son componentes

fundamentales para la definición del objeto arquitectónico y en ese sentido, la representación arquitectónica tradicional es muy limitada para describirlos.

- En la maqueta virtual se pueden hacer animaciones tales como recorridos internos o simulaciones de iluminación solar y grabarlas en video, esto aporta una información mayor a la de una simple imagen. El video mejora mucho la fotografía, la cual se queda como *phrase détachée d'un poème symphonique ou d'un discours poétique dont la valeur essentielle est celle de l'ensemble.* (Zevi, 1959)
- En la maqueta, el observador siempre ve el objeto desde afuera y no está inmerso en el espacio, mientras que en la maqueta virtual, el usuario puede obtener vistas de interiores y recorrer los espacios.
- La extensión del modelo a la realidad virtual con inmersión del usuario mediante casco y guantes, ofrece sin duda una forma más completa para experimentar el espacio arquitectónico. No solamente le permite interactuar con el mundo virtual, ofreciéndole la cuarta dimensión, la del tiempo, sino que además añade a su expresión física involucrando su propio movimiento corporal para explorar la arquitectura. La inmersión mediante casco elimina el intermediarismo de la pantalla y ubica en el mundo digital aislando del exterior, con lo cual se reabre un mayor espectro sensorial de percepción del espacio virtual. De espectador pasivo se pasa a una dinámica generando su propia experimentación, inmerso en el modelo tridimensional. *C'est l'homme qui, se déplaçant dans l'édifice, le regardant sous des points de vue successifs, crée lui-même, pour ainsi dire, la quatrième dimension, et donne à l'espace sa réalité intégrale.* (Zevi, op. cit.)

Síntesis de imágenes

Para llegar a visualizar los modelos arquitectónicos, intervienen varias fases de trabajo.

(Figura 3)

Existe una primera etapa de descripción de los objetos, *i.e.*, la construcción de su volumen, de su forma, tamaño y también la definición de su apariencia, color, acabado y textura.

En una segunda fase es necesario describir las condiciones en las cuales se encuentra el objeto; esto incluye la iluminación y las condiciones ambientales.

Para poder ver los objetos, es también necesario indicar cómo se está viendo la escena, dónde está ubicado el observador. En caso de simular el uso de una cámara, para ello, se puede precisar el tipo de lente empleado, la distancia focal etc.

Finalmente, se ordena el cálculo de la imagen después de especificar algunos parámetros donde generalmente quedan involucrados factores que influyen sobre la calidad del resultado y la velocidad del proceso. El resultado es también una función de la forma de cálculo implementado en el programa utilizado, pues el *render* puede ser ejecutado con distintos algoritmos. Aun cuando los más antiguos dan resultados más primitivos, su uso sigue muy generalizado por la simplicidad de proceso y economía. Esta área ha conocido logros importantes en la década de los 80 al culminarse el fuerte avance de los 70 sobre modelos de iluminación, desde entonces las mejoras han sido secundarias (Watt, 1998).

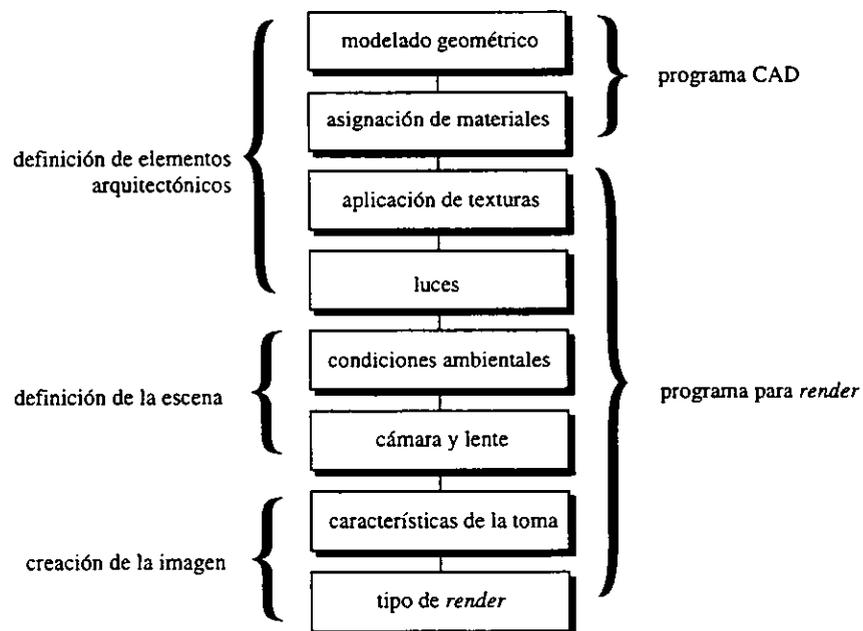


Figura 3. Esquema de los procesos para obtener una imagen con fotorrealismo.

Las formas de visualizar incorporan desde la generación de imágenes fijas y su encadenamiento para obtener una animación, hasta la inmersión mediante la realidad virtual.

La maqueta virtual, modelar en tres dimensiones

Además de proporcionar herramientas para el dibujo técnico bidimensional, la mayoría de los programas de CAD permiten una definición tridimensional de los objetos. En vez de representar un muro con una línea, éste se puede representar mediante un plano; al verlo desde arriba, simula una línea que sin embargo, al cambiar la ubicación del ojo virtual pone en evidencia su carácter espacial. La elaboración de una maqueta virtual de los proyectos arquitectónicos tiene generalmente como objetivo dar argumentos de presentación para que un cliente entienda el diseño del arquitecto; se vuelve así, un instrumento de venta. Sin embargo mucho más retributivo a la arquitectura es la alternativa que ofrece de visualizar directamente en el espacio el objeto que se está creando, el cual es susceptible de modificarse; así se puede trabajar desde adentro hasta llegar a la calidad deseada. Es entonces cuando la herramienta de cómputo se vuelve realmente un instrumento de diseño y aporta en el proceso creativo.

Tener el modelado tridimensional de un edificio implica haber resuelto toda su volumetría. Los conflictos tridimensionales que a veces aparecen en los proyectos por la mala visualización mental y lo parcial del sistema de representaciones de proyecciones, son inmediatamente evidentes. Después de definir el proyecto en su volumetría, los planos necesarios para la construcción es posible generarlos en forma más o menos automatizada. En vez de que los planos sean, como se acostumbra, la principal herramienta de apoyo a la creatividad, se vuelven únicamente una forma de transmitir la idea del proyecto cuando ha finalizado el proceso creativo.

Los objetos tridimensionales están contruidos en un modelo de coordenadas cartesianas que proporcionan el sistema de referencia para marcar tamaños e indicar distancias. Para modelar en tres dimensiones existen varias técnicas; se puede elaborar un modelo dando las medidas de los objetos y construyéndolo a partir de la nada, ésta es la técnica empleada para proyectos

nuevos; o por otro lado, se puede reconstruir una volumetría a partir de fotografías y técnicas fotogramétricas si se necesita el levantamiento de un objeto existente.

Levantamiento de edificios

La fotogrametría

La fotogrametría data de 1852, fue utilizada en un principio para obtener levantamientos precisos en un plano. Sin embargo, su asociación con el cómputo surge a partir de 1970 donde se empieza a emplearla para la obtención directa de modelos tridimensionales. La fotogrametría consiste básicamente en el uso de una cámara especial que toma dos fotografías separadas por una cierta distancia, con la finalidad de obtener una vista estereoscópica del objeto. El sistema es sencillo para el usuario, pero esconde toda una serie de requerimientos sobre la cámara y cálculos matemáticos pesados para asociar coordenadas tridimensionales a elementos ubicados en las fotografías. Si existen sobre el elemento que se mide puntos que se pueden ubicar fácilmente, el usuario los indica directamente en ambas fotografías. De lo contrario se requiere de un “estereorestituidor” de las imágenes, el cual reconstruye la visión estereoscópica a partir de ambas fotografías y permite la ubicación de puntos en el espacio. El levantamiento fotogramétrico llega a ser muy preciso y presenta una serie de ventajas ligadas al uso del sistema fotográfico (Drap, 1997):

- La fotografía proporciona una descripción completa del objeto, generalmente con más información que la utilizada para un levantamiento.
- Esta información queda registrada y puede ser recuperada más adelante en la medida que se requiera, aun si el objeto desaparece.
- Al no ser necesario un contacto con el objeto, es factible obtener el levantamiento de objetos delicados, en movimiento o efímeros.

Procesamiento de imágenes

Una forma menos costosa desarrollada a partir de los años 70 está basada en el uso de cámaras económicas y *software*, por lo tanto, no se requiere de restituidor ni de equipo especializado. Retoma el principio de la fotogrametría y consiste en utilizar imágenes digitales de fotografías tomadas con cualquier cámara. El programa calcula la ubicación de la cámara y el tipo de lente y posteriormente procesa la imagen extrayendo una información mínima para realizar el modelado tridimensional. Por ejemplo, se puede proporcionar la altura de la cámara y la orientación de los ejes X,Y,Z, fácilmente conocidos en la esquina de un edificio. Solamente en caso de que el objeto sea curvo se requiere de la ubicación de puntos de referencia antes de tomar la fotografía.

Varias fotografías pueden ser utilizadas para las partes con mayor detalles o para obtener la volumetría de todo un edificio. En este caso, solamente se requiere indicar al programa cuáles son los puntos compartidos por las distintas fotografías.

El sistema tiene la ventaja de requerir de poco equipamiento, sin embargo, no tiene la precisión de un levantamiento fotogramétrico o manual. Se puede esperar un gran desarrollo de estas metodologías en el futuro. En realidad virtual, donde la precisión del levantamiento puede ser sacrificada para ganar velocidad en el modelado, se observa una tendencia hacia el uso de métodos distintos donde, más que reconstruir en 3D, el espacio se simula tomando la información contenida en imágenes. Para ello las técnicas empleadas se relacionan en mayor medida con las de procesamiento de imágenes digitales que con las de técnicas tridimensionales.

Barrido de láser

Igualmente recientes son los digitalizadores de volumetrías. Para ubicar espacialmente un punto, se lanza un rayo láser y se calcula la distancia al objeto basándose en el tiempo que tarda en percibirse la luz reflejada. Mediante este principio, algunos equipos reproducen el sistema de teodolito tradicional de los levantamientos topográficos, en tanto otros efectúan un barrido sobre fachadas. En ambos casos, las coordenadas encontradas quedan directamente registradas en la

computadora y sirven como referencia para definir las superficies con mallas. La precisión así lograda es muy alta pero igualmente lo son los precios de los equipos.

Las volumetrías quedan especificadas por su piel exterior, y se utilizan polígonos que yuxtapuestos en el espacio conforman el volumen. Dentro de estas consideraciones, un cubo estaría compuesto por seis cuadrados.

Digitalización 3D

Inadecuada para la arquitectura y usada principalmente para la captura de la volumetría de piezas de pequeño tamaño, consiste en apuntar con un lápiz óptico puntos sobre el objeto. Automáticamente la referencia es tomada como la coordenada del vértice de una malla.

Construcción de volumetrías

Las siguientes son las herramientas más comunes para definir la volumetría de un objeto:

Estructura de alambre

La técnica conocida como de alambre consiste en utilizar líneas y puntos para marcar las aristas y vértices de los objetos. Es útil cuando se requieren análisis de elementos finitos pero sin interés en síntesis de imágenes pues los objetos se transparentan totalmente.

Por polígono

El modelado por polígonos se realiza manualmente y para ello se indican cada una de las coordenadas de sus vértices. Sin embargo, existen otras técnicas que pueden, según las circunstancias, resultar más rápidas. Generalmente, la forma de trabajo consiste en ir mezclando todas las técnicas.

Una de las herramientas más sencillas para modelar en tres dimensiones es aquella donde se lleva a cabo la extrusión de una figura según un eje, del mismo modo como se efectúa en una pieza de aluminio. De esta forma, un cuadrado se vuelve un paralelepípedo. Adicionalmente la

extrusión puede ser completada con un cambio de escala entre el objeto inicial y el final, una rotación, o el eje puede ser una línea compleja (Figura 4).

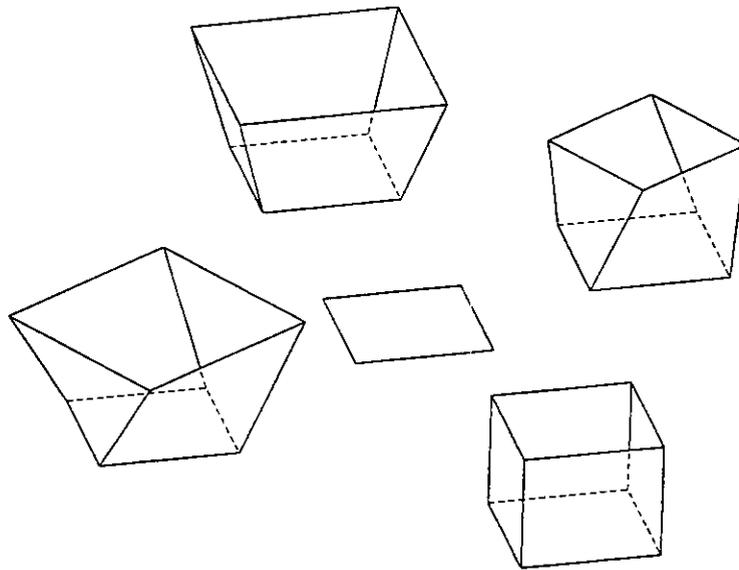


Figura 4. Modelado de volúmenes con la extrusión de un cuadrado.

Otra herramienta para definir un objeto tridimensional consiste en la rotación de un perfil alrededor de un eje con objeto de generar superficies de revolución. Como en el caso anterior, en el transcurso de la revolución del perfil inicial, éste puede estar sujeto a cambios de rotación y escala.

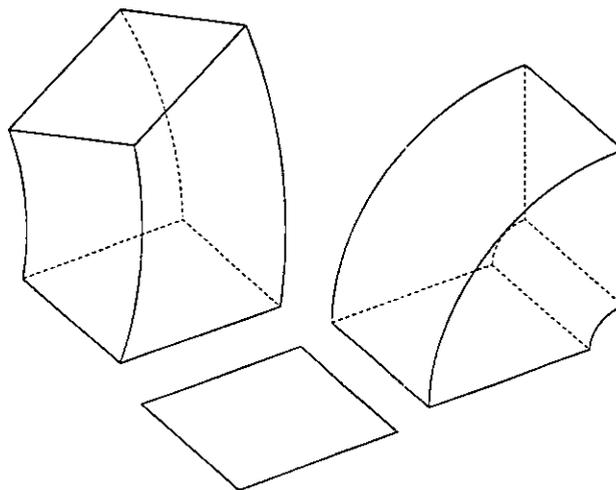


Figura 5. Modelado de volúmenes a partir de la revolución de un cuadrado.

En la Figura 5 el volumen de la derecha es generado con la rotación del cuadrado en relación con un eje ubicado en el mismo plano y paralelo a uno de los lados; mientras que el eje de rotación utilizado para el modelado izquierdo no está en el mismo plano, ni tampoco es paralelo a los lados del cuadrado.

Una forma alterna de definición por polígonos desarrollada para la industria del automóvil y aérea posibilita la generación de superficies con curvaturas complejas. Su definición más avanzada es conocida como superficies NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*), los cuales permiten formas libres con puntos de control en cada punto de la superficie.

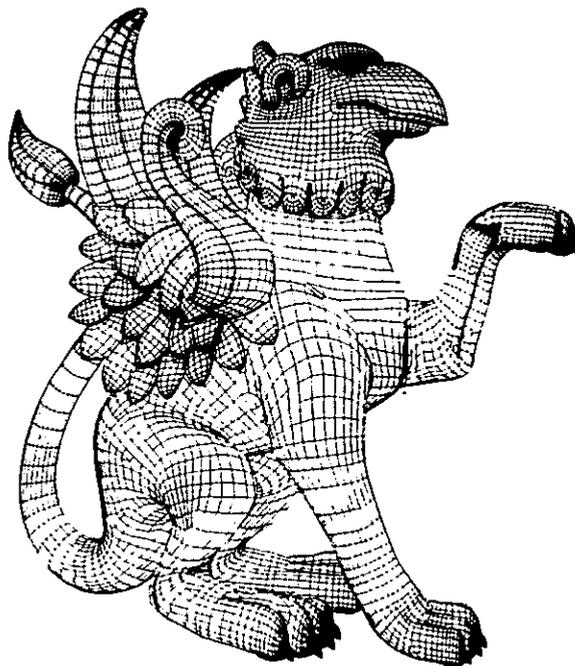


Figura 6. Modelado con malla. (Catálogo de Viewpoint DataLabs)

Las mallas sirven para definir formas complejas cuyos vértices pueden ser estirados, deformando la figura original. Por ejemplo, sería poco práctico modelar un cuerpo humano con técnicas de extrusión, superficies de revolución o sólidos. Sin embargo con una retícula de polígonos, más o menos grandes según las variaciones en las curvaturas, sí es posible definir su volumetría (Figura 6).

Por sólidos

Adicionalmente, es posible modelar utilizando primitivas sólidas como cubos, esferas, cilindros y combinarlas mediante las operaciones de unión, intersección y sustracción, llamadas también operaciones lógicas o booleanas, las cuales para construir volumetrías más complejas. Por ejemplo, un agujero cilíndrico en un cubo se obtiene con una resta de los dos elementos (Figura 7). Sería muy difícil lograr este resultado mediante polígonos y resultaría imposible con extrusión o superficies de revolución.

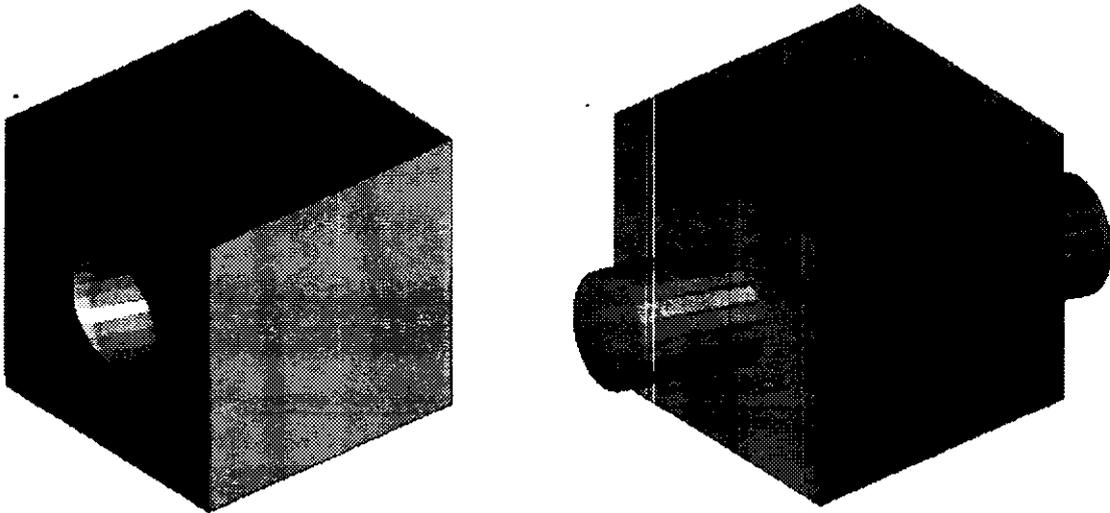


Figura 7. Modelado con operaciones booleanas de intersección y de unión de un cubo con un cilindro.

Una ventaja de la definición por sólidos consiste en poder calcular momentos de inercia y, si se especifican los materiales, hacer estimaciones sobre el peso de los objetos, esto aporta una definición geométrica particularmente útil en ingeniería. Sin embargo, para la transferencia de un modelo a un programa de visualización se requiere generalmente que la volumetría definida a base de sólidos quede convertida en polígonos.

Modelado de objetos complejos

Para modelar objetos complejos como plantas, personas, nubes, para mencionar algunos, otras formas de definición han sido desarrolladas, pero no se encuentran en los paquetes de CAD. Las más comunes son (Couwenbergh, 1998):

- Los *metaballs*, son esferas con propiedades. Actúan como gotas de mercurio y fueron creadas para representar moléculas, no obstante, se usan también para cuerpos humanos o de animales.
- Los fractales y graftales. El mismo motivo se repite con cambios en rotación y escala. Son formas irregulares que pueden ser definidas matemáticamente. Mediante esta técnica, se modelan árboles, montañas y paisajes.
- Las partículas. Son partículas a las cuales se asocian particularidades físicas como velocidad, luminosidad y factores aleatorios. Permiten la representación de humo, nubes o de elementos abstractos como contaminantes; resultan sumamente útiles en visualización científica cuando se requiere la simulación de fenómenos físicos.

La apariencia de los objetos

Las volumetrías construidas en CAD, son inicialmente visibles como esqueletos, como si fueran realizadas con estructura de alambre, *i.e.*, se ven solamente las aristas y vértices de las entidades. Además de mostrar una representación plana, abstracta, de objetos como si fueran transparentes, esta vista puede llegar a ser muy engañosa, como en la Figura 8 donde difícilmente se entiende cual es la parte superior, inferior, delantera o trasera de los objetos.

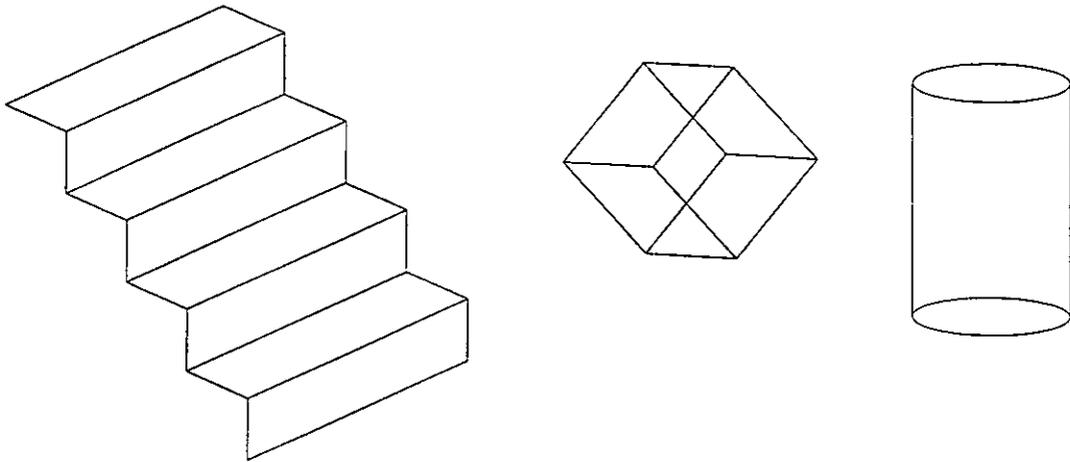


Figura 8. Figuras vistas como estructura de alambre.

La percepción de la volumetría se mejora si se pide ver solamente las aristas realmente visibles con objeto de que aquellas que quedan ocultas por los objetos no aparezcan (Figura 9). Si el modelado no fue construido como estructura de alambre, esto sería un primer paso para aumentar su percepción y entender su volumetría.

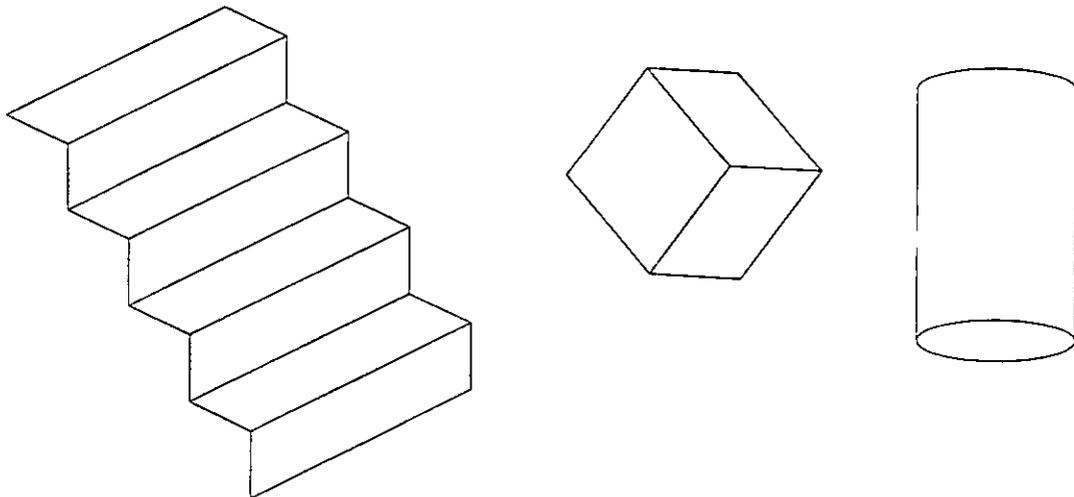


Figura 9. Figuras con el cálculo de las aristas visibles.

Adicionalmente es necesario dar “materialidad” a las superficies si se requiere una visión de los volúmenes y para que una esfera se pueda diferenciar de un círculo. En el caso de

representar una escena completa como un ambiente arquitectónico, deberá existir un cálculo de iluminación el cual solamente es visible si los volúmenes están representados con realismo.

La forma más sencilla consiste en colorear las superficies asignando al polígono un color uniforme y ciertas características de comportamiento en respuesta a la luz, como serían la transparencia o el brillo. Al pedir el cálculo de las imágenes con sombreado, los resaltan con mayor presencia. Si se está modelando una molécula u objetos de color uniforme el resultado puede ser adecuado; sin embargo para reproducir con realismo la mayoría de los materiales es necesario mostrar también sus irregularidades y dibujos de superficie como sería en los casos del mármol y la madera que tienen una serie de vetas muy características.

Los programas de cómputo incorporan varias técnicas para aplicar texturas:

- En la primera, la textura está representada en un archivo gráfico y proviene de una digitalización o de un dibujo; así, se dan indicaciones de como “pegar” este dibujo sobre una superficie o mejor dicho como “mapear” la textura. Se trata de la proyección de un elemento bidimensional sobre un objeto tridimensional.
- La segunda técnica consiste en el desarrollo de texturas “programadas” como rutinas, además, permite una definición de aquéllas como totalmente tridimensionales y no “pegadas” sobre un volumen, como en el caso anterior.
- La tercera reside en “pintar” directamente sobre el objeto. Es una técnica relativamente reciente que incluye no solamente la posibilidad de aplicar colores sino también transparencia y relieves.

En principio, según las necesidades, conviene recurrir a una u otra pero pocos programas incorporan la segunda y la tercera se encuentra solamente en los programas dedicados a este fin. Evidentemente, la primera o “mapeo” de textura, al no requerir de programación es muy directa y sencilla, mientras que la segunda se utiliza solamente en el caso de texturas que puedan tener una abstracción matemática programable. Si la textura consiste en la reproducción de un cuadro, evidentemente se usará un “mapeo” de textura; carecería de sentido intentar representar a la Gioconda con una programación.

Para un objeto de madera, el “mapeo” proporciona un efecto de chapa de madera, es decir, se pierde el desarrollo volumétrico de la madera que resulta en diseños muy distintos para los cortes en el sentido de la veta y aquéllos transversales a ésta. Con texturas tridimensionales programadas, es factible reproducir el sentido tridimensional de una textura, modelar nubes y generar efectos de “marmoleados” (Figura 10). Adicionalmente, sin cambiar el programa y solamente variando parámetros tales como colores, brillo y densidad de un dibujo, la misma rutina ofrece múltiples resultados posibles.

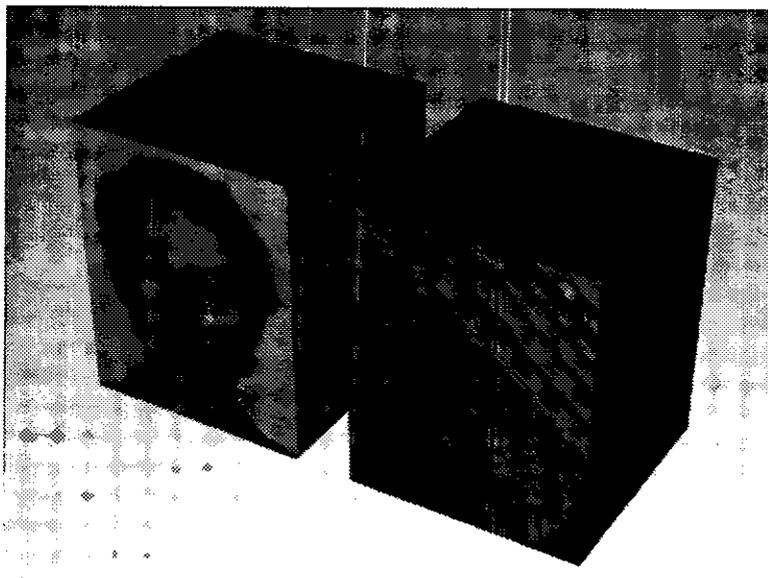


Figura 10. Mapeo de textura y textura tridimensional.

En el caso de superficies con relieves, como por ejemplo un acabado de tirol, es imposible modelar estas irregularidades como tampoco se pueden representar adecuadamente con una textura pegada como en el caso anterior, si se considera que la apariencia cambia en relación con la orientación de la luz que recibe, generando sombras más o menos pronunciadas. Para resolver este problema se han desarrollado técnicas conocidas como *bump mapping* o su forma mejorada *displacement mapping*.

Éstas recurren a una fotografía de tonos de grises de las irregularidades para modificar la orientación de la superficie y por consecuencia lograr respuestas distintas según la orientación de

la fuente de iluminación (Figura 11). En este caso, el tono de gris de la imagen izquierda no representa ni el color ni un sombreado del bajorelieve, sino el grado de profundidad de la superficie; el negro corresponde a las superficies más profundas mientras que el blanco a aquellas más exteriores y en forma proporcional los distintos tonos de grises. Cuando se calcula la imagen resultante (imagen de la derecha) de la iluminación sobre el bajorelieve, se utiliza la imagen inicial para extraer la información relativa a su volumetría del objeto y calcular su apariencia.

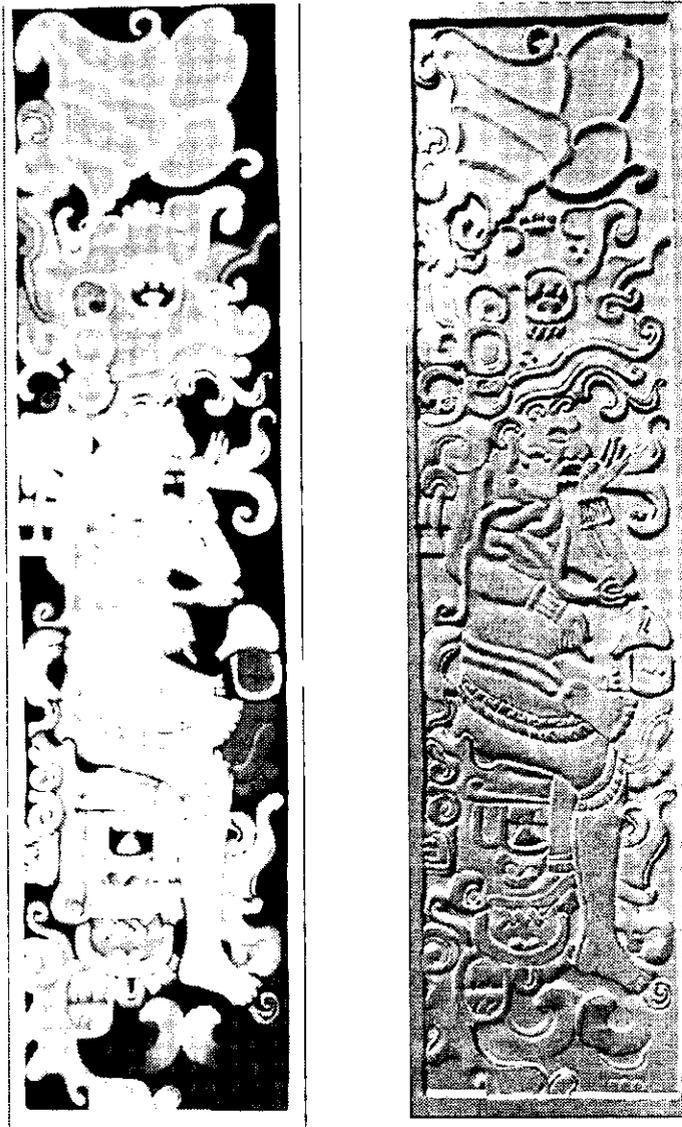


Figura 11. Modelado de un bajorelieve "restituido" de Cacaxtla con la técnica de displacement mapping. Del lado izquierdo la imagen usada para el mapeo de profundidades y del lado derecho la imagen obtenida después de un render.

Una característica importante en la definición de los materiales radica en la reproducción del comportamiento del acabado en relación con la luz. Esto permite distinguir si, por ejemplo, una superficie de madera es lisa o rugosa, si ha recibido una capa de barniz mate, brillante, una capa de cera o si es natural. En todos estos casos, es la misma madera, los mismos colores, las mismas vetas pero según el acabado, cambia la respuesta de la superficie al impacto de la luz (Figura 12).

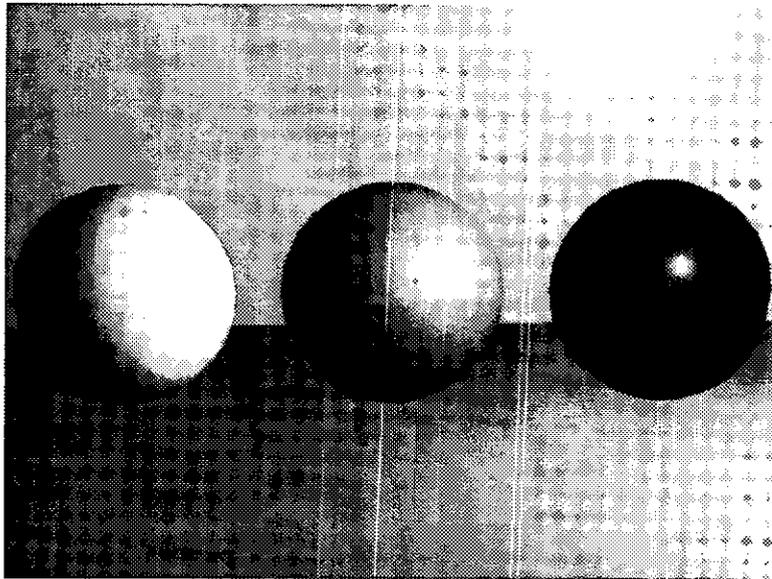


Figura 12. Esferas con acabados mate, semimate (plástico) y brillante (metal).

Como se puede observar en esta figura, la simulación del grado de brillo no es totalmente convincente. En el caso de la esfera brillante, la de la derecha, para que llegará a ser percibida como tal, haría falta incluirle los elementos del entorno reflejados en ella. En el caso de la esfera mate, del lado izquierdo, se observa una saturación en la iluminación, la cual elimina parte del degradado de grises.

Las principales características de comportamiento de un material en relación a la luz son: la transparencia, el brillo, la rugosidad, la reflexión y la “radiance”. Esta última se define como la luz emitida por la superficie, independientemente de toda fuente de luz.

Visualización

Una vez definidas la formas, el tamaño, la ubicación y la apariencia de los objetos, es indispensable describir las condiciones de iluminación de las escenas con objeto de percibir cómo se está viendo, es decir cuáles son las características de la vista o de la cámara. De la misma forma que en el mundo real, sin luz no hay color ni volumetría; en el mundo virtual, de igual manera, la luz permite percibir los objetos. El resultado de la iluminación depende de tres factores: el tipo de luz definido en el programa, la respuesta de los materiales y sobre todo de los algoritmos de iluminación.

Iluminar una escena

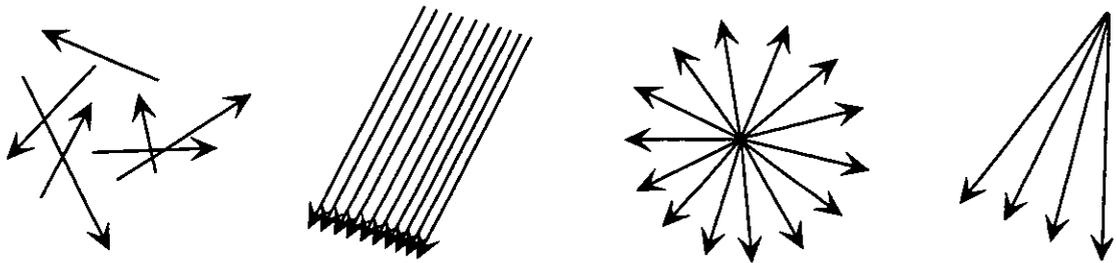


Figura 13. Tipos básicos de luces, luz global, dirigida, de tipo foco y de tipo spot.

Las luces básicas instaladas en los programas son: la luz global, fuentes de luz dirigidas, de tipo foco y spot. Son luces abstractas poco relacionadas con fuentes reales de iluminación. La primera, la luz global o ambiental, es aquella que ilumina todas las superficies con la misma intensidad por el hecho de no tener ni origen ni dirección. La luz dirigida o distante, es definida con rayos paralelos, tiene dirección pero no tiene punto de emisión; y se emplea para simular el sol pues por la distancia se relaciona más con este tipo de iluminación que con la correspondiente a una luz de tipo puntual. La luz de tipo foco o puntual irradia en todas las direcciones a partir de un punto de emisión. Finalmente, la luz de tipo spot parte de un origen y se emite como cono de luz (Figura 13).

Todas se caracterizan por un color y una intensidad y, salvo la luz global, pueden presentar una pérdida de intensidad con la distancia. El control del color de la iluminación es fundamental. Tanto la luz artificial como la luz natural poseen colores que generan calidad. La luz de medio día es blanca, mientras que la luz del atardecer es anaranjada. Adicionalmente, el color de la luz cambia de un sitio geográfico a otro, y esto es un fenómeno que se debe tomar en cuenta cuando se desea obtener un mayor realismo; ha sido percibido por los pintores de paisajes naturales o urbanos.

Algunos programas incluyen también luces cuya fuente de emisión no es solamente puntual sino que puede ser de tipo lineal o de superficie.

De hecho, los programas enfocados hacia la representación realista de las fuentes de iluminación integran características directamente relacionadas con los tipos de luz comerciales incluyendo su apariencia física (de tipo puntual, lineal o de superficie), sus características fotométricas (intensidad, color, distribución de la luz) y si son incandescentes o fluorescentes. Toman en cuenta también, la necesidad del arquitecto de modelar con precisión la iluminación real y de visualizar los ambientes creados.

Los modelos de iluminación

Además de modelar las fuentes de iluminación, es necesario especificar también la propagación de la luz en una escena tridimensional y su comportamiento sobre una superficie. Para este propósito se han desarrollado los algoritmos agrupados para el concepto de modelos de iluminación

En la síntesis de imágenes, los modelos de iluminación tienen un historial más reciente que las herramientas de modelado y continúan como temas de investigación por parte de los desarrolladores. El objetivo es la obtención de mayor realismo, al reducir el tiempo de cómputo involucrado para el cálculo de una imagen, que actualmente es alto.

Iluminación local

Los algoritmos primitivos de iluminación a partir de escenas tridimensionales, como los de Lambert, Gouraud y Phong son conocidos como de iluminación local. Calculan la iluminación de un objeto a partir de la ubicación de las diferentes fuentes de luz, pero desconociendo la interacción luminosa entre los objetos (Figura 14). Sin la intervención de otras técnicas, estos algoritmos no calculan la proyección de sombras, la transparencia de objetos, o los reflejos de tipo espejo presentes en elementos brillantes como el agua, el metal, etcétera. Esta forma de cálculo se encuentra mejorada por los algoritmos clasificados como de iluminación global donde los objetos ya no son tomados como elementos aislados, fuera de contexto.

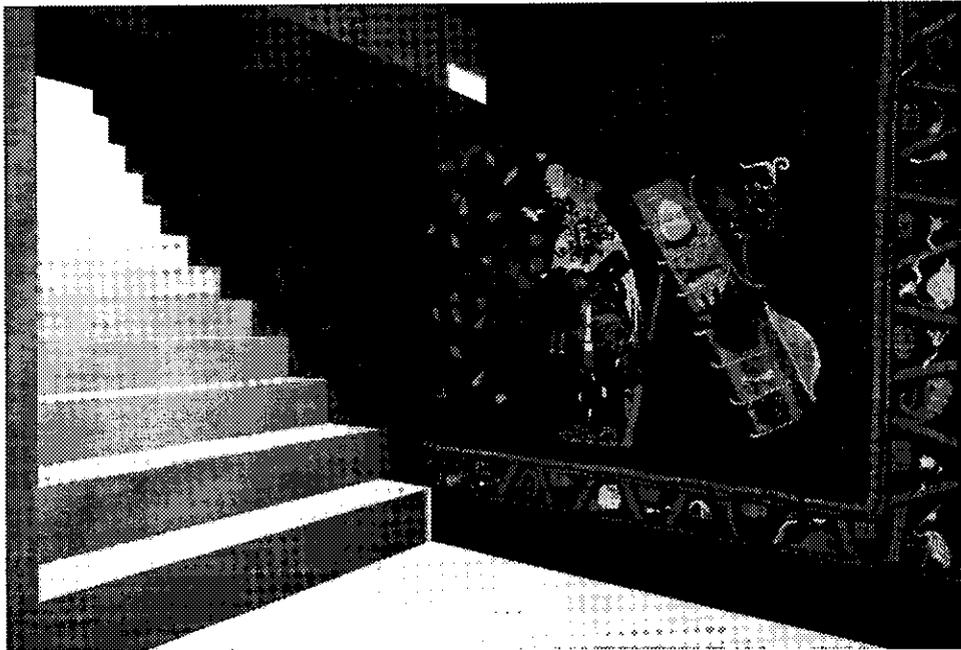


Figura 14. Cacaxtla, Templo Rojo. Cálculo con iluminación local. (Imagen temporal de estudio que no corresponde con la solución final propuesta en la reconstrucción digital)

Algoritmo de Phong

```
{ Para cada polígono hacer
  calcular la normal al polígono;
  Para cada vértice  $x$  de un polígono hacer
    calcular una normal tomando el promedio de las normales
    de las caras incidentes al vértice  $x$ ;
  Para cada punto perteneciente a una arista  $[N_0, N_1]$  hacer
    calcular una normal interpolando en forma lineal las
    normales en  $N_0$  y  $N_1$ ;
  Para cada punto  $x$  interior del polígono hacer
    calcular la normal interpolando en forma lineal las
    normales a los vértices del polígono, ubicados a la
    derecha del barrido que contiene  $x$ ;
  Para cada vértice interior hacer
    calcular la intensidad utilizando la ley de Lambert;
}
```

Iluminación global

Ray Tracing. El primer algoritmo de iluminación global instalado en forma extendida en los programas fue el de *Ray Tracing* (trazado de rayos), éste simula en camino inverso el recorrido de la luz. Se lanza un rayo luminoso a partir del ojo del observador a través del pixel del monitor y se busca a qué superficie de la volumetría del objeto corresponde. Una vez localizado, se lanza el rayo entre este punto de la superficie y cada una de las fuentes de iluminación; si no existe otro objeto entre ambos, significa que la fuente de luz participa de la iluminación del objeto y se calcula en qué medida. En caso contrario, se entiende que el objeto no está iluminado por esta fuente. Cuando el material esté definido con brillo o transparencia, se busca la parte del objeto que refleja o transparenta. Este último punto debe ser calculado también para conocer su grado de iluminación y saber cuál será el valor del pixel correspondiente a la superficie del objeto. Los cálculos se vuelven rápidamente complejos.

Las imágenes obtenidas con esta técnica muestran sombras y reflejos y se mejoran en forma sustancial los resultados en comparación con los obtenidos con las técnicas previamente descritas aunque al costo de un tiempo de cálculo mucho mayor. Sin embargo, no consideran que los objetos iluminados se vuelven a su vez una fuente de luz, que la luz al rebotar de una superficie a la otra se va cargando de color, y que la sombra misma puede tener color. Con *ray tracing*, si una superficie no recibe luz directamente desde una fuente luminosa, se queda

totalmente en la oscuridad, aun si se encuentra cerca de superficies muy iluminadas. Para paliar este problema se recurre a la definición de una luz ambiental, ésta ilumina todas las superficies en forma homogénea y de ninguna manera corresponde a una realidad física. Por la calidad de las imágenes que produce, el *ray tracing* es el algoritmo instalado en los programas utilizados para hacer animaciones cinematográficas profesionales. Ofrece grandes posibilidades para los creadores, pero raramente es empleada para una simulación de la luz correspondiente a su comportamiento real.

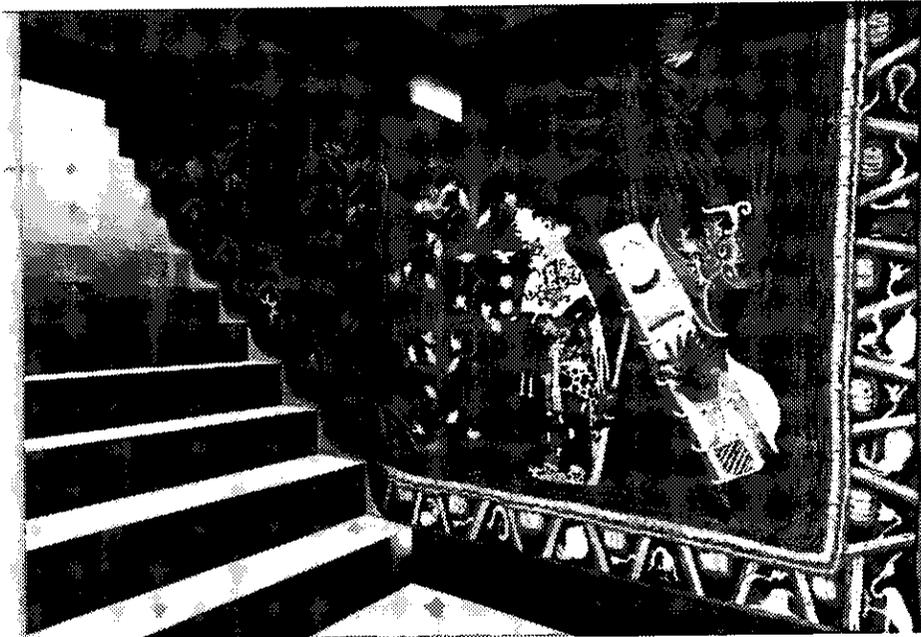


Figura 15. Cacaxtla, Templo Rojo. Cálculo con ray tracing. (Imagen temporal de estudio que no corresponde con la solución final propuesta en la reconstrucción digital)

Algoritmo simplificado de *ray tracing*

```
{
  para cada uno de los pixeles del monitor hacer
    definir el rayo primario ojo-pixel;
    para cada objeto hacer
      {
        buscar las intersecciones;
        tomar la más cercana;
        lanzar rayos en dirección de las fuentes de luz;
        calcular la iluminación del punto de intersección;
        asignar el color del pixel;
      }
}
```

Radiosidad. El segundo algoritmo de iluminación global es conocido como de “radiosidad”. Su lógica es completamente distinta. En vez de calcular una imagen pixel por pixel como en el caso anterior, realiza una estimación completa de toda la escena, incluyendo las partes no visibles de los objetos porque éstas pueden influir en el resultado. Se toma en cuenta el hecho que una superficie iluminada se vuelve a su vez una fuente de iluminación. De esta manera, la luz rebota en todas partes, en todas las direcciones y adquiere colores. Una superficie blanca al lado de una roja, adquiere tonos rosados. La radiosidad muestra también sombras en las sombras *i.e.*, tonalidades de sombras, sombras más o menos iluminadas. Sin embargo, es muy deficiente para el cálculo de los reflejos especulares. Dado que el cálculo no depende de la ubicación del ojo y es efectuado sobre todo el conjunto, es posible modificar la ubicación del observador sin volver a realizar todos los cálculos.

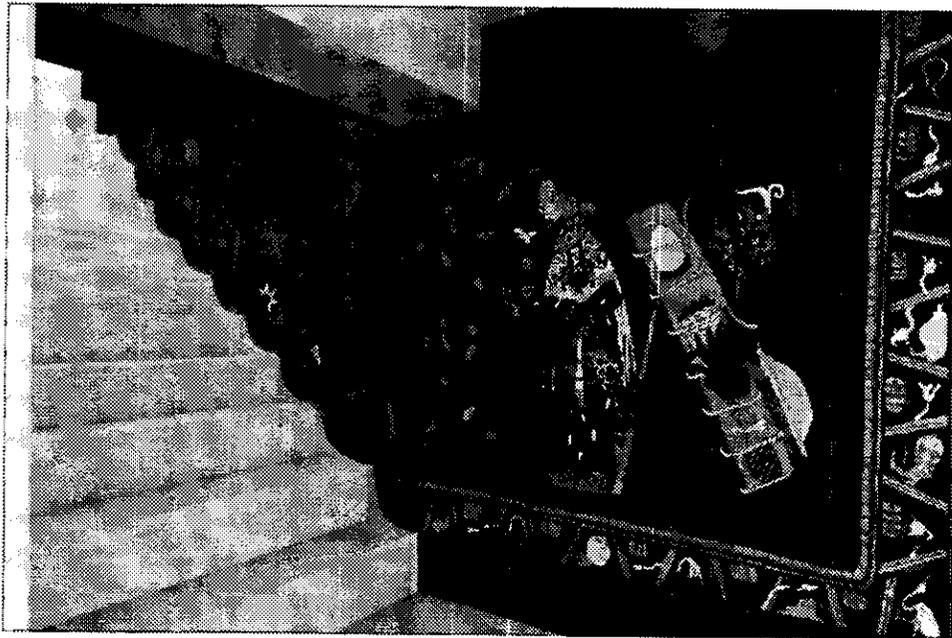


Figura 16. Cacaxtla, Templo Rojo. Cálculo con radiosidad. (Imagen temporal de estudio que no corresponde con la solución final propuesta en la reconstrucción digital)

Esta metodología resulta particularmente interesante cuando se requiere de realizar animaciones como recorridos en construcciones. El realismo de la simulación de luz obtenido en

ambientes con materiales mate hace que la radiosidad sea en la actualidad, el mejor algoritmo para la visualización de espacios arquitectónicos, sin embargo se encuentra instalada en pocos programas comerciales y, por la complejidad de los cálculos involucrados, no se usa para modelos muy grandes. Adicionalmente, la radiosidad en ambientes abiertos no está resuelta y sigue siendo un tema de investigación. (Lucet, 1998)

Las cualidades de *ray tracing* y radiosidad son complementarias y una tendencia consiste en aplicar en forma conjunta los dos algoritmos para obtener así tanto el cálculo de luz especular como el de luz difusa. Las imágenes obtenidas mejoran sustancialmente pero el tiempo de cálculo es largo, por ello, este método es aplicable solamente para obtener imágenes fijas.

Diseño de la iluminación

Cuando se diseña una iluminación para animación cinematográfica, sin simulación de iluminación real, se busca generalmente obtener los siguientes efectos: una puesta en valor de los volúmenes y los relieves, un contraste adecuado, equilibrio entre la parte iluminada y la sombra, acento sobre puntos claves para atraer la atención y la creación de un ambiente idóneo.

De los “trucos” de iluminación usados, destaca la iluminación con tres fuentes, ésta consiste en una luz principal, la más fuerte de todas para poner el acento en un punto específico, además es aquella que genera sombra. La luz secundaria queda ubicada atrás del objeto para destacarlo del fondo y dar profundidad a la escena. Una tercera luz de relleno está ubicada generalmente cerca de la cámara para rellenar las partes existentes en la sombra y disminuir un poco los contrastes. Sin embargo, en muchos casos el uso de más luces es necesario y el diseño de iluminación se vuelve un paso muy complejo.

Como se observa en la Figura 17, para mostrar una volumetría se cae fácilmente en un sistema de iluminación muy lejano de un sistema natural. En este caso las columnas tienen una fuente de luz con una orientación distinta al techo y el monumento aparece de forma tal que parece un objeto, más bien una pieza en una museografía, y no como una construcción

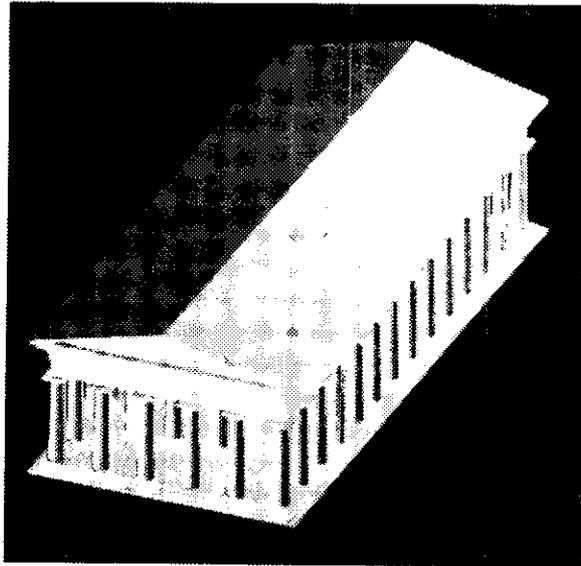


Figura 17. Iluminación escenográfica de una escena. (Bertol)

Cuando un arquitecto desarrolla un proyecto, más allá de resolver una necesidad hace uso de toda su creatividad al modelar espacios y crear ambientes, para ello utiliza como recursos básicos el diseño, los materiales y la iluminación. Mas que para solucionar el problema de la sola visibilidad, la iluminación interviene como un elemento cualitativo de la definición del espacio arquitectónico. En el diseño de la iluminación de una iglesia, el arquitecto se compenetra de la necesidad de evocar una mística de interiorización y meditación que no busca en la iluminación de una escuela, un hospital o una oficina. La calidad de los espacios arquitectónicos se define mediante la riqueza del juego de colores y texturas generados por la luz y el material.

Así que si se desea obtener una reproducción fidedigna de espacios arquitectónicos, se deben tomar en cuenta no solamente sus componentes materiales sino también aquéllos que participan en la creación de las emociones. De forma similar a como la iluminación es fundamental en el proceso de diseño lo es también en la visualización de espacios desaparecidos. Por ello, la simulación realista de la iluminación requiere ser una preocupación constante y se deben buscar sistemas de cómputo con la capacidad de reproducir el fenómeno físico del comportamiento de la luz.

El problema es complicado y se encuentra parcialmente resuelto por los distintos sistemas. Si la radiosidad ofrece excelentes resultados en interiores de edificios, su integración a un programa no implica que se realice una simulación del fenómeno físico de la iluminación. Existen programas con radiosidad que no simulan la iluminación real, así se encontrará una buena simulación solamente en aquéllos diseñados específicamente para este propósito, los cuales son todavía escasos en el mercado. Estos programas combinan generalmente técnicas de radiosidad y de *ray tracing*, de esta forma, simulan la dispersión atmosférica de la luz solar.

En arquitectura, es importante incorporar buenas herramientas de visualización de iluminación, de lo contrario, se obtiene una percepción falsa del modelo arquitectónico. (Lucet, 1998b)

Efectos adicionales

Se han descrito los elementos básicos para la creación de imágenes virtuales. Sin embargo, existen algunas técnicas adicionales para mejorar el realismo. Por ejemplo, las imágenes generadas por computadoras presentan los objetos en forma demasiado “perfecta”. Uno de estos problemas se refleja en su nitidez. En la realidad, la presencia de neblina, polvo o contaminación provoca que los objetos más alejados del observador se vuelvan borrosos. Aun en escenas donde el aire está limpio, si se desea mejorar la impresión de distancia se acostumbra insertar parámetros que vayan mezclando paulatinamente los colores de los objetos con un tono azul.

Otro de los defectos posible de combatir al trabajar los materiales es el lado “nuevo” y de plástico de los materiales, por ello, es necesario “arrugar” las superficies y cubrirlas de polvo para que el color no quede tan liso y los reflejos tan perfectos.

Las aristas son duras como si los materiales fueran de acero, esto se aleja bastante de los materiales utilizados en la construcción. Para contrarrestar este defecto, éstas pueden ser “suavizadas” mediante los algoritmos.

Ver el modelo

La percepción de un objeto varía según su posición relativa en relación con el observador. La gran aportación del modelo tridimensional en relación a una perspectiva dibujada, es que se puede especificar cualquier vista multiplicando así las posibilidades de observación. Se puede simular lo que ve un observador insertado en el modelo virtual, tener vistas como las que tendría un pájaro en vuelo o recurrir a efectos fotográficos.

Cuando la visualización busca reproducir la experiencia humana del espacio arquitectónico, es importante considerar los parámetros básicos de la visión humana, es decir ubicar el ojo a una altura correspondiente a la de un humano, abrir un ángulo de visión parecido al de la visión humana y reproducir el efecto de perspectiva.

Es común que al momento de escoger una vista del objeto se prefiera seleccionar vistas espectaculares con efectos de perspectiva pronunciados. Éstas tienen justamente la cualidad de ser llamativas y vistosas pero no corresponden a percepciones humanas normales. Cuando esto ocurre, en vez de reproducir una experiencia espacial se cae en el rubro de "interpretación del espacio" ya que se añaden efectos especiales. Otra vista comúnmente empleada es la que tendría un pájaro sobrevolando un edificio. Tampoco es muy real sin embargo favorece una descripción general de la volumetría y permite entender las diferentes partes de un conjunto. El uso de maquetas ha acostumbrado al arquitecto a estas vistas exteriores muy alejadas de la visión real. Todas estas formas de mostrar un espacio arquitectónico son válidas, pero requieren ser manejadas en forma consciente y corresponder a un objetivo deliberado.

Finalmente, es posible otorgar a la cámara virtual todas las variantes existentes en las cámaras fotográficas, desde selección del tipo de lente hasta la definición del plano de enfoque y la profundidad de campo. En este caso, evidentemente se aleja de la visión humana al tratar de generar calidades visualmente atractivas.

El uso de técnicas más completas de visualización permite una reproducción más exacta de la percepción de la tercera dimensión incluyendo la visión estereoscópica. Es notable la

mejoría de la sensación de distancia, de profundidad y de relieve obtenida con esta técnica. El proceso económico consiste en generar la imagen correspondiente a lo que ve cada ojo, en tonos de rojo para el ojo izquierdo y en tonos de verde o azul para el derecho. Se superponen las dos imágenes en una sola y con lentes con un lado azul y el otro rojo, se canaliza cada una al ojo correspondiente y el cerebro reconstruye la sensación de profundidad. La imagen estereoscópica obtenida de esta forma es monocromática y tiene la ventaja de poder quedar impresa en una publicación a color. Para obtener una imagen estereoscópica con colores el sistema es más complejo. Una de las técnicas, recurre al uso de lentes sincronizados con el monitor donde se alternan rápidamente la imagen correspondiente al ojo izquierdo y la del ojo derecho.

Otra mejoría en la visualización consiste en la utilización de cascos, donde la inmersión en el mundo tridimensional es más completa gracias al hecho de que elimina el mundo físico del usuario. Se extenderá este punto en la sección sobre realidad virtual (p. 55).

Usos de la tercera dimensión

Generar imágenes fijas

La fase más inmediata de visualización consiste en la generación de imágenes con un cierto grado de realismo. Lo anterior depende en buena medida de los alcances del programa utilizado y de los algoritmos empleados. En las imágenes producidas por computadora no está involucrado un estilo gráfico personal, como en el caso de las perspectivas realizadas a mano, donde la calidad de dibujo es un componente importante para la calidad del resultado además de que se inserta en el estilo personal del dibujante y de una época. En las imágenes virtuales, el componente personal de su creador se integra en una proporción menor que la calidad de los algoritmos de realismo. Si se cuenta con una excelente herramienta de simulación de luz natural, la calidad del creador será comparable con la de un fotógrafo quien sabe escoger la ubicación de la cámara y el momento del día idóneo para obtener una iluminación donde se aprecien las

características del espacio arquitectónico. Por estas razones se puede calificar el resultado como más imparcial y menos engañoso, lo que lleva a afirmar que las imágenes por computadora pueden ser una ayuda real en el proceso creativo de los proyectos.

Insertar una imagen calculada de un proyecto en su contexto real

Supongamos que el proyecto arquitectónico se desarrolla en un terreno baldío de una calle. Varias fotografías se han tomado para ver el contexto de la nueva construcción y tener referencias de escala y volumetría. Estas imágenes pueden incluirse en el modelo tridimensional del proyecto, para ello, se modela de una forma tosca las volumetrías de los inmuebles circundantes y se “pegan” las fotografías de las fachadas como mapeo de textura. Al momento de ordenar el *render* para visualizar el proyecto, éste aparecerá en su contexto, con las fachadas de su entorno.

Otra forma, consiste en generar una imagen del modelo ubicando la cámara virtual en la misma posición que tenía en relación al terreno baldío. Después, con un programa de edición de fotografías, se realiza un fotomontaje, donde se incluyen la imagen calculada a partir del modelo virtual, dentro de la fotografía digitalizada del terreno baldío.

Animaciones dirigidas

Un paso considerado como avanzado en la representación, consiste en la integración de la cuarta dimensión, la del tiempo, para generar animaciones. Éstas pueden ser pasivas y dirigidas como sería el caso de la producción de un video, o activas y voluntarias, cuando es una animación en tiempo real y su extensión a la realidad virtual.

Al generar una animación que, en arquitectura, consiste generalmente en un recorrido predefinido por el creador de la animación, se llega a una descripción más completa del espacio arquitectónico que mediante una simple imagen. Se presentan mayores vistas del objeto y se integra la noción del tiempo, simulando una cámara moviéndose en un mundo virtual. Se pueden

lograr así, resultados comparables con la filmación real dentro de un edificio. Sin embargo, el espectador se encuentra muy limitado en esta vivencia al estar imposibilitado de descubrir el espacio por sí mismo y de navegar en forma libre. Se siente totalmente ajeno a éste, en fin, es solamente un “espectador”.

Para la realización de esta forma de animación, pueden ser retomados criterios de reproducción de filmación *in situ*. Por ejemplo, la cámara puede conservar la altura del ojo humano y el movimiento puede ser más o menos rápido reproduciendo el de un hombre que sube escaleras, se detiene, ve hacia arriba, alrededor y de repente fija su mirada sobre un punto en particular. Se puede así, buscar la reproducción de una relación física entre el objeto arquitectónico y el hombre virtual, respetando el sentido de escala entre el hombre y el espacio, lo cual fácilmente puede perderse por la abstracción del medio.

La simulación de la experiencia humana del espacio es fundamental para el descubrimiento del espacio arquitectónico, sin embargo es austera y poco espectacular en relación con la completa libertad de movimiento ofrecida por los medios virtuales. En la animación de la Frauenkirche de Dresden, la cámara va bajando y sigue un camino helicoidal desde el pináculo que se encuentra en la parte superior del domo, hasta la puerta de entrada, antes de introducirse en la capilla. Por tratarse de un edificio barroco, el guionista buscó reflejar el espíritu del edificio mediante el movimiento de la cámara virtual. Una combinación de movimientos humanos y otros libres resulta fundamental para describir los edificios.

La animación grabada tiene varias ventajas respecto a la animación libre calculada en tiempo real. Ofrece la posibilidad de incluir efectos especiales, como por ejemplo la incorporación de imágenes correspondientes a diferentes etapas históricas del modelo. Éstas técnicas han sido utilizadas con un resultado de alta calidad visual en la realización de *Karnak, la machine a remonter le temps* mediante la intercalación de imágenes actuales con imágenes de reconstrucción. A nivel técnico, las imágenes usadas para video pueden poseer una mayor calidad técnica sobre aquéllas generadas en tiempo real, dado que el movimiento del usuario obliga a un cálculo rápido que solamente puede efectuarse sacrificando la calidad. El dilema calidad de la

imagen *versus* tiempo de cálculo existe hasta el momento. Finalmente puede ser presentado y observado con recursos comunes como son una videocasetera y una televisión.

Sin embargo, como dice Zevi:

Même dans la représentation cinématographique, il manque ce sens de complète participation, cette volonté, cette conscience de liberté que nous éprouvons dans l'expérience physique de l'espace.

Una animación en realidad es una secuencia de imágenes donde alguno de los parámetros que la componen es modificado. El recorrido correspondería a la descripción espacial, pero podemos imaginar animaciones basadas en cambios de materiales o simulaciones de iluminación.

Animaciones en tiempo real

En la animación interactiva, a veces llamada erróneamente realidad virtual, el usuario se vuelve miembro activo pues desarrolla su propio recorrido mediante el uso de periféricos con los cuales transmite sus movimientos. Gana así libertad de movimiento, al tener un descubrimiento personalizado del espacio que le permite crear una experiencia propia. Aunque se adquiere más libertad, el usuario se mantiene exterior al espacio, sentado frente a un monitor de computadora. Se pierden algunas de las ventajas del video cinematográfico como es la integración de efectos especiales, además de que como se ha visto anteriormente, según la plataforma empleada, es necesario sacrificar en términos más o menos fuertes la calidad y el realismo de las imágenes.

Hoy en día, existe un fuerte desarrollo de la interactividad mediante red, basada en el lenguaje VRML (*Virtual Reality Modeling Language*). Es un lenguaje de descripción de escenas, y mediante el uso de "navegadores" que leen el archivo se permite el movimiento del y dentro del objeto.

Realidad virtual

Vivir el espacio arquitectónico implica desarrollar interacción entre el espacio y el hombre, así, y esta percepción incluye la participación de todos los sentidos. Como dice Zevi (1959):

Partout nous devons "vivre" l'expérience spatiale; nous devons y entrer nous-même, nous sentir partie et "unité métrique" de l'organisme architectural, nous devons être nous-même dans l'espace.

Los sistemas descritos anteriormente dejan al espectador fuera del espacio e intervienen solamente sobre la vista.

De la misma forma que Aveni (1986) afirma:

To know the Maya is to see what they saw, to hear what they heard, to feel what they felt, to taste what they tasted, and to smell what they smelled.

En esta línea de pensamiento, sentir la arquitectura de Palenque es percibir su calor y humedad, oír su fauna y el ruido de la vegetación, oler su ambiente; bajar a la tumba de Pacal, es experimentar un fuerte cambio de iluminación, ruidos y humedad.

Así que la percepción del fenómeno arquitectónico y su vivencia van más allá de la sola vista.

A partir de los años 80, con la finalidad de mejorar la relación entre un modelo virtual y el espectador se desarrollan múltiples herramientas que fueron agrupadas bajo el término general de "realidad virtual". Corresponden a la búsqueda de una nueva forma de interactuar con el mundo virtual y son a veces clasificadas como un problema de interfaz. Aunque existe toda una serie de variantes, la realidad virtual consiste, en la mayoría de los casos, en la inmersión del usuario en el ambiente virtual, aislándolo de su ámbito e integrando sus movimientos corporales naturales como medio de comunicación con el medio virtual. Es, como dice Chirollet (1994), una presencia simulada por lo que propone que el término "similipresencia" sería más adecuado que el término de "realidad virtual". En una realidad virtual el usuario se ubica "dentro" de la imagen.

La simulación de la presencia recurre en muchos casos en el uso de un casco con lentes estereoscópicas para aislarse del exterior. Para moverse dentro del mundo virtual, interactuar con él y mover los objetos virtuales, el usuario está equipado con una serie de periféricos que van desde guantes hasta sensores fijados sobre su cuerpo. Para que el usuario tenga una referencia de su presencia en el mundo virtual se reproduce una mano virtual que sigue los movimientos del guante llevado por el usuario.

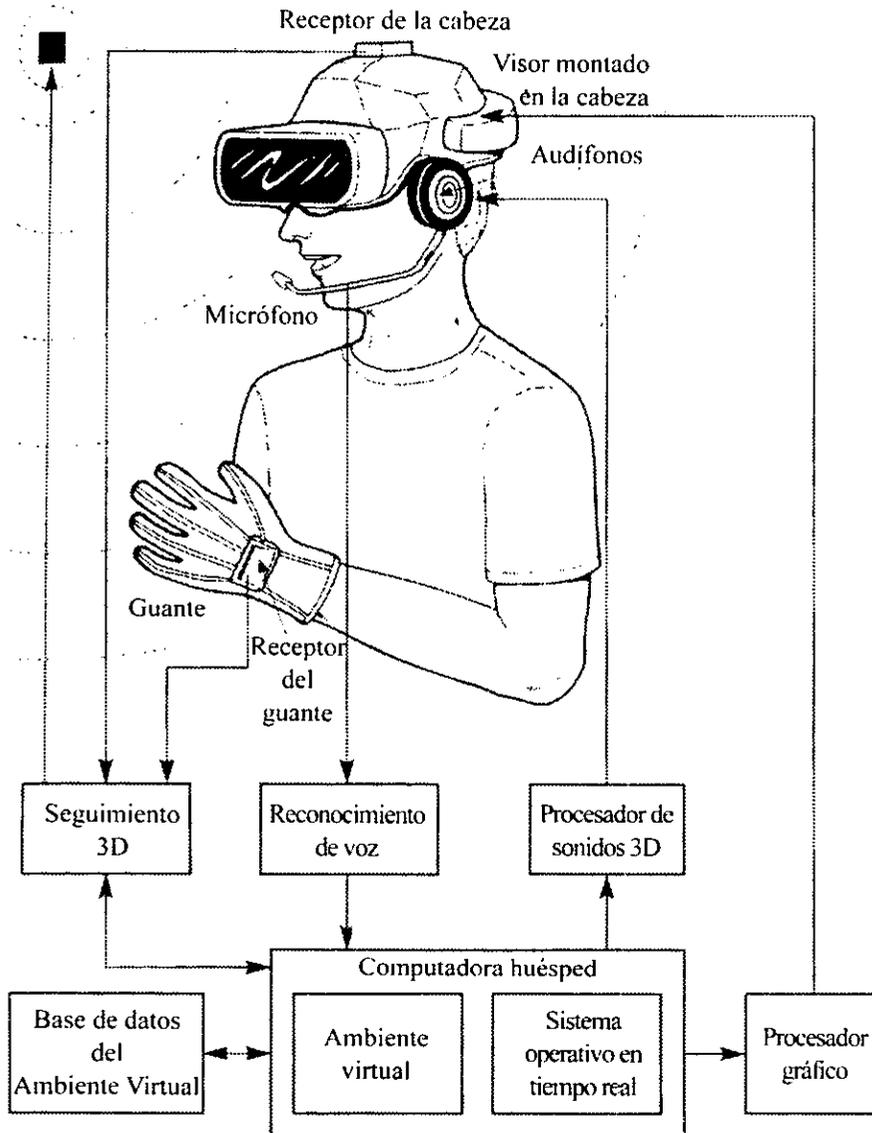


Figura 18. Integración de varios elementos en un sistema de realidad virtual. (Traducción Vince J., 1995)

En la Figura 18 se reproduce un esquema de integración de voz, sonido, visión y guante en realidad virtual (Vince J., 1995). En esta configuración, el usuario puede dar indicaciones verbales a la computadora; asir y mover objetos virtuales; de esta forma, en la medida que mueve la cabeza se actualiza su visión estereoscópica del mundo virtual; adicionalmente recibe sonidos, por ejemplo algún ruido si se “choca” contra un objeto.

Existen todavía muchos problemas ligados al uso de estos periféricos. De forma particular, estorban demasiado y resultan incómodos lo cual paradójicamente impide olvidar su presencia. Una línea de desarrollo experimental los reemplaza por la detección automatizada de las necesidades del usuario y recurren a la visión por computadora. Cámaras y captores de infrarrojo registran los movimientos del usuario, éstos son procesados en tiempo real y se ejecuta el cambio correspondiente. Las imágenes son proyectadas sobre muros periféricos. Por ejemplo, una cámara capta los movimientos de los ojos del usuario e inmediatamente se actualiza la imagen proyectada para reflejar esta nueva posición.

Es en la arquitectura donde la realidad virtual encuentra una de sus más fuertes razones de ser. El objeto arquitectónico es, en esencia, la estructuración del espacio para ser experimentado por el hombre. Ello implica tridimensionalidad e inmersión del hombre con todos sus sentidos para la experiencia y decisión de sus movimientos. Por razones de prioridades económicas y políticas, se observan aplicaciones de la realidad virtual principalmente en áreas bélicas o medicinales. Sin embargo en estas áreas nunca entra la parte sensible del espacio, solamente la mejoría de la percepción visual para realizar actividades específicas. Tanto en medicina cuando la realidad virtual permite al cirujano efectuar operaciones con disminución de riesgos para el paciente, como en la simulación de la guerra, la realidad virtual es solamente una forma de visualizar y ayudar al raciocino, mientras que en la arquitectura se trata de una experiencia de vida espacial fundamental. Así por primera vez en su historia, la arquitectura se considera de repente como tema de interés para el desarrollo de tecnología altamente sofisticada pues es el terreno más propicio para explotarla y lucirla.

La realidad virtual es todavía de reciente desarrollo y sus alcances están demasiado limitados. Sin embargo es un área de investigación donde cada año emergen nuevas tecnologías. Es factible prever un futuro cercano que no es de ciencia ficción, donde se abrirá un amplio panorama para la arquitectura. Una de las limitantes actuales reside en la alta demanda de recursos de cómputo, por lo que su costo resulta bastante alto y su realismo limitado, sin embargo si se toma en cuenta que en unos 10 años los juegos computarizados para niños tendrán una capacidad de cómputo comparable a las supercomputadoras actuales, se puede suponer que la realidad virtual llegará a tener un uso amplio.

Se retoman a continuación algunas de las demandas que exigen la vivencia del espacio arquitectónico y en qué medida éstas se encuentran resueltas por la realidad virtual. La vitalidad con la cual esta área se ha desarrollado permite la apertura de nuevas exigencias por parte del usuario del espacio arquitectónico.

La inmersión. Vivir el espacio arquitectónico es estar adentro de éste y tener el sentimiento de una presencia real, con todo lo que esto implica en cuanto a la intervención del espectro sensorial. Como se ha mencionado anteriormente uno de los primeros instrumentos de inmersión desarrollados en realidad virtual consiste en el casco que proporciona una visión estereoscópica. El casco conlleva todavía una serie de problemas como su propio peso, la limitación del ángulo de visión y la dificultad de definir la distancia entre el objeto virtual y el usuario. Otra forma tiene que ver con el uso de un recinto conocido como *Cave* donde la imagen queda proyectada sobre muros y techos que circunden el usuario. Dicha *Cave* permite que varias personas vivan al mismo tiempo la experiencia, aunque solamente una tiene el control de los movimientos de la vista. Este sistema requiere de la proyección y del cálculo de varias imágenes para envolver a los usuarios dentro del ambiente, por ello, los procesos computarizados implicados son bastante complejos y demandan del uso de varias computadoras sumamente rápidas, con un costo elevado.

El movimiento. El recorrido de un edificio y su descubrimiento, se realizan “caminando”, lo cual relaciona el descubrimiento de un lugar con el cuerpo y proporciona un sentido de escala y

de tiempo. La forma más sencilla de recorrer virtualmente un espacio se basa en el uso de un *mouse*, que transmite movimientos tridimensionales para indicar por donde se quiere caminar, es una forma poco natural donde el cuerpo no existe. Otros sistemas incluyen una plataforma móvil, como si fuera una caminadora para que el usuario camine realmente y se reproduzca una interfaz más natural.

El cuerpo. Es mediante el movimiento de la cabeza y de los ojos que se descubre el espacio desde su aspecto visual. Para ello, una serie de sensores son instalados en el casco con objeto de captar estos movimientos corporales y traducirlos a nuevas visiones dentro del mundo virtual. Aunque se busca que las imágenes sean generadas muy rápidamente para que el usuario no sienta desfase entre lo que hace y lo que ve, en los hechos existe un ligero retraso que produce un cierto malestar para el usuario.

Adicionalmente, la inmersión corporal debe llegar a un real sentimiento de ubicación en el espacio para ser creíble. La presencia corporal en el espacio es tan natural que raramente se nota. Sin embargo el campo de visión integra partes del cuerpo, manos y pies, lo cual ayuda a tener una referencia permanente entre nuestra presencia y el entorno. Este factor tampoco ha sido olvidado por los desarrolladores de realidad virtual, pero sigue siendo irreal.

El esfuerzo es otro de los componentes de la realidad; en este sentido, bajar las escaleras que conducen a la tumba de Palenque implica sentir lo resbaloso del piso, lo vertical de la escalera, elementos que son difíciles de reproducir. Un problema que sí está resuelto es el aspecto “fantasmal” del usuario para que no atraviese muros y pisos.

La retroalimentación táctil. Uno de los problemas de los sistemas virtuales consiste en la pérdida de la sensación de contacto con el ambiente y los objetos virtuales. Para paliar este problema se han desarrollado sistemas que consisten en aplicar sobre el cuerpo del usuario una serie de sensores que transmiten a la piel y los músculos la sensación de tocar, de peso de los objetos y de su rigidez.

Los olores. Los olores son un componente muchas veces subestimado en la relación entre el hombre y el espacio; y es uno de los elementos que más se graban en la memoria existencial.

Mediante cápsulas que liberan un gas, se ha logrado reproducir este aspecto sensorial. Una de las áreas que lo requieren, y que empujan este desarrollo, es la realidad virtual aplicada al entrenamiento de cirujanos, actividad donde los olores son muy importantes para detectar problemas.

Los sonidos. Sonidos pregrabados y relacionados espacialmente con los objetos pueden ser digitalizados e insertados en la descripción del espacio. La presencia de árboles y de un río se vuelven así más reales, en la medida que el usuario se acerca a ellos, mezclándose con el ruido de fondo como canto de pájaros. El sonido es también parte de la definición y percepción espacial; según los materiales de una construcción, la amplitud de una habitación, la cantidad de muebles, las cualidades acústicas de espacio varían y por lo tanto éstas son también un factor que la da particularidad a un "lugar". Asimismo, al utilizar la síntesis de sonidos y su reconocimiento, el usuario puede dar verbalmente órdenes para llevar a cabo actividades como mover objetos.

El calor, la humedad. Como se ha mencionado anteriormente, las condiciones ambientales son parte integral de la ubicación de un objeto arquitectónico. Es imposible imaginar Palenque bajo un clima frío y seco, y la propia bajada a la tumba implica un fuerte cambio de las condiciones ambientales. Estos factores podrían ser reproducidos fácilmente acondicionando el cuarto donde está ubicado el usuario. Bastaría con instalar un sistema de clima adecuado, sin embargo no se han visto todavía instalaciones que lo tengan, probablemente por el tipo de aplicaciones que han sido realizadas. De hecho, esto es más un problema de instalaciones, que de cómputo.

Es claro entonces que los requerimientos para llegar a una inmersión total en el espacio arquitectónico son muchos y muy variados. La percepción de la arquitectura es un fenómeno complejo que rebasa el simple aspecto visual y obliga al desarrollo de mejores herramientas. De hecho, esto es una característica de un área de reciente desarrollo donde los primeros logros son aún insuficientes y deben ser consideradas como las etapas primarias en una evolución, no obstante, la simple inmersión mediante el casco representa sin embargo un importante avance por sí sola.

Realidad aumentada

La superposición de imágenes virtuales con imágenes reales para completar lo real con elementos inexistentes o no perceptibles por el ojo ha sido llamada “realidad aumentada”. Por ejemplo, a partir de imágenes de tomografía de resonancia magnética, se ubica y modela tridimensionalmente un tumor cerebral y su contexto. Al operar, el cirujano se coloca unos lentes donde ve al mismo tiempo este tumor y el cuerpo del paciente, teniendo así una guía para llevar a cabo la intervención quirúrgica. En la Universidad de Columbia, se ha desarrollado un sistema que “muestra a los usuarios partes de un edificio que quedan escondidas atrás de acabados arquitectónicos o estructurales” (Bertol, 1997). Así, al ubicarse en un cuarto, se pueden ver las varillas o tubos escondidos en los muros al mismo tiempo que el cuarto real y esto permite una ubicación precisa de las instalaciones. Todavía faltan resolver muchos problemas para llegar a una amplia aplicabilidad de la realidad aumentada, desde el perfeccionamiento de los periféricos para contar con lentes ligeros hasta la mejoría de los algoritmos.

CONCEPCIÓN ASISTIDA POR COMPUTADORA

El proceso de trabajo del arquitecto está compuesto por varias etapas; la primera tiene que ver con la conceptualización, seguida por la representación para finalmente pasar a la comunicación con los clientes y constructores. Si en estas dos últimas se observa la presencia de las herramientas de cómputo, ya sea por la forma de producir los planos o en la producción de imágenes y animaciones, su empleo como herramienta conceptual no es todavía muy perceptible. Por la formación del arquitecto y la lentitud con la cual se cambian las formas de trabajo, hasta ahora lo más visible ha sido el cambio del restirador por la computadora. Sin embargo, esto no ha tenido un mayor impacto en la concepción arquitectónica.

El arquitecto podría aprovechar las capacidades tridimensionales del cómputo para trabajar directamente su proyecto en volumetría. Las herramientas le permiten diseñar superficies

cada vez más complejas como por ejemplo, las generadas con doble curvatura y visualizarlas. En vez de tomar decisiones recurriendo a medidas estándar, puede modificar su proyecto hasta quedar satisfecho visualmente. Es solamente cuando llega a una solución completa que decide generar los planos, porque corresponden a la necesidad de transmitir la información a los diferentes cuerpos de trabajo que llevarán a cabo la construcción.

Si no se ha integrado el cómputo a la concepción no es solamente por inercia de los arquitectos; es también porque las interfases no reproducen aún formas naturales e intuitivas de trabajo. La realización de modelos tridimensionales sigue siendo tediosa, mediante periféricos como el teclado y rápidamente el usuario queda confundido por la cantidad de líneas que atraviesan el monitor. La realidad virtual, percibida como una interfaz entre el hombre y la máquina, podría llegar a eliminar este problema y abrir las posibilidades creativas de la arquitectura.

La realidad virtual para el diseño

Si, además de trabajar una volumetría y de visualizarla, el arquitecto se encuentra totalmente inmerso en el mundo virtual, su percepción espacial aumenta considerablemente. Anteriormente hemos hablado de la realidad virtual como forma de experimentación sin intervenir en el medio, sin embargo podemos imaginar qué puede pasar si adicionalmente se cuenta con las herramientas necesarias para subir techos, modificar aperturas, colores, materiales, iluminación, es decir, realizar modificaciones espaciales. La idea consiste en trabajar el espacio desde adentro, ensayar varias soluciones y visualizar inmediatamente el resultado. Es como si se construyera realmente un edificio y que al recorrerlo, el arquitecto indicara las modificaciones. En la realidad es totalmente imposible hacerlo, tanto por el costo que implicaría como por el tiempo necesario para realizar cualquier modificación.

Falta todavía mejorar las interfases para llegar a una aplicabilidad real de esta idea, sin embargo se trabaja intensamente en este aspecto. Como en muchos casos de realidad virtual, es necesario hacer más natural e intuitiva la interfaz, mejorar la velocidad de los procesos para que

el usuario se mueva con naturalidad olvidando la máquina y aumentar la precisión al mover los objetos.

La mesa de trabajo virtual. Una herramienta basada en la realidad virtual para el apoyo al diseño en un ambiente que no es de inmersión, consiste en el uso de una mesa de trabajo virtual o restirador virtual. Varias personas alrededor de una mesa de trabajo pueden ver con lentes estereoscópicos una maqueta virtual controlada por uno de ellos. Este sistema reproduce un ambiente de trabajo natural donde se comenta el proyecto en grupo. Se pueden modificar sus componentes mediante el uso de un guante o de un apuntador. Por ejemplo si se trabaja una planeación urbana, se puede tomar un edificio y cambiarlo de lugar como si se tratara de una maqueta. Estos mismos objetos pueden ser cambiados en su forma como se haría con un paquete de CAD. Igualmente se podrían ver una al lado de la otra, dos propuestas distintas de un mismo proyecto. Este sistema ha sido también usado para análisis de iluminación (Feldgoise et al, 1997). Para modelar el nuevo diseño se usan elementos estandarizados y se ensamblan. Las herramientas "inteligentes" ayudan en el redimensionamiento y la ubicación de los nuevos objetos conectándose en forma precisa a los objetos ya existentes. Se puede anexar una imagen digitalizada, hacer cortes para ver el interior de un edificio o generar que ciertos materiales se vuelvan transparentes para ver adentro de un edificio. Se pueden explorar soluciones de materiales o color en muros. Como en el caso anterior, falta todavía corregir varios problemas de realismo para tener noción de gravedad, colisión, y una retroalimentación táctil que permita sentir que realmente se están haciendo los objetos.

La creatividad artística. La realidad virtual abre también otra rama de la arquitectura que no depende de los componentes físicos del material, de la gravedad y de la lógica constructiva. La arquitectura como se ha mencionado anteriormente, es la organización y estructuración del espacio. Existe originalmente para responder a una necesidad de creación de lugares que permiten llevar a cabo actividades humanas específicas. Al ser ligada a la construcción, o elementos naturales en el caso de la arquitectura del paisaje, queda restringida por las características de las leyes de la física o de la biología. Sin embargo, se puede imaginar una arquitectura virtual

diseñada exclusivamente con fines de experiencia sensorial, estética o lúdica, donde las leyes de la física no sean importantes. Esto se vuelve posible ya que en el mundo digital solamente existen las limitantes programadas.

DE LOS EQUIPOS DE TRABAJO REMOTOS, TELEPRESENCIA

Todas las actividades que se realizan con computadoras tienen el potencial de ser efectuadas utilizando la red Internet para conectar computadoras que pueden ser ubicadas en un mismo edificio, ciudad, país o en lugares remotos del mundo.

Una de las formas de aprovechamiento de la red es para realizar teleconferencias. De modo sencillo, los usuarios sentados frente a computadoras equipadas con cámara y micrófono pueden establecer una conversación, enseñar y enviar planos y dibujos. Es posible también realizar reuniones virtuales donde usuarios distantes puedan “asistir” sin moverse de sus lugares de trabajo. Las conferencias pueden ser presentadas sin que el conferencista tenga que viajar. Los maestros pueden presentar clases que serán recibidas por salones de alumnos ubicados en distintos lugares. Con la teleconferencia tiene mayor apertura el espectro de las comunicaciones.

Otra forma de emplear la red de computadoras consiste en transferir archivos. El colaborador o el cliente remoto pueden así recibir rápidamente la información. Sin embargo si se piensa en un equipo trabajando por red, copias distintas de un mismo archivo, pueden provocar graves problemas, ya que de un lado se pueden hacer cambios sin que el otro esté enterado. Así que una forma segura consiste en trabajar desde lugares distintos el mismo archivo. Si por una parte, el ingeniero de estructuras efectúa modificaciones, el de instalaciones se da cuenta inmediatamente. De hecho, en la mayoría de las empresas donde intervienen varios especialistas en el desarrollo de un proyecto, es la única forma de trabajar, aun cuando las computadoras que utilicen, estén una al lado de la otra.

En los espacios de encuentro virtuales, los usuarios pueden ser representados mediante algún elemento, como un cubo o una fotografía. Diferentes personas pueden así encontrarse en el

medio virtual. Por ejemplo, se visita virtualmente un museo y éste no está vacío ya que durante el trayecto se convive con las representaciones de otras personas que están haciendo lo mismo. En el evento Imagina 93 fue presentado un trabajo donde dos personas, una ubicada en París y la otra en Monte-Carlo se encontraron virtualmente dentro de la abadía de Cluny reconstruida digitalmente, para efectuar un paseo. (Couwenbergh, 1998)

Si se retoma el ejemplo de la mesa de trabajo virtual, ésta puede ser compartida por un arquitecto ubicado en Japón y otro en México. Cada uno toma objetos, modifica el proyecto y discute con el otro las posibles mejoras al diseño. Existe en este mecanismo un dinamismo que solamente podría ser superado por una presencia real de los participantes. Así, se eliminan las fronteras y las distancias dejan de ser significativas.

SIMULACIÓN

Los fenómenos físicos que pueden ser modelados con un sistema abstracto de ecuaciones son susceptibles de ser visualizados. Se espera que muchos experimentos que se están realizando puedan ser reemplazados en el futuro por su simulación por computadora, reduciendo así costos y peligros. Es el caso por ejemplo de los ensayos nucleares.

En construcción uno de los primeros usos de la simulación es utilizado para la optimización de las estructuras. Formas complicadas y novedosas requieren de cálculos complejos para tomar en cuenta los distintos esfuerzos, asimismo se puede visualizar los comportamientos bajo distintas condiciones, como tifones y tormentas. En el caso de un edificio antiguo que ha tenido hundimientos diferenciados, la simulación permite estudiar las causas del problema y buscar soluciones.

Al tener una representación matemática de movimientos telúricos y conociendo las características de una estructura, se puede visualizar su comportamiento y detectar sus puntos frágiles.

En la mayoría de los casos, por su especificidad, la simulación requiere de programación y no es todavía de acceso inmediato para los arquitectos. Las propias ecuaciones que modelan estos fenómenos físicos inclusive son temas de investigaciones, como también lo es la respuesta de los materiales. Así, para la investigación en arquitectura tienen un potencial interesante, con la condición de armar equipos de trabajo interdisciplinarios.

Una simulación que sí es aplicable es la correspondiente a la iluminación. Es un fenómeno más conocido e importante para un grupo amplio que incluye entre otros ingenieros, electricistas, arquitectos y museógrafos. Por estas razones se han desarrollado varios programas que incluyen, tanto la simulación de la luz solar como la iluminación artificial. En el caso de la luz solar, se indican las coordenadas terrestres de la ubicación del edificio, latitud y longitud, el día del año y la hora. El sistema calcula automáticamente las coordenadas del sol, la iluminación correspondiente y muestra las imágenes resultantes del modelo arquitectónico. Como se ha mencionado anteriormente, los modelos de iluminación están basados en la combinación de los algoritmos de radiosidad con los de ray tracing.

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

En proyectos y diseño arquitectónico, la mayor parte del trabajo conceptual y de representación puede ser plasmado gráficamente; otras áreas como el urbanismo o el estudio de un centro histórico requieren del manejo de información sobre densidad poblacional, tipo de construcción, cantidad de pisos, situación socioeconómica, fecha de construcción, es decir, de una serie de datos que no son gráficos pero que adquieren un mayor sentido cuando se pueden relacionar con planos.

Los sistemas de información geográfica (GIS) permiten enlazar planos con bases de datos estableciendo una relación entre estas dos formas de información. Por ejemplo, se puede pensar en un sistema de información de monumentos donde aparece en pantalla un plano del centro histórico y al mover el cursor sobre un lote, se despliega un ventana que muestra la fachada del

edificio, su planta y toda su información como fecha de construcción, propietario, características e intervenciones de restauración realizadas.

De modo similar, se pueden graficar automáticamente con colores distintos los predios, según su densidad de ocupación o los ingresos de sus habitantes. Al graficar un plano con colores correspondientes a la fecha de ocupación de los lotes, se observarían las etapas de crecimiento urbano y se calcularía la superficie de la ciudad en cada una de éstas. De la misma forma se pueden hacer referencias cruzadas como tendencias electorales en relación con ingresos. Al obtener gráficamente en un plano los datos, se establece inmediatamente una relación espacial visible y se observan fenómenos y tendencias.

Estos sistemas son utilizados ampliamente en arqueología. La información relativa a las piezas queda registrada en una base de datos y, para su ubicación espacial, se establece una referencia X,Y,Z con el levantamiento dibujado con un paquete de CAD. Se puede visualizar así, dónde se encontraron piezas que corresponden a ciertas características, si están ubicadas en el mismo nivel estratigráfico, o si se encuentran agrupadas en una cierta zona del sitio, de esta forma, el resultado obtenido permite al arqueólogo plantear hipótesis sobre las distintas fases de ocupación.

Reconstrucción virtual de sitios arqueológicos; aplicación al sitio de Cacaxtla

INTRODUCCIÓN

En el objeto arquitectónico se plasman múltiples factores que expresan el estado de una cultura, desde su forma de construir y su organización, hasta como conciben los espacios para resolver sus necesidades. La historia de la evolución e intercambios entre los diferentes pueblos que habitaron la zona mesoamericana es todavía poco conocida y la arqueología permite extraer datos cuyo análisis aporta información que enriquece nuestros conocimientos al respecto. Cada sitio arqueológico mesoamericano contiene factores propios que lo transforman en una pieza clave de un inmenso rompecabezas que permiten reconstruir la historia previa a la conquista.

Entender la arquitectura mesoamericana y los principios que llevaron a su realización no es algo inmediato. Por una parte, la concepción espacial mesoamericana es muy distinta de la occidental, corresponde a necesidades distintas, un clima y una forma de vida diferentes. Se caracteriza por un trabajo de grandes masas en forma escultórica, una mayor importancia dada al espacio exterior que al interior, una correlación con el cosmos y la presencia de un ambiente religioso complejo que influye fuertemente tanto en las necesidades a resolver como en la forma de solucionarlas. Así que la lógica con la cual se establece y diseña un conjunto ceremonial llega a tener explicaciones que, al ser descifradas, pueden ser totalmente distintas de los criterios empleados en la actualidad.

Para citar solamente algunos ejemplos, en Teotihuacan se ha mostrado una relación entre la pirámide de la Luna y del Sol con los cerros circundantes (Gendrop P., Heyden D., 1973) y el

uso de un sistema de medidas relacionado con el calendario (Sugiyama S., 1993); en la zona maya, Aveni y Gibbs (1976) relacionan la orientación de edificios con fenómenos astronómicos y Hartung (1986) muestra la importancia de las líneas visuales en la ubicación y orientación de las construcciones, lo cual es muy distinto al sentido de perspectiva desarrollado en la arquitectura occidental clásica.

Por otra parte, los sitios mesoamericanos presentan como particularidad el haber tenido una evolución constructiva vertical al mismo tiempo que horizontal. Era práctica común enterrar los edificios, destruyéndolos parcialmente o conservándolos, para construir otros encima. Al efectuarse los trabajos de excavación, se dejan al descubierto estructuras que corresponden a etapas constructivas distintas para mostrar la evolución histórica y constructiva del sitio. Sin embargo, al no haber coexistido, nunca llegaron a conformar juntas el espacio arquitectónico, como consecuencia, el conjunto parece desordenado y no se entiende. Adicionalmente, se vuelve imposible vivir el espacio arquitectónico tal como fue diseñado y usado por sus constructores.

Finalmente, el tercer elemento que dificulta la comprensión del espacio arquitectónico mesoamericano es el estado en el cual se encuentran sus estructuras. Fenómenos de conquista, destrucción y olvido de los centros ceremoniales, desde las épocas prehispánicas hasta la conquista por los españoles, añadidos a siglos de intemperie y abandono han llevado las construcciones a un estado de ruina. Los sitios fueron recubiertos de vegetación, los muros y techos cayeron, los acabados exteriores y las pinturas se desprendieron de sus soportes y se desintegraron.

Reconstruir los monumentos, y en particular los sitios para volver a darles su esplendor, ha sido una recurrente tentación. Más que tener una aportación histórica, la reconstrucción permite presentar una imagen entendible del patrimonio arquitectónico y apreciarlo en un estado que, se puede suponer, fue su estado original. Viollet-le-Duc la defendía en la medida que ligaba la sobrevivencia de los monumentos a fines utilitarios y funcionales. La ruina, al ser un resultado tan alejado de la construcción original, no es más un objeto arquitectónico. Otros argumentos recurren a lo poco didáctico de una ruina, o a lo poco atractivo.

Sin embargo, en los hechos la reconstrucción es una posición peligrosa, desde el punto de vista de la historia y generalmente poco exitosa estéticamente, por lo que ha sido abandonada para dejar lugar solamente a intervenciones discretas de consolidación y restitución local reversible. Una reconstrucción total conlleva casi siempre una parte hipotética. En el mejor de los casos el restaurador limita su intervención a la parte donde tiene todos los datos para sostener su toma de decisiones, y por tanto no lleva a cabo una reconstrucción total. Desgraciadamente, intervenciones masivas que en un momento dado parecían basadas en una certeza fundamentada mostraron más adelante, ser equivocadas. Por consecuencia, la búsqueda de la restitución a un estado original concluía en una falsificación de la realidad.

Si el restaurador busca mostrar “el estado original” de un sitio mesoamericano, se enfrenta al problema de la superposición de elementos constructivos. Para tener congruencia debería dejar solamente los elementos arquitectónicos que coexistieron en un momento dado, eliminando los demás, lo cual lo llevaría a destrucciones masivas. No existe una base justificable para escoger una época de la historia en detrimento de otra, dado que el interés del sitio arqueológico consiste justamente en su aportación para entender la historia como un fenómeno evolutivo y cambiante.

Finalmente, la mayoría de los sitios arqueológicos no han sido excavados en su totalidad. Optar por la reconstrucción de un sitio tendría como consecuencia fijarlo a un estado de congelamiento, impidiendo la extracción de datos adicionales, fundamentales para el estudio y el aumento del conjunto de conocimientos relacionados a las poblaciones que construyeron y vivieron el sitio.

Sin embargo, los diferentes especialistas relacionados con el estudio de los sitios arqueológicos sean arqueólogos, arquitectos o historiadores han realizado siempre reconstrucciones hipotéticas. La reconstrucción hipotética es una herramienta de investigación y de difusión del sitio donde se plasma, en forma gráfica o en maquetas, el estudio de las huellas arqueológicas encontradas (los datos disponibles) y se extrapolan para conformar un conjunto congruente del sitio en una o varias de sus etapas históricas. Corresponde a la necesidad de

obtener una representación entendible de los componentes arquitectónicos para apreciar volumetrías, relaciones espaciales y estéticas. Una de sus consecuencias es también presentar al no especialista gráficas que le proporcionen una visión del estado original, que satisfacen parcialmente su interrogante sobre éste y le abren un camino imaginativo basado en estudios serios. Tatiana Proskouriakoff (1953) realizó varios trabajos de reconstrucciones hipotéticas y es importante mencionar su trabajo tanto por la calidad de su expresión gráfica, como por la seriedad de sus restituciones basadas en el análisis detallado de las huellas arqueológicas. Adicionalmente, todos los libros que tratan sobre arquitectura mesoamericana presentan también magníficos ejemplos de reconstrucciones. (Marquina, 1951; Gendrop, 1973).

En la actualidad la reconstrucción hipotética mediante las herramientas de cómputo orientadas a la creación y al trabajo de imágenes, que llamo “reconstrucción virtual”, abre un nuevo horizonte con un potencial mayor al permitir una reconstrucción hipotética realmente tridimensional, con una precisión que no es alcanzable ni por dibujo ni en maqueta, y con un alto grado de realismo de las imágenes de vistas internas o externas del edificio. Estas ventajas se complementan con todas las técnicas de animación, su paso a video, multimedia y realidad virtual. Es cuando la tecnología, adecuadamente empleada, hace “la historia más accesible”.¹³

La visualización del espacio arquitectónico permite estudiarlo desde el aspecto sensorial. Es cuando las herramientas de cómputo favorecen un nuevo espacio de vivencia que permite visitar en forma remota, sea espacial o temporal, los espacios creados por el hombre viviéndolos como si realmente existieran. Aunque se requiere todavía mejorar la tecnología para poder reproducir la experimentación completa del espacio, las herramientas se perfeccionan continuamente y se puede esperar que en algunos años sea factible hacerlo. La base de esta experimentación será de cualquier forma el modelo tridimensional, donde se registran las hipótesis de conformaciones originales del espacio arquitectónico.

¹³ Expresión retomada de la convocatoria a “The first annual international virtual reality heritage convention” organizada en Bath, noviembre de 1995, por *VR News* y *Pavillions of Splendour*.

Las herramientas usadas para la visualización de monumentos son idénticas a aquéllas que permiten la concepción asistida por computadora, sin embargo la forma de trabajo difiere fundamentalmente. En el primer caso, el objetivo consiste en reproducir con fidelidad una realidad del pasado para entenderla, mientras que en el segundo es una herramienta para la creación donde se permite el desarrollo de la imaginación y de la creatividad.

Otro campo de estudio abierto por la reconstrucción virtual se relaciona con la simulación de fenómenos, como por ejemplo el de la iluminación solar para corroborar teorías arqueoastronómicas. El tiempo puede ser controlado con una serie de variables, y los elementos con los cuales se trabaja: la estructura arquitectónica, el movimiento del sol y la posición de las estrellas tienen definiciones conocidas y por lo tanto modelables. Según la ubicación geográfica, la fecha y la hora, se calculará la iluminación correspondiente. En este sentido Machado (1992) señala “Modelos y simulaciones hacen posible explicaciones, predicciones, deducciones a partir de premisas y experimentos con resultados no siempre esperados”.

Desde hace unos años se han multiplicado reconstrucciones de muy alta calidad como las de la Abadía de Cluny, Karnak, la Frauenkirche de Dresden (Collins *et al.*, 1995), ruinas romanas, cada una con distintos objetivos. En todos estos casos, los resultados obtenidos son espectaculares y se cumple con el objetivo común de ofrecer una visualización de los edificios completos. Se observa cómo cada reconstrucción siguió una metodología de trabajo propia a cada objeto de estudio, según la información disponible y el propósito del proyecto.

En el caso de la reconstrucción virtual de un sitio como el de Cacaxtla, por la escasez de información y la falta de estudios previos, es necesario realizar un fuerte trabajo de análisis que lleva a un mayor entendimiento del espacio arquitectónico antes de su modelado. Por ello, los resultados de la reconstrucción van más allá del espectáculo y pueden llegar a ser múltiples y también incluir la extracción de reglas de diseño y de composición arquitectónica, las cuales son utilizadas en el proceso de reconstrucción.

En la reconstrucción del sitio arqueológico de Cacaxtla se efectuó un estudio completo, desde el levantamiento y el análisis, hasta el modelado y la generación de imágenes. Para poder

presentar hipótesis de configuración de cada fase constructiva se buscó entender el papel de las diferentes estructuras en la conformación de los espacios, cómo fueron decididas y diseñadas por el arquitecto mesoamericano y cuáles eran las reglas de concepción espacial empleadas.

Una de las más importantes premisas es que el análisis debe ser basado sobre datos y realidades, sin ideas preconcebidas. La formación cultural occidental acostumbra a un cierto esquema del uso del espacio, de su concepción y percepción que deben ser descartados al estudiar un sitio mesoamericano. No es posible establecer funciones para cada espacio y tampoco preestablecer la existencia de reglas de composición basadas por ejemplo en el uso de simetrías o módulos. Como se ha mencionado anteriormente, criterios como relaciones cosmogónicas y religiosas fueron a veces determinantes para las tomas de decisión sobre el diseño de las estructuras arquitectónicas.

La importancia de la geometría en el diseño, tan recurrente en la composición occidental, debió ser comprobada antes de emplearse en el sitio de Cacaxtla. La existencia de un conocimiento geométrico utilizado en el diseño ha sido demostrada por ejemplo en el caso de la piedra del sol (Chanfón, 1978). Sin embargo, además que se trata de un elemento escultórico, la amplitud espaciotemporal y cultural del mundo mesoamericano impide llevar reglas de composición encontradas de un sitio a otro, ya que cada uno representa un elemento particular y un eslabón en la evolución cultural. Así, el análisis debe ser basado en la observación de los elementos arquitectónicos del sitio mismo y su estudio con objeto de llegar a deducciones sustentadas.

El objetivo del trabajo que básicamente consiste en una reconstrucción hipotética del sitio de Cacaxtla y la exploración de los recursos de cómputo para este fin, no puede ser deslindado de un estudio de la arquitectura del sitio, sus fases constructivas y reglas de composición. Se busca mejorar el conocimiento sobre el sitio, comprenderlo, y en todo momento distinguir las reconstrucciones sustentadas por datos, de las partes que no contaban con mucha información y pueden caer en lo imaginativo.

VISUALIZACIÓN DE LA ARQUITECTURA HISTÓRICA

De las posibles metodologías

Algunas reconstrucciones por computadora pueden ser comparadas a las realizadas por Hollywood o Walt Disney en sus parques de atracción. Hollywood utilizó reconstrucciones como parte de la escenografía necesaria para películas pseudohistóricas. En este contexto, la arquitectura de una época termina siendo una caricatura de sí misma y es cuando mejor cumple con su objetivo, la materialización de la fantasía. En ningún momento se trata de que el palacio romano sea la reproducción de uno, sino que debe reflejar lo que el espectador mentalmente espera de un palacio romano, llevándolo a “las altas esferas del esplendor” que corresponde a sus ideas preconcebidas. *l'information historique donne dans le sensationnel, le vrai se mêle au légendaire.* (Eco, 1985)

Son reconstrucciones llenas de clichés, donde es válido mezclar expresiones monumentales retomadas de distintas épocas y lugares geográficos, y mientras sus pretensiones se limiten a componer un ambiente para una historia, llegan a cumplir magníficamente su propósito. Sin embargo, caen en la simulación y la falsificación a partir del momento que pueden ser interpretadas como historia misma, lo cual pasa regularmente porque *tout semble vrai et donc tout est vrai* como dice Umberto Eco (*op. cit.*) refiriéndose a las piezas del museo Ripley.

Por ejemplo, podemos imaginar una reconstrucción tomando como base de información, una perspectiva del estado original hipotético de un sitio, encontrada en un libro. Se modela las formas con una serie de aproximaciones, y se aplican acabados retomados de otros sitios. Ninguna de las decisiones adoptadas durante todo el proceso corresponde a un análisis basado en la observación *in situ* de los datos arqueológicos, de su comparación y estudio, y se pierde toda la aportación que el mismo proceso aporta al estudio de la arquitectura para conservar como único fin la obtención de un modelo tridimensional. La herramienta de cómputo, en vez de ser un apoyo para pensar, se vuelve una rutina técnica y el objeto final es una copia poco histórica.

Las formas de reconstrucción definidas “a la manera” del arqueólogo y del arquitecto coinciden en la búsqueda de la obtención de una representación final fidedigna, seria y fundamentada en el estudio exhaustivo de todos los datos proporcionados por el sitio arqueológico. Su fin consiste en el estudio del espacio arquitectónico y su proceso de producción para aumentar el conocimiento sobre éste; la reconstrucción es una consecuencia del proceso. Atrás del resultado subsiste una práctica dinámica de investigación mientras que en el caso anterior, solamente existe el resultado. Como lo menciona Machado (1992) refiriéndose a Renaud, el interés de la imagen obtenida, o en nuestro caso la reconstrucción, radica en su “morfogénesis”, “El proceso es, por tanto, más importante que la imagen propiamente dicha”.

Desde la visión arqueológica, se parte de un levantamiento extremadamente preciso de las estructuras arquitectónicas y de los desniveles para restituir las partes faltantes. Se podría hablar más de restitución que de reconstrucción arquitectónica. En caso de existir irregularidades, como por ejemplo pequeñas desigualdades entre dos elementos que en lo general fueron pensados como elementos simétricos, estas diferencias se respetan.

En el caso de la reconstrucción arquitectónica, después del levantamiento y del análisis de todos los datos, se busca reencontrar la lógica de diseño del constructor original, y se idealiza su intención. Por ejemplo, en el caso de una columnata, las medidas de las pilastras se promedian cuando se puede suponer y corroborar una intención original de regularidad. Esta metodología podría acercarse a la de Viollet-le-Duc en el siglo XIX, pues requiere de constantes análisis y deducciones y su fin no reside solamente en obtener un objeto sino también en la extracción de una serie de reglas y conocimientos. Adicionalmente, busca idealizar el edificio.

Cuando Viollet-le-Duc (1854) define la restauración como:

Restaurer un édifice, ce n'est pas l'entretenir, le réparer ou le refaire, c'est le rétablir dans un état complet qui peut n'avoir jamais existé à un moment donné..

Su postulado se inserta en la importancia dada al objeto arquitectónico considerado como un ejemplar de las creaciones del hombre, realizado en un momento preciso de la historia vista como un proceso evolutivo (Lucet, 1995). Para entender el significado del monumento como

hecho histórico en el que se cristalizan y expresan una estructura social, un alcance técnico y el estado de una sociedad en un momento dado, la restauración del edificio debe devolverle un estado "ideal". Esta visión de la restauración, como él mismo lo dijo, es difícilmente aplicable debido a que los monumentos han tenido transformaciones en el transcurso del tiempo. Aplicarla a un sitio arqueológico obligaría al arqueólogo o restaurador a escoger una época histórica del edificio y por ende a sacrificar a otras. Sin embargo los medios virtuales son herramientas idóneas, pues permiten reconstruir cada una de las fases constructivas, es decir, favorecen "vivirlas", sin tener intervención alguna sobre el sitio.

Si la reconstrucción arquitectónica es menos fiel al estado actual del sitio que la restitución arqueológica, posee el interés de una búsqueda de las reglas subyacentes de composición y de tomas de decisiones. Según Eiteljorg¹⁴, la reconstrucción debería llevarse a cabo solamente después de un levantamiento preciso, sobre la base de una información registrada en forma rigurosa, exhaustiva y ordenada de tal forma que se pueda agrupar en forma selectiva. El registro corresponde a la documentación que el arqueólogo debe hacer de un sitio. No se debe buscar la perfección sino completar las partes destruidas. Esta metodología tiene la limitante de separar las dos actividades, por una parte se modela el levantamiento, -actividad que generalmente no va acompañada por el estudio de las medidas y del diseño de las construcciones- y después se terminan las construcciones. Mientras que en la reconstrucción arquitectónica se analizan las medidas para generar directamente el modelo tridimensional correspondiente al estado original, como si se construyera sobre un terreno desnudo.

Estas dos metodologías, por su variado proceso, llevan a resultados distintos. Sin embargo, coinciden en la aportación de conocimientos en torno a la historia de la arquitectura. En ambos casos, el estudio se fundamenta en el dato arqueológico y la visualización deseada tiene como criterio de base la búsqueda de un realismo lo más apegado posible al sitio original. No se

¹⁴ Correo del 25 de julio de 1996. Nick Eiteljorg es el director del *Center for the Study of Architecture* en Bryn Mawr, organismo dedicado al estudio del uso del cómputo en arqueología. Mantiene desde hace varios años, una lista de interés en Internet sobre este tema.

trata de interpretar una cultura en términos de grandeza o de miseria ni tampoco de restringir el objetivo a la sola obtención de una imagen histórica resultante del análisis del dato histórico. Cuando la visualización de la arquitectura se lleva a cabo respetando estos principios, es una herramienta de investigación que permite entender un concepto espacial.

En el caso de la reconstrucción hipotética del sitio de Cacaxtla, la metodología utilizada se integra en el marco de “a la manera del arquitecto”, donde se idealiza el modelo después del análisis de las huellas arqueológicas.

Antecedentes de reconstrucciones virtuales de monumentos

Una de las primeras reconstrucciones por computadora de un monumento fue mostrada en 1984 por la BBC (Collins, 1995). Había sido realizada en 1980 por Woodwark y mostraba un baño romano. A partir de los noventa, las reconstrucciones virtuales empezaron a multiplicarse, mejorándose su realismo.

Una de éstas fue realizada sobre el sitio arqueológico de Karnak. Los arqueólogos habían elaborado una base de datos para el registro gráfico de la información y la compañía de luz y fuerza de Francia (EDF) decidió poner a prueba sus computadoras al modelar una posible reconstrucción de algunos de los edificios. En forma anecdótica se cuenta que no se había pensado que las computadoras pudieran sufrir tanto del manejo gráfico al cual fueron sometidas.

En 1993, fue presentada en *Computer Application in Archeology* la reconstrucción virtual de la Frauenkirche de Dresden. Esta iglesia, construida entre 1726 y 1743 era “el más importante edificio religioso del protestantismo alemán y una obra maestra de la arquitectura alemana” (Collins, 1995). “El 15 de febrero de 1945, dos días después del bombardeo de Dresden, la construcción, debilitada por las deflagraciones, se derrumbó. Las ruinas se volvieron el símbolo de la destrucción de Dresden y siempre se pensó en su reconstrucción para combatir este recuerdo, por la belleza de la iglesia y por su importancia en el contexto cultural de la ciudad”. Hace unos años, fue organizada la “Asociación para la reconstrucción de la Frauenkirche de Dresden”, con el objetivo de recaudar fondos y efectuar la reconstrucción. Para ello, se cuenta

multimedia. En uno de sus estudios, las medidas resultantes del levantamiento de Santa Maria Novella fueron convertidas al sistema de medidas vigente en Mantua en el siglo XV; las proporciones del edificio fueron analizadas y comparadas con las de otras construcciones de Alberti y con su ideal de arquitectura expresado en sus escritos. Sobre esta base se efectuó una modelación tridimensional. El resultado permitió analizar la teoría de las proporciones en el Renacimiento y los procesos de diseño.

En Marsella, el grupo del GMSAU parte del mismo principio, cuando investiga la arquitectura romana. Añade mayor precisión en el levantamiento, ordena cada uno de los elementos en bases de datos, compara los modelos teóricos con los encontrados y propone hipótesis de reconstrucciones. La sistematización de la información permitirá en el futuro encontrar grandes líneas de evolución en los diseños.

CACAXTLA

El sitio arqueológico de Cacaxtla se encuentra ubicado en el altiplano mexicano en el estado de Tlaxcala, cerca del sitio arqueológico de Cholula (Figura 19). Aun cuando se sabía de su existencia por la referencia que hace Muñoz Camargo en el siglo XVI en *Historia de Tlaxcala* y por los trabajos de Pedro Armillas en los años 40, fue hasta 1975 que empezaron los trabajos de excavación bajo la coordinación de Diana López de Molina, después del descubrimiento de pinturas murales por campesinos de la zona. (Diana López de Molina y Daniel Molina, 1976).

No se conoce con certeza el papel de Cacaxtla dentro de la historia mesoamericana y los pocos datos publicados son contradictorios. Se pensó inicialmente que su construcción se debía a la cultura olmeca-xicalanca pero esta hipótesis es cada vez más discutida. Así que la importancia de Cacaxtla dentro de la economía local y su desempeño durante la caída de Teotihuacan han sido el tema de varias teorías.

con una importante documentación, pinturas del siglo XVIII, fotografías, documentos históricos y dibujos arquitectónicos detallados realizados durante la restauración realizada entre 1938 y 1943. La reconstrucción por computadora y la realización de un video tuvieron varios objetivos, uno de ellos era servir de comercial para recaudar fondos, al mostrar una imagen de calidad con un alto grado de realismo del esplendor del edificio, lo cual sensibilizó a la población y a los posibles mecenas. Adicionalmente permitió obtener una imagen precisa de las volumetrías del espacio y de sus componentes, para así facilitar el trabajo de reconstrucción, volviéndose una herramienta importante para los arquitectos encargados de la obra. De la misma época, es una reconstrucción virtual de la Abadía de Cluny.

Siguiendo esta tendencia mundial, en un congreso sobre cómputo en arqueología organizado en marzo de 1998 en Barcelona, el espacio principal fue dedicado a la realidad virtual entendida como la reconstrucción virtual, y se organizó un espectáculo de animaciones sobre este tema. Lo que en sus orígenes competía exclusivamente a las grandes compañías y era realizado con fines de prestigio, se está volviendo en la actualidad una herramienta adicional para el estudio del pasado y su difusión.

Como se ha mencionado anteriormente, la visualización establece un nuevo campo de estudio y análisis; sin embargo en el proceso seguido para llegar a un modelo puede existir un proceso dinámico que por sí mismo aporta nuevos conocimientos.

Por ejemplo, Tavernor (1995) propone una nueva metodología para la historia de la arquitectura y con ella entender el proceso del diseño subyacente en los monumentos y las intenciones e ideas atrás de la apariencia de los edificios. Partiendo de levantamientos fotogramétricos precisos, los correlaciona con datos históricos como “dibujos, descripciones contemporáneas, teoría escrita y antecedentes”. Con ello restituye edificios modificados, incompletos o parcialmente destruidos. En sus investigaciones sobre Alberti compara las teorías con las prácticas de éste, sabiendo que no tuvo el tiempo de terminar ninguno de sus edificios y que éstos fueron modificados por los arquitectos posteriores. Así, Tavernor propone un método para “reconstruir las intenciones de Alberti” además de exponerlas mediante técnicas de



Figura 19. Ubicación del sitio arqueológico de Cacaxtla.

Periodo de ocupación

La ocupación del sitio abarca el primer milenio de nuestra era tomando en cuenta que las fechas de análisis de carbón flúctuan de 91 hasta 875 con dos momentos de ocupación más intensiva que se ubicarían alrededor de 400-600 y sobre todo 600-850, época de esplendor del sitio según Daniel Molina Feal (1977). Sin embargo existen evidencias de ocupación anterior y posterior a estas fechas. En la época de la conquista, el sitio tiene ya varios siglos de desocupación, y habría sido abandonado alrededor del año 1000. Así que en relación con la cronología de ocupación en la zona de Tlaxcala establecida por García Cook, Cacaxtla tendría una primera época importante en la segunda mitad de las fases Tenanyetac (100-650) y se

transforma en un centro fortificado en la fase Texcalac (650-1100). (Marta Foncerrada de Molina, 1976)

Los únicos datos publicados consisten en los análisis de carbono del dintel de una puerta tapiada del edificio A de 755 ± 75 (Daniel Molina Feal, 1977), el cual puede corresponder a material de reuso de una época anterior; una muestra de carbón de la capa 18 del pozo 8 excavado a partir del piso del edificio B, 744 ± 91 ; una muestra de un "depósito primario de restos carbonizados procedente de material vegetal que fue quemado como ofrenda posiblemente cuando fuera tapiado el mural de La Batalla y/o cuando toda la plaza frente a éste es rellenada, el cual nos brindó una fecha de 792 ± 83 " indica la clausura de este mural (Andrés Santana Sandoval y Rosalba Delgadillo Torres, 1990). Son muy pocos datos y aparentemente todas las demás fechas se deducen estableciendo relaciones temporales con estos elementos. Sin embargo, al no existir una visión global de la evolución arquitectónica del sitio, quedan ambiguas. Por ejemplo, Daniel Molina (1977) fecha el mural de La Batalla en 655, Sonia Lombardo en 650-700 (1986) y Marta Foncerrada en 750-800 (1982).

Al estudiar posteriormente las etapas constructivas, se verá en qué medida las fechas presentadas por los distintos autores pueden ser relacionadas con los resultados de este estudio.

Estos escasos datos permiten confirmar que a pesar de su ocupación temprana, el sitio sería principalmente del Clásico Tardío y Epiclásico, épocas que corresponden a la caída de Teotihuacan y al fortalecimiento de Cholula y Xochicalco, y quizá al inicio de Tula (Marta Foncerrada de Molina, 1980). Después de la caída de Teotihuacan, existe una fase de transición donde el poder centralizado de la metrópoli ha desaparecido, surgen nuevos poderes, se modifican las rutas comerciales y se establecen nuevas relaciones de fuerza.

Los constructores de Cacaxtla

Tradicionalmente, Cacaxtla ha sido definido como un sitio olmeca-xicalanca, basándose en la información de Muñoz Camargo.

“y los olmecas y xicalancas pasaron adelante.... hasta que hicieron su asiento y fundaron donde está ahora el pueblo de Santa María de la Natividad, y en Huapalcalco junto a una Ermita que llaman de Santa Cruz, que los naturales llaman Texoloc, y Mixco, y Xiloxochitla donde está la Ermita de San Vicente, y el cerro de Xochitecatl y Tenayacac donde están dos ermitas a poco trecho una de otra que se llaman de San Miguel y de San Francisco.... y aquí en este sitio hicieron los olmecas su principal asiento y poblaron, como el día de hoy nos lo manifiestan las ruinas de sus edificios” (Muñoz Camargo, 1995) hasta que la región quedara conquistada por los chichimecas.

Sin embargo la fecha de llegada de los olmeca-xicalancas a la zona, no parece corresponder con la época de esplendor del sitio definida por Daniel Molina, *i.e.*, 600-850. Jiménez Moreno ubica la conquista de Cholula por los olmeca-xicalancas entre 750 y 800 y según León Portilla, los olmeca-xicalancas habrían llegado del golfo en 831 (Andrés Santana Sandoval y Rosalba Delgadillo Torres, 1990). Tres posibilidades quedan:

- el sitio es olmeca-xicalanca y este grupo tiene una presencia en la zona anterior a la definida por los historiadores;
- la época de esplendor del sitio es posterior a la definida por Daniel Molina;
- el sitio no es olmeca-xicalanca en su época de esplendor, pero puede serlo en fases posteriores.

La hipótesis de la ocupación del sitio por los olmeca-xicalancas resulta en una solución atractiva para resolver el problema de la pluralidad de estilos presentes en Cacaxtla, principalmente en sus pinturas murales y bajorelieves donde aparecen rasgos identificados con la cultura maya y con la teotihuacana. Los olmeca-xicalancas vendrían de la costa meridional de la costa del Golfo, es decir de Potonchán (Frontera) en el litoral de la Chontalpa tabasqueña (Marta Foncerrada, 1983). Este grupo habría recibido influencia de las poblaciones ubicadas a lo largo del río Usumasinta, al establecer relaciones comerciales con ellas, lo cual explicaría el carácter maya de las pinturas. Desde Chontalpa se habrían establecido importantes relaciones comerciales con Teotihuacan y, por necesidades comerciales, los olmeca-xicalancas pudieron haberse

establecidos en el sitio durante el Clásico como punto sobre la ruta comercial que unía Teotihuacan con el Golfo de México, en esta época la cultura se habría “teotihuacanizado”. Posteriormente habría participado en el colapso de la metrópoli. Cuando se desmorona el imperio de Teotihuacan, el grupo olmeca-xicalanca del área maya emprende un fenómeno de expansión, conquista Cholula y se establece en el valle poblano-tlaxcalteco. Esta hipótesis tiene la ventaja de conciliar todas, el sitio sería olmeca-xicalanca en su tiempo de esplendor sin que este grupo ocupara toda la región, y en el epiclásico existe un cambio por la expansión de la parte olmeca-xicalanca de la zona maya. Las dos ramas se vuelven a encontrar en el sitio. Es un cambio acompañado de una cierta continuidad.

En realidad, resolver esta enigma implica investigaciones más amplias que el sólo análisis arquitectónico que se lleva a cabo en esta tesis o el estudio estilístico de las pinturas. Estudios de cerámica para establecer filiaciones culturales y muestras de carbón para obtener fechamientos más precisos de cada una de las fases constructivas permitirán acercarse a una solución.

Descripción general del sitio

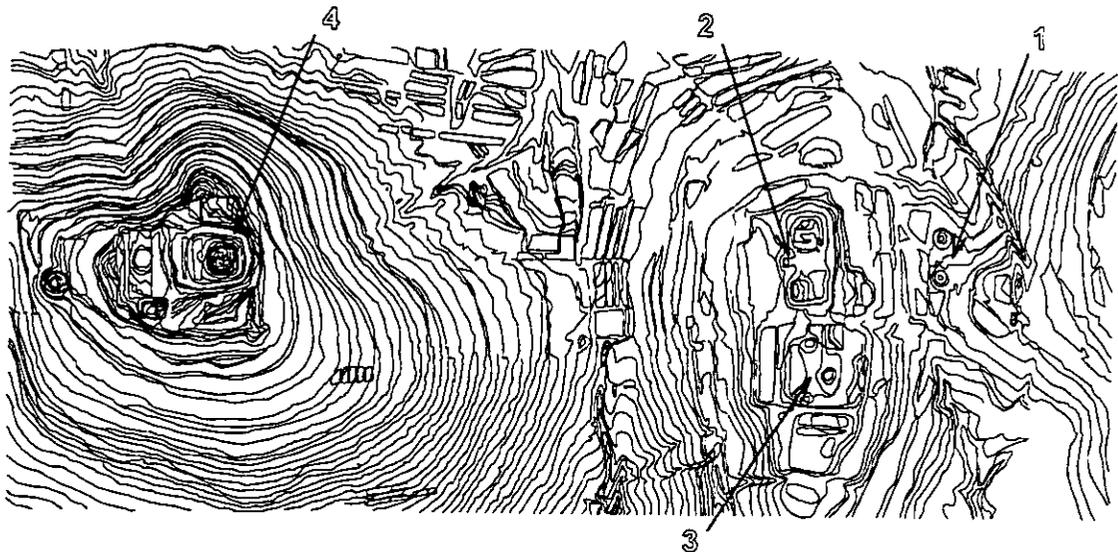


Figura 20. Plano general de la zona arqueológica. 1: Las dos pirámides de acceso - 2: El Gran Basamento - 3: Plaza de las tres pirámides - 4: Xochitecatl. (dibujo Lupone-Lucet)

El sitio está compuesto de varias secciones: el “Gran Basamento”, del lado sur, la Plaza de las Tres Pirámides y del lado oriente en el camino de acceso a las estructuras principales, dos pequeñas pirámides (Figura 20).

Bajo la vegetación que rodea el “Gran Basamento” se ha detectado la presencia de pisos estucados por ello, se puede suponer que el sitio tenía una extensión mayor a la excavada en la actualidad. Muñoz Camargo menciona la presencia de fosos defensivos que estarían al norte y al sur de las dos grandes plataformas. (Diana López y Daniel Molina, 1976)

“... como el día de hoy nos lo manifiestan las ruinas de sus edificios, que según las muestras fueron grandes y fuertes; y así las fuerzas y barbacanas, albarradas, fosas y baluartes, muestran indicios de haber sido la cosa más fuerte del mundo, y ser obrada por mano de innumerables, y gran copia de gentes la que vino a poblar, porque donde tuvieron su principal asiento y fortaleza es un cerro o peñol, que tiene casi 2 leguas de circuito, y en torno de este peñol, por las entradas y subidas, antes de llegar a lo alto de él tiene cinco albarradas y otras tantas cavas y fosas de más de 20 pasos, y la tierra sacada de esta fosa servía de bastión o muralla de un terrapleno muy fuerte, y la hondura de las dichas cavas debía de ser de gran profundidad, porque con estar como están arruinadas de tantos tiempos atrás, tienen más de una pica en alto; porque yo he entrado dentro a caballo de algunas de ellas, y de industria las he medido, que un hombre a caballo y con una lanza aún no alcanza a lo alto en muchas partes, con haberse tomado a henchir de tierra con el tiempo y con las avenidas de aguas de más de 360 años a esta parte: las cuales fosas y albarradas ciñen toda la redondez del cerro, que no debió de ser de poca fuerza ni menos reparo en aquellos tiempos”. (Muñoz Camargo, 1995)

Estos fosos corresponderían a las últimas fases constructivas de Cacaxtla, cuando surge la necesidad de protegerse contra posibles invasores.

El trabajo de reconstrucción realizado en esta tesis corresponde a la parte superior del “Gran Basamento”. Es la parte principal del sitio y ha sido el más trabajado a nivel arqueológico. De hecho, en la mayoría de los textos, al referirse al sitio de Cacaxtla, se entiende esta parte del sitio, y a continuación se hablará exclusivamente de esta parte.

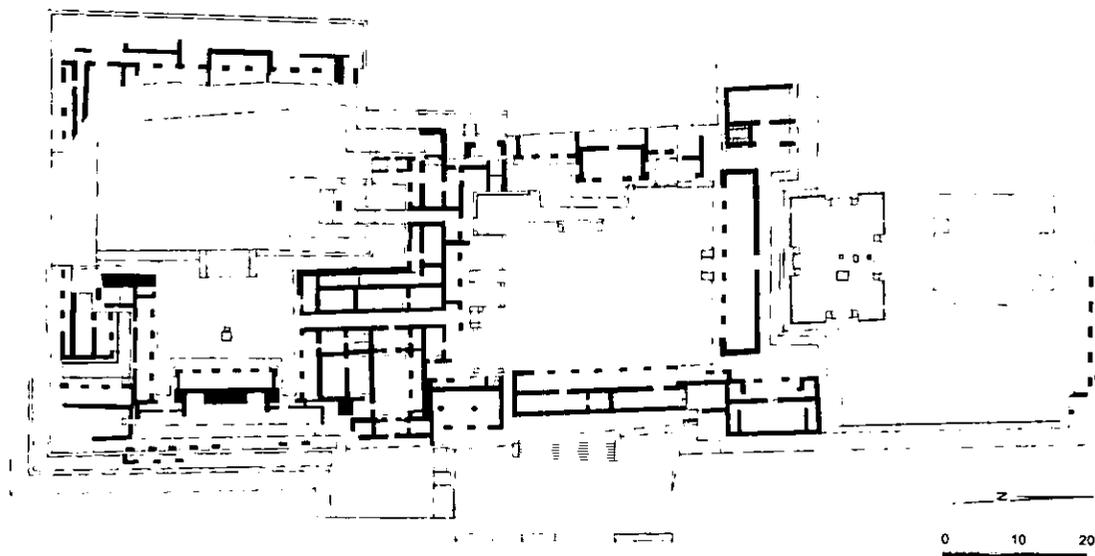


Figura 21. Digitalización del plano general del "Gran Basamento" (Lucet, Lupone).

El "Gran Basamento" está compuesto de varios taludes y en su parte superior, de una serie de recintos (Figura 21). Presenta elementos constructivos superpuestos, indicadores de múltiples modificaciones. Cuartos enteros quedaron enterrados para la construcción de estructuras superiores. En algunos casos su altura original fue conservada, y solamente fueron quitados los techos y se construyeron muros de contención antes de rellenar de tierra. En otros casos los muros fueron rebajados a su mínima expresión, según las transformaciones deseadas. Muchas estructuras siguen aparentemente enterradas "después de cavar pozos de más de 16 m de profundidad, aún no se haya topado con roca, sino que se hayan encontrado cuando menos cuatro pisos de construcción que parecen datar del periodo clásico" (Debra Nagao, 1989). Si en términos generales se mencionan etapas constructivas, lo que se observa en realidad es una evolución constante del sitio. En las transformaciones, elementos anteriores eran reutilizados con o sin modificaciones en la nueva configuración del sitio o podían quedar enterrados. Los elementos que estorbaban eran destruidos. Algunas de las modificaciones son menores, mientras que otras implicaron una reestructuración masiva del sitio. Adicionalmente, la presencia de múltiples

Usumacinta y en fuerte contacto con Teotihuacan. (Sonia Lombardo de Ruíz, 1986). Marta Foncerrada habla del desarrollo de un estilo local y de una escuela local de pintura (1976). Algunos autores explican el hecho diciendo que este grupo de origen maya, al estar ubicado en una zona donde esta escritura no podía ser entendida no la habría incluido en sus murales. En contraparte, otros piensan que los habitantes de Cacaxtla contrataron pintores del área maya para realizar las pinturas sobre pedido (Santana, 1990). De cualquier forma, se puede afirmar que los pintores eran mayas lo cual no quiere decir que los que pidieron el trabajo lo fueran.

Debra Nagao (1989) hace notar que el documento tanto escrito como pictórico no puede ser interpretado solamente en su expresión directa, sino que debe interpretarse el mensaje que los constructores quisieron expresar. Los monumentos podrían expresar más una imagen política que una realidad. La autora encuentra que si se estudian más en detalle los diferentes elementos de arquitectura, pintura y cerámica, la componente puramente teotihuacana es muy escasa. El talud de los edificios tiene proporciones parecidas a los de Xochicalco y Tula; los paneles de los tableros, las plataformas de Venus y las Águilas son elementos que aparecen en Chichen-Itzá y el edificio B de Tula. El estilo dominante en Cacaxtla será el maya para los monumentos públicos, mientras que los elementos portátiles serían de Oaxaca y la costa del Golfo. Sería posible que la adopción de un estilo tan opuesto al teotihuacano fuera una opción deliberada, para mostrar la independencia o rechazo de los cacaxtlecos a la metrópoli, en una época donde Teotihuacan ha perdido su fuerza dominante.

METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL DEL SITIO

En un primer trabajo se había realizado un modelo tridimensional del estado actual del sitio de Cacaxtla (lámina 2) sin analizar las etapas constructivas y como forma de registrar la arquitectura de un sitio (Lucet, Lupone, 1993; Lupone, en proceso). Se demostró que el uso de metodologías computarizadas proporciona una forma precisa y completa de registrar las estructuras existentes de un sitio arqueológico, con la ventaja de visualizarlas desde cualquier

escaleras muestra que distintos niveles coexistieron y que no es posible definir la secuencia constructiva basándose únicamente en los niveles estratigráficos.

Cacaxtla presenta elementos arquitectónicos y pictóricos, característicos de varias culturas sin que este fenómeno se pueda relacionar con ocupaciones del sitio específicas ya que son entremezclados. Esta pluricidad de estilos le da una particularidad y complica la afiliación del sitio a una cultura particular. Por esto ha sido clasificado por varios historiadores como un sitio ecléctico ya que en su arquitectura, pintura mural y estucos existen elementos de sitios como Monte Albán, Tajín, la zona maya y Teotihuacan. (Kubler, 1978)

La particularidad sobresaliente de Cacaxtla consiste en su riqueza en pintura mural, tanto por su cantidad, su excelente estado de conservación ya que fue cuidadosamente enterrada antes de la construcción de las últimas etapas del sitio, como por su calidad pictórica y su temática. La mayoría de los estudios relativos al sitio están generalmente enfocados al estudio de sus murales y existen muy pocos en relación con su arquitectura o cerámica. De hecho los únicos artículos que mencionan datos arquitectónicos son los informes de trabajo de sus primeros arqueólogos.

Según Diana López de Molina, si se estudia el sitio sin tomar en cuenta la pintura, se llega a la conclusión que éste está muy marcado por la influencia teotihuacana. Esta observación se basa principalmente en la presencia de los tableros taludes sobre los edificios y no en su topología. De lo contrario la configuración alargada de los pórticos como los edificios B y D, así como los pequeños edificios con pórtico y aposento como los edificios A, C y F son muy característicos de Palenque y del área maya. (lámina 1)

Sorprende que en la pintura se encuentre un estilo pictórico que recuerda el área maya por sus curvas, la proporción humana y algunos símbolos como el bastón de mando de los personajes del edificio A, pero no aparecen los elementos de escritura que siempre acompañan las representaciones de esta área. Al contrario, se nota la presencia de elementos teotihuacanos como los símbolos de mano y un marco alrededor de la pintura. Existen varias explicaciones. Es posible que la diversidad de estilos y símbolos expresados en la pintura se deban a la composición étnica del propio grupo que habitó Cacaxtla, si fueron olmeca-xicalancas con toda la influencia del

punto. Adicionalmente, el levantamiento puede ser actualizado facilmente en la medida que se realizan nuevas excavaciones.

Su fin era esencialmente descriptivo, y al extender el proyecto a una reconstrucción virtual se tuvo que observar en forma más precisa las distintas huellas arquitectónicas; analizar la información para integrar cada elemento en un todo congruente y entender el proceso de transformación del sitio.

Las fuentes de información disponibles fueron los estudios publicados por los arqueólogos, aun cuando son poco precisos, y sobre todo la observación directa *in situ*. El problema de no contar con todo el historial de las excavaciones implica que se desconoce si algunos elementos superiores fueron eliminados para dejar al descubierto capas inferiores; aunque en general los arqueólogos son cuidadosos en dejar toda la información que permita entender la historia de un sitio.

El levantamiento

En una primera fase se estudió la factibilidad de reconstruir el sitio utilizando el modelo tridimensional descriptivo del estado actual del sitio. Este modelo había sido realizado utilizando una planta de conjunto a escala 1:250 proporcionada por los arquitectos del sitio, único documento de levantamiento disponible, el cual fue digitalizado con tableta. Sin embargo, rápidamente se hizo evidente *que una de las herramientas más importantes para llevar a cabo el análisis del sitio era mediante el estudio de las medidas de los elementos*. A escala 1:250 un muro de 40 cm está reproducido con 1.6 mm mientras que un muro de 60 cm con 2.4 mm, suponiendo que el dibujante fue extremadamente preciso. La diferencia es mínima en el plano cuando en la realidad indica una distinción fundamental: en el segundo caso el muro pudo ser un muro estructural, mientras que el primero sería un muro divisorio. Por otra parte las diferencias en las medidas pueden expresar técnicas constructivas que corresponden a distintas épocas históricas. Se podía también suponer que las medidas dadas por ejemplo a las columnas y entrecolumnas hubieran evolucionado con el tiempo, lo cual consistiría un dato muy decisivo para correlacionar

en el tiempo distintas estructuras. Así que se tomó la decisión de volver a realizar el levantamiento. Fue realizado con cinta métrica metálica y para el cálculo de los ángulos de los taludes se construyó una herramienta especial para medir su inclinación.

El levantamiento con fines de reconstrucción lleva características diferentes del levantamiento arqueológico pues lo que se busca es una representación final del conjunto arquitectónico “acabado”.

- *Puede dejar a un lado los elementos que nunca conformaron el espacio arquitectónico*, como los muros de contención que fueron construidos solamente al momento de enterrar un conjunto y de rellenarlo.
- Requiere ser particularmente cuidadoso en la búsqueda de la información que indican los *objetos en su fase “completa”*. Por ejemplo, no existe interés ninguno en registrar la extremidad de un muro derrumbado. Al contrario se deben buscar las huellas que indican cuáles eran sus límites reales.
- *Se simplifica la información*. Una característica de la arquitectura de Cacaxtla como se puede ver en el levantamiento inicial del sitio (Figura 21), es su ortogonalidad y la búsqueda de ángulos rectos por parte de los constructores, así que se asume que los ángulos del sitio fueran rectos.
- *Las medidas incluyen el acabado de los elementos*. En Cacaxtla, todas las estructuras fueron recubiertas de una o varias capas de estuco y en muchos casos las esquinas de los muros están muy deterioradas y éstas llegan a faltar. En todo caso se buscaron sus huellas en piso o se añadió su espesor a la medida.
- Se deben buscar con detenimiento los elementos que puedan *ser indicadores de modificaciones* de las construcciones del sitio como por ejemplo:
 - *Varias capas de acabados y modificaciones de éstos, i.e.*, cuando un guardapolvo (franja de estuco pulido blanco o rojo en la parte inferior de los muros) fue después recubierta de un estuco rugoso.

- *Fisuras en pisos.* Si algunas son debidas al asentamiento de las construcciones, al deslizamiento de estructuras o a los derrumbes; otras, en pisos, han mostrado ser indicadores de superposición de estructuras y de muros enterrados o de modificaciones importantes en la conformación de las plataformas ubicadas a distintas alturas.
- *Acabados de estuco tapados por otro muro.* Cuando un muro fue extendido o una columnata rellena para convertirse en un muro, no se quitaban los estucos, solamente se añadían adobes y se volvía a aplanar el exterior para que no se viera la transformación, así los acabados quedaron atrapados en la nueva estructura y son una indicación muy importante al momento del análisis de las transformaciones.
- *El levantamiento* no solamente debe ser descriptivo del estado actual sino *que debe estar acompañado en permanencia de análisis* para entender lo que se registra sin perder de vista que el objetivo final es una reconstrucción virtual del sitio. La búsqueda de una explicación de los eventos encontrados lleva al planteamiento de hipótesis y a la búsqueda de elementos que la pudieran corroborar.

Además de obtener control sobre las medidas, el levantamiento realizado con esta dinámica obliga a observar y en muchos casos darse cuenta de detalles e información que a primera vista habían quedado inadvertidos, dada la multitud de elementos que distraen el ojo. Esta información nunca habría aparecido si se hubiera dividido el trabajo encargando el levantamiento a un grupo, el análisis a otro y el modelado a un tercero. Como dice Carter (1993), el arqueólogo que describió la tumba de Tutankhamón: “En toda excavación se presentan constantemente enigmas y problemas y sólo estando sobre el terreno, mirándolo desde todos los puntos de vista y escudriñándolo bajo toda clase de iluminaciones podrá uno llegar a solucionar algunos de ellos”.

Existen formas de levantamiento mucho más rápidas y probablemente más precisas como son las que usan tecnologías basadas en teodolitos de láser o fotogrametría, sin embargo requieren de un equipamiento con el cual no se contaba.

La metodología de análisis

Dada la complejidad del “Gran Basamento” y su extensión, para llevar a cabo el proyecto de reconstrucción se realizó un primer análisis para dividir el conjunto del sitio en pequeñas unidades, que pudieran ser analizadas en forma independiente (lámina 3). De hecho resulta más manejable trabajar al nivel de elementos sencillos para estudiar su conformación, su papel en la construcción y en la configuración del espacio, así como sus transformaciones en el tiempo. De esta forma el conjunto del sitio fue dividido en entidades que fueron escogidas cuando espacialmente podían ser definidas como “edificios” (edificio A, B, C ...) o en algunos casos “conjuntos” (lado norte del sitio). Para cada entidad se tomaron las medidas de los elementos que la componen, se observaron el estado de las estructuras y se buscaron elementos que pudieran indicar sus modificaciones en el tiempo. En el caso de conjuntos tales como el edificio E (13) y el talud piramidal I (12), se observa que éste último corresponde a una plataforma que enterró totalmente al primero. Son dos elementos que no coexistieron, por lo tanto se estudiaron en forma totalmente independiente.

La reconstrucción digital de los edificios empezó con los que parecían más sencillos de analizar. Es decir con aquéllos que presentan un estado actual bastante completo y son edificios compuestos de pocos cuartos; éstos fueron los A (4), B (5) y C (6). Gracias a estas construcciones fue factible proponer una altura de los edificios, entender la morfología de los tableros-taludes de las esquinas y muros laterales de los edificios, así como el sistema constructivo. Esta metodología que consiste en ir de lo más sencillo a lo más complejo permitió una mejor aprensión de las características arquitectónicas del sitio, entender parte de su lógica y extraer reglas que pudieron ser extrapoladas a construcciones de las cuales quedan pocos elementos.

Cada edificio estudiado como elemento aislado en sus distintas etapas constructivas fue confrontado a las construcciones que lo rodean para poder establecer relaciones temporales con las demás construcciones, también en sus distintas conformaciones y etapas históricas. Para realizar estas relaciones, las diferentes fases históricas de las entidades fueron manejadas como si

- ¿Cuándo y dónde se utilizan los guardapolvos blancos y rojos?
- Las plataformas de un escalón de altura sobre las cuales descansan los edificios no están siempre presentes. ¿Porqué?
- ¿Cuáles son los factores que determinan el uso (o no uso) de los tablero-taludes?
- ¿Cuál es la lógica del diseño de los pórticos? ¿Cuántas columnas tienen? ¿Cuál es la relación entre las columnas y las entrecolumnas? ¿Se pueden observar medidas estándares? ¿Fueron cambiando con el tiempo?
- ¿Existen medidas estandarizadas de los muros? ¿Pudieron variar con el tiempo?
- ¿Dónde se ubican las puertas?
- ¿Cuál es la topología general de los edificios?
- ¿Existe un uso de los ejes de simetría?
- ¿El diseño de las plazas corresponde a alguna geometría?

Finalmente con la información de las etapas constructivas y el conocimiento de algunas reglas se buscaron configuraciones de conjunto.

CARACTERÍSTICAS DE LA ARQUITECTURA DE CACAXTLA

Los acabados de las estructuras y los guardapolvos

Cada una de las características del sitio debe ser considerada y analizada para tratar de extraer alguna información que pudiera ser útil en el estudio de las etapas constructivas y para fines de la reconstrucción. En este sentido, adicionalmente a las fisuras, los acabados atrapados en las estructuras y las superposiciones de estructuras; el estudio de los acabados finales de los elementos arquitectónicos mostró también ser una fuente importante para extraer reglas sobre el pensamiento de diseño del constructor mesoamericano, y entender la arquitectura del sitio.

Los grandes taludes, forrados de piedra caliza recibieron una lechada de cal, mientras que todos los edificios tanto en su parte interior como exterior estaban estucados. El estuco era pulido,

fueran construcciones distintas, así el edificio A se convirtió en los edificios A1 y A2 (edificio A en su primera y segunda configuración).

Entre dos construcciones, los grados de relación temporal pueden ser definidos de las siguientes maneras:

- coexistieron en un momento dado;
- no coexistieron.

En el caso de una posible coexistencia de dos estructuras se intentó entrar en más detalle:

- fueron construidas y enterradas en las mismas fechas (su tiempo de vida es el mismo);
- una fue construida después y enterrada antes que la otra (el tiempo de vida de una estructura está totalmente incluido dentro del tiempo de vida de la otra);
- una fue construida antes y enterrada antes que la otra (tiempos desfazados);
- fueron construidas en el mismo momento y dejaron de existir en diferentes épocas;
- fueron construidas en distintas épocas y enterradas al mismo momento.

Sin embargo, en la mayoría de los casos no fue posible llegar a este nivel de precisión.

Se buscaron también algunas de las reglas de diseño o constructivas que pudieron ser seguidas por los constructores. Definir estas reglas contempla varios objetivos. Sirve en el análisis de las etapas constructivas; conduce a las hipótesis de reconstrucción para completar o incluir nuevos edificios; y aporta nuevos conocimientos sobre las normas de diseño de la cultura cacaxtleca. En realidad, la presencia de una característica en varios elementos, no implica que subsistía en los elementos destruidos, siempre pudieron existir excepciones; sin embargo se trata de proponer hipótesis de reconstrucción y fundamentarlas sobre alguna base. La única forma de hacerlo consiste en asumir la existencia de una continuidad entre las distintas etapas que se manifiesta en una persistencia de las formas.

Algunas de las preguntas fueron:

- ¿Cuáles son los acabados de las estructuras? ¿Existe alguna lógica en su uso? ¿Ésta se fue modificando con el tiempo?

de color blanco o rojo en el caso de los guardapolvos; en general rugoso en las partes verticales y liso en las zonas horizontales, probablemente para facilitar la dispersión del agua. En algunos casos, como el muro de fondo del edificio A (4) y el cuarto de las pinturas (35) el aplanado es de lodo (Lucet *et al.*, 1994). Algunos muros presentan pintura mural (lámina 4).

- En el edificio A (lámina 5) se encuentran los murales del danzante con caracol y del danzante jaguar (lámina 6) pintados sobre las jambas de la puerta que separa el pórtico del aposento. Pintados sobre los muros del pórtico se encuentra el hombre jaguar y el hombre águila; ambos fueron recubiertos por un bajorelieve pintado de rojo, ubicado cerca de las jambas (lámina 7). En el aposento, el mural de las serpientes entrelazadas se encuentra muy deteriorado (lámina 8).
- Sobre el talud ubicado abajo del edificio B, fue pintado un mural de imponentes medidas (lámina 9).
- El edificio E tiene en la columna central todavía existente, un bajorelieve (lámina 10).
- En la esquina sur oriente del Gran Basamento, pintados en ambos lados de la escalera, está el mural de los hombres caminando, prácticamente invisible actualmente (lámina 10).
- En el Templo Rojo (lámina 11), se encuentran pinturas en la parte trasera de la escalera y a ambos lados de ésta (lámina 12); así como en el piso (lámina 13).
- En el conjunto de Venus, las dos columnas centrales están recubiertas con murales representando una mujer y un hombre alacrán (lámina 14).
- Finalmente, existen huellas de pintura tanto en la esquina del Palacio del lado norponiente de la Plaza de los Altares (00) como en el pórtico A (30).

No existe una evolución muy llamativa en el uso de los acabados pero se nota un cambio en la calidad del estuco rugoso de los elementos ubicados en la plataforma sur (22-21-20-19). Es más tosco que aquél que recubre los demás edificios.

En la zona (20) existe una superposición de varias capas de estuco. No es el único caso pero se hace muy evidente en esta parte del sitio.

Guardapolvos

Los muros y las pilastras presentan en su parte inferior una franja de estuco bruñido blanco o rojo (lámina 15). No ha sido posible entender la lógica con la cual el color se definía. Probablemente el rojo haya marcado una mayor jerarquía o una particularidad del cuarto. Lo encontramos en el cuarto de Venus (32), los cuartos del edificio F (13) que dan sobre la plaza norte (0), el edificio B (5), la celosía (23), el pórtico A (30) y el Templo Rojo (24). Cada uno de estos conjuntos tiene distintivos que le confieren de alguna forma un papel jerárquico. Los conjuntos 32, 13, 5, 30 y 24 están en ejes de simetría de plazas; los conjuntos 32, 30 y 24 tienen pintura mural; los conjuntos 13 y 23 muestran bajorelieves y adornos únicos.

En ninguna de las estructuras el guardapolvo aparece sobre la fachada. En las pilastras se encuentra solamente sobre tres caras: la interior y las dos laterales. Esta observación ha permitido definir la orientación de pilastras aisladas (16) para saber de que lado se encontraba el cuarto que delimitaban. Permitió también entender si el muro (2) era un elemento aislado o parte de un pórtico.

Sobre la función del guardapolvo existen varias hipótesis, como su nombre lo indica la hipótesis funcionalista lo define como una franja que esconde las manchas y los golpes que recibiría la parte inferior del muro; sin embargo en este caso es probablemente en la parte exterior del muro donde habría sido más útil para evitar las manchas de lluvia. Probablemente, el guardapolvo tenga un efecto arquitectónico decorativo donde sencillamente se remarca el contorno del recinto al nivel de la intersección entre el muro y el piso.

El área del Palacio (22-21-20-19-33) no tiene guardapolvo en su última capa de acabados.

Las bases de los edificios

Después de estudiar los edificios A (4), B (5) y C (6) parecería que los edificios están montados sobre una pequeña plataforma de un escalón de altura comúnmente denominada banqueteta. Un estudio más detallado ha permitido corroborar que las banquetetas están presentes

solamente cuando los cuartos podrían sufrir inundaciones por las aguas pluviales. Por ejemplo el cuarto (17), los pórticos (39) o todo el pórtico del lado norte del Palacio (arriba de 21), no presentan banquetas pues no están ubicados en lugares donde se pueda acumular mucha lluvia. En contraparte el edificio B (5), ubicado justo en la parte baja de un talud piramidal y en forma paralela a éste, está montado sobre una banqueta más alta que los edificios A (4) y C (6) que son perpendiculares al talud.

Los taludes-tableros



Figura 22. Talud-tablero característico de Cacaxtla. Edificio F.

Las extremidades y los muros laterales de varios edificios están decorados con taludes y tableros (lámina 16). Por el estado de destrucción del sitio y la altura de los muros, pocos son los tableros existentes. Se distinguen dos tipos:

- Los taludes y tableros típicos del sitio. El talud es un elemento adosado a la estructura, con poca inclinación y altura, mientras que el tablero queda como esculpido en el espesor

del muro, *i.e.*, un muro de tepetate de 57 cm es recortado para definir el relieve. El tablero cacaxtleco es distinto del tablero teotihuacano; por sus paneles remetidos ha sido comparado con Tajín chico y el edificio B de Tula (Diana López de Molina, 1979; Kubler, 1978). La autora (1980) hace notar que en Cacaxtla este elemento no está asociado a pirámides o basamento sino que se encuentra integrado a los edificios.

- El edificio E (13) es un caso atípico dentro del sitio, su talud está menos alto y mucho más inclinado; el tablero está compuesto de relieves que siguen el contorno de la pilastra, marcando rectángulos concéntricos; en las honduras están ubicados estucos de forma circular. Los taludes de la estructura (30), presentan esta misma inclinación, además están recubiertos con pintura verde y roja que en la última fase fue revestida por un estuco rugoso.



Figura 23. Talud-tablero del edificio E.

Las columnas

La cantidad de columnas presentes en el sitio de Cacaxtla es una de las principales características del sitio. Se ha registrado hasta la fecha, en la parte superior del Gran Basamento, 76 columnas que conforman los pórticos de los recintos alrededor de las plazas y patios o los pórticos periféricos del conjunto que rodean todo el Gran Basamento.

Las interrogantes en relación con los pórticos son ¿dónde se usan?, ¿cuándo es el entrecolumnado central más ancho que los laterales?, ¿cuántas columnas presentan los pórticos?, ¿existe alguna estandarización de las medidas?, ¿de existir, se pueden relacionar con etapas constructivas distintas?

Ubicación

Una serie de columnas se encuentran ubicadas en la periferia de la plataforma para conformar pórticos, espacios cubiertos y abiertos hacia el entorno del sitio. Se observan claramente del lado norte (1), sur (39) y del lado este en (28) y (14). Su ausencia en otras partes del perímetro no implica que no existían y puede ser debida al estado de derrumbe en zonas donde el terreno es más endeble o a su eliminación para la construcción de estructuras superiores.

Se observan también columnas en las fachadas de las construcciones, del lado de las plazas. Los pórticos se vuelven en este caso un espacio intermediario entre el exterior y los cuartos. Las únicas excepciones se encuentran en (13) donde las columnas son directamente las limitantes del cuarto hacia el exterior, con una apertura central muy ancha; el (14) donde el pórtico es más hondo que el promedio de los demás e incluye en su interior columnas redondas; en (23) y (5) donde el caso es similar, se trata de un pórtico que no sirve de espacio intermedio.

Las plazas están rodeadas de columnas lo cual da una uniformidad de conjunto en los distintos lados.

Enfatización del eje central

Si en general, el ritmo de los pórticos es regular, se puede apreciar que en algunos casos (lámina 17), el entrecolumnado central de las fachadas es más ancho, enfatizando así el centro de la construcción. En muchas arquitecturas, el centro, por la particularidad de su ubicación, tiene un papel distinto y preponderante sobre las partes laterales. Si además, el centro rompe la regularidad del ritmo de los entrecolumnados, se vuelve todavía más importante. En Cacaxtla, esta particularidad coincide también con edificios remarcados con pinturas, bajorelieves y elementos decorativos. En (4) se encuentran las primeras pinturas encontradas en el sitio; (6) no presenta pinturas pero está diseñado como imagen espejo del edificio A (4) en relación al eje norte-sur; en (13) las columnas centrales presentan bajorelieves y las esquinas son ricamente adornadas; (32) corresponde al templo de Venus, y las dos columnas interiores están recubiertas de las pinturas del hombre y de la mujer; el pórtico (30) se encuentra muy rebajado pero se distingue por debajo de la última capa de estuco que recubre la estructura, una capa pictórica que indica que estaba completamente pintado, adicionalmente está ubicado en la otra extremidad del eje que pasa por el cuarto de Venus (32). Además, los elementos donde se enfatiza el centro sobresalen de la alineación general como en (30), (32) y (13) o en un efecto inverso tienen muros metidos hacia el interior (4), aumentando así el efecto de atracción y de centralismo. Esto confirma la idea que el espacio central más ancho está relacionado con la idea de resaltar y dar más importancia a una fachada dándole un carácter de unicidad al distinguir puntos específicos de la repetición y la uniformidad.

Cantidad de columnas por pórtico

Todos los pórticos que se pueden apreciar completos tienen un número par de columnas, esta característica que era una regla obligatoria de composición en la arquitectura occidental, tiene la ventaja de dejar el centro libre para el paso humano; permitir que enfrente exista una puerta, igualmente central, que marque los ejes de simetría; que una persona ubicada en la puerta

o el centro del pórtico tenga una posición dominante al poder ser vista por mucha gente y a su vez tener un campo de visión amplio. Cuando una persona se ubica en el centro de una fachada, atrae la atención; si adicionalmente la fachada es simétrica no hay puntos de distracción y mientras todos los elementos son dobles, ella es única.

Medidas

Para buscar la forma como el constructor cacaxtleco definía los tamaños de los componentes de los pórticos, se hizo un estudio detallado de las medidas de las columnas y entrecolumnas (Lucet, en proceso). Se evaluaron diferentes posibilidades. Las medidas pudieron haber sido seleccionadas en función de una necesidad estructural para sostener la carga de techo o en forma abstracta; que existieran reglas de proporción entre los distintos elementos de una fachada o reglas de composición para establecer correlaciones entre diferentes edificios.

Se buscó también la existencia de una relación entre medidas y etapas constructivas para saber si pudiera haber existido una evolución de los criterios de construcción.

Las medidas de las 76 columnas y 84 entrecolumnas fueron agrupadas por pórticos obteniendo 24 conjuntos. En cada conjunto, las medidas fueron promediadas y se corroboró que la diferencia entre el promedio y los extremos no excedía de cinco por ciento, comprobando así el deseo de regularidad por parte del constructor. El único caso donde el rango sale de este porcentaje es el del conjunto (14).

No se encontró ninguna relación entre carga y proporción de las columnas, así, se exploraron las relaciones entre medida y diseño arquitectónico; y entre medida y etapas constructivas. Al observar el conjunto de medidas encontradas, es notorio que se agrupan en relación con unas cuantas medidas. Los grupos fueron graficados en plano para establecer una relación espacial entre ellos.

Tampoco existe correlación entre las medidas empleadas y las épocas constructivas. Por ejemplo, la columnata (16) tiene las mismas medidas que la columnata (15) que está ubicada directamente encima y por consecuencia es posterior.

Lo que si se fue confirmando es un uso de las medidas en relación con criterios de definición espacial y de correspondencia arquitectónica entre edificios. La plaza norte, presenta de tres lados las mismas medidas de columnas y entrecolumnas, el cuarto lado está limitado por el conjunto 13 que no sigue la misma regla, de la misma forma que su topología también es distinta. Cuando en una segunda etapa la plaza se vuelve hundida, se observa una correspondencia de las medidas de columnas y entrecolumnas entre los lados paralelos sur y norte de la plaza.

La plaza norponiente del Palacio, tiene para ambos lados las mismas medidas de columnas y entrecolumnas.

La Plaza de los Altares (00), tiene columnas con las mismas medidas en tres lados. Las medidas de las entrecolumnas, son idénticas para los dos lados paralelos y el centro del lado oriente. Es posible que el espacio disponible para el conjunto 30 no haya permitido que esta columnata tuviera también el mismo entrecolumnado, sin embargo el entrecolumnado central sí retoma la medida. Adicionalmente, al hacer el centro más ancho, se refuerza el eje oriente-poniente que une este pórtico con el cuarto de Venus (32). Por cierto, el cuarto de Venus, anterior a la Plaza de los Altares, convivió con éste antes de la construcción de la pirámide sur, y fue el conjunto que dio las medidas que se emplearon para los pórticos de la Plaza de los Altares, ya que conforma espacialmente el cuarto lado de la plaza.

Un estudio de las medidas de las entrecolumnas muestra que el valor preferencial es de 1.98 m y que aparentemente los otros valores encontrados habrían sido usados cuando el espacio era demasiado exiguo. El 79.8 % de los entrecolumnados tienen valores cercanos a 1.198 m, 1.459 m y 1.984 m.

El 91.6% de las columnas tiene como medidas valores cercanos a 1.20 m y 1.46 m. Las columnas de 1.20 m se encuentran principalmente del lado sur del conjunto, mientras que las de 1.46 se ubican en la parte central y norte.

De todas las medidas el 84.5% corresponde a valores cercanos a los tres valores 1.198, 1.459 y 1.984 m.

No existe una proporción entre las medidas de columnas y de entrecolumnas pero sí una progresión rítmica basada en un módulo de 0.265 m entre los promedios de las diferentes medidas:

(0.938), 1.198, 1.459, (1.718), 1.984

(entre paréntesis los valores calculados sobre la base de los otros).

Asimismo, la distancia entre las dos columnas centrales pintadas del cuarto de Venus es de 2.645 es decir, comprende exactamente 10 módulos.

Sin embargo, al dividir estos valores aparece que:

$$0.938=0.268 \times 3.5$$

$$1.198=0.266 \times 4.5$$

$$1.459=0.265 \times 5.5$$

$$1.718=0.264 \times 6.5$$

$$1.984= 0.264 \times 7.5$$

Se desprende de esto que el módulo pudo haber sido un poco superior a 0.13; se pudieron utilizar medios módulos; o bien trabajar sobre la base de columna más entrecolumna para emplear módulos enteros de 0.265 m.

La selección de medidas por parte de los constructores estuvo basada en el diseño arquitectónico, con objeto de satisfacer la necesidad de dar uniformidad a las plazas, respetar simetrías en relación con ejes y establecer una relación entre edificios ubicados en las extremidades de los ejes, y esta voluntad seguía respetada en los edificios construidos posteriormente. De esta forma, edificios construidos en distintas épocas siguieron las medidas estándares de construcción.

Por otra parte, las entrecolumnas son más anchas que las columnas y contrariamente a sitios como Palenque donde los pórticos parecen más muros con aperturas; en el caso de

Cacaxtla, son pórticos donde el claro predomina sobre las masas. Las condiciones climatológicas entre Cacaxtla y Palenque son también muy distintas y Cacaxtla requiere de menos protección contra el sol.

Aun cuando el estudio de las medidas llegó a encontrar estándares, en el modelado se retomó solamente el promedio encontrado para cada columnata.

Anchos de muros

Los muros de carga tienen valores cercanos a los 57 cm. Es en la zona del Palacio (20-21) donde esta medida tiene más fluctuación, abarcando el rango 52-59. Algunos muros, generalmente de división, miden alrededor de 47 cm. Los muros construidos para dividir espacios existentes tienen un grosor que varía entre 35 y 40 cm ó entre 25 y 30 cm. Finalmente existe un grupo de muros secundarios muy delgados en el rango 14-20 cm.

Tipos de edificios

Los edificios de Cacaxtla muestran tipologías distintas.

Por una parte, los edificios (4), (6), (11), (35), (36) son de planta rectangular, más largos en el sentido de la fachada que hacia la profundidad y presentan un pórtico que se comunica a otro cuarto, como espacio intermedio entre el exterior y el interior, esta tipología se asemeja a construcciones del área maya como lo menciona Kubler (1978), encontrando más similitud con los edificios de Palenque que con los del altiplano.

Los edificios (5), (23), (14) están compuestos solamente por un pórtico. El edificio (14) es el único edificio de Cacaxtla, conocido hasta la fecha, que presenta columnas redondas en su interior.

Los edificios de ambos grupos poseen en la parte exterior taludes-tableros característicos del sitio y pueden ser considerados edificaciones típicas. En el caso del edificio (14) no es posible confirmarlo dado su estado de conservación.

El edificio (13) presenta tres naves perpendiculares a la fachada, con la central más adelantada hacia la plaza. Esta configuración se asemeja a la de edificios teotihuacanos. Adicionalmente los elementos decorativos como los tableros y el bajorelieve son también particulares. En el caso del bajorelieve ubicado sobre una columna de la nave central, se reconoce una fuerte influencia maya.

El conjunto del Palacio (22, 21, 20) muestra columnatas hacia los espacios exteriores y una serie de cuartos y pasillos que permiten comunicar las distintas plazas. Parte de su complejidad reside en las fuertes transformaciones que ha tenido. En las últimas fases, las construcciones existentes no permitían tomar decisiones totalmente libres. Así, es factible que el arquitecto haya tenido escogido por una posición de compromiso entre los existentes y sus ideales.

Ubicación de las puertas

La mayoría de las puertas se encuentran localizadas en el centro de los cuartos (lámina 17). En algunos casos como el (20), la puerta no está centrada en relación con el cuarto en su etapa final pero encuentra una simetría con otro muro estructural, lo cual permite plantear hipótesis que expliquen configuraciones anteriores. Cuando se trate de proponer ubicaciones de muros para reconstruir partes que han desaparecido, como la parte posterior del (32) y la parte superior del (23), la presencia de puertas permite ubicar los muros faltantes en forma simétrica. En ese sentido, la observación tiene dos ventajas, por un lado permite entender modificaciones de los cuartos y por el otro, sustenta la ubicación de muros destruidos.

Ejes de simetría y de composición

Se observan ejes de simetría tanto en elementos aislados como en conjuntos.

Las fachadas de los edificios aislados como (4), (5), (13), (11), (35) y (30); los interiores del Patio de los Rombos (19); y la del cuarto de Venus (32), son simétricas.

Los ejes más importantes son (lámina 18):

- En el sentido norte-sur un eje (AA) que pasa por el centro del patio hundido (40), simétrico en relación con éste, el centro del edificio B (5), el centro de la escalera de La Batalla (7), el cual termina en el centro de la parte adelantada del talud del lado sur de la plaza norte (15). Los edificios A (4) y C (6) están ubicados en forma simétrica en relación con este eje y la distancia del eje al edificio D (11) es más cercana a la establecida con la banqueta del edificio F (13).
- Un eje oriente-poniente (BB) marcado por la escalera principal (10), ubicada al centro de los taludes que tiene en ambos lados, y la escalera del talud que recubrió el edificio F (12). La distancia de este eje al talud sur de la plaza (a) es la misma que su distancia al talud enterrado bajo la superestructura del edificio F (b).
- Un eje oriente-poniente (CC) que pasa por el centro del cuarto de Venus (32), la escalera de la pirámide sur (31) y el centro del pórtico (30). Éste sirve de eje de simetría para la Plaza de los Altares (00).
- Un eje oriente-poniente (DD) marcado por el eje de simetría del edificio E (13). Es el eje central de la plaza (0) en una de sus configuraciones y marca la mitad de la distancia entre el muro del cuarto poniente (d) y el talud de La Batalla (e).
- Un eje oriente-poniente (EE) que arranca en el Patio de los Rombos (19) y llega a los dos pequeños altares ubicados en la parte norponiente del Palacio (22). Éste es el eje principal del Patio de los Rombos (19) y en las demás partes corresponde a una secuencia visual que comunica todos los espacios entre sí.
- Un eje oriente-poniente (FF) marcado por dos escaleras del patio hundido (3).
- Un eje norte-sur (GG) que comunica la escalera (15) con una puerta de la estructura (33) y de la estructura (36) siguiendo el pasillo que separa las estructuras (20) y (21).

Las plazas

Las plazas de Cacaxtla son rectangulares y totalmente delimitadas de los cuatro lados por las pilastras de los pórticos de los edificios (lámina 19).

- En la Plaza norte (0) se observan dos cuadrados que unen distintas estructuras.
- El cuadrado I tiene como centro la intersección de los ejes AA y DD (lámina 19). Los lados del cuadrado corresponden con el talud de La Batalla (7), la fachada del edificio D (11), la banqueta del edificio E (13) y el muro de las estructuras (14) y (17). De hecho en la fase más antigua de las reconstrucciones hipotéticas, éstos son los límites de la plaza.
- El cuadrado II tiene como límites un talud enterrado (a) del lado norte, el talud de la superestructura del edificio D (8) del lado este, la plataforma avanzada (15) del lado sur y el talud de la superestructura del edificio D (12). Son los límites de la plaza en una de las fases constructivas del sitio.
- La plaza superior del Templo Rojo (24) es casi cuadrada (III).
- La Plaza de los Altares (00) tiene la configuración de un cuadrado (IV) en relación con los muros que la delimitan del lado sur y norte, la parte honda de la estructura (30) del lado poniente y el límite de la pirámide sur (31) del lado poniente.
- La superficie delimitada por la banqueta del Patio de los Rombos (19) corresponde a dos cuadrados.

Los niveles estratigráficos

El nivel de referencia 0.00 fue asignado al nivel de la plaza norte y para simplificar el estudio se asumió que toda un área que no presenta escalones podía ser considerada como del mismo nivel. Esta acertación no toma en cuenta por ejemplo; los declives que presentan las plazas para permitir la evacuación de las aguas pluviales, generalmente hacia las esquinas.

Se llegaron a distinguir los siguientes niveles principales:

- Ubicado en el nivel -5.64 se encuentra el arranque de la escalera principal oriente (10) que comunica al nivel -1.89.
- En un nivel cercano a -1.89 se localizan las estructuras 23, 28, 32, 36, 39, 35 y 24. Existen también en este grupo elementos que marcan desniveles:
 - los taludes o escaleras 18, 26, 42 que comunican a un nivel cercano al de la plaza norte, ubicada en 0.00. Es un desnivel que se podría caracterizar como de un medio edificio;
 - desniveles más importantes, se trata del talud 38 y de la escalera 24 que se conectan al nivel 1.48. Este desnivel corresponde a la altura de un piso.
- Cercanas al nivel 0.00, se ubican las estructuras 0, 29, 11, 14, 17, 16, 13 y 37 y distintos taludes, 7, 12, 15 que comunican con un nivel cercano a 1.48 m.
- Entre 1.39 y 1.60, se encuentran las estructuras 00, 19, 1, 2, 4, 6, 8, 9, 20, 21, 22, 25, 30, 33 y 5 y las plataformas piramidales 31 y (41 checar), cuyo nivel superior varía entre 4.43m y 5.25 m.
- Finalmente, el nivel más alto corresponde al patio hundido (3), las plataformas de la pirámide sur (31) y el montículo Y (40).

RECONSTRUCCIÓN DE LAS ETAPAS CONSTRUCTIVAS

Como se mencionó anteriormente, se decidió que la restitución correspondiera a una “idealización” del sitio, es decir no se tomaron en cuenta las irregularidades que se deben al asentamiento del sitio, o al normal margen de error que existe en todo proceso de construcción. Así que las medidas fueron promediadas cuando se trataba de elementos repetitivos como columnas y entrecolumnas en una misma fachada o cuando la poca variación entre las medidas mostraba un evidente deseo por parte del arquitecto de tener elementos regulares. Como la mayoría de los muros estructurales poseían un espesor de 57 cm, sus variaciones fueron redondeadas a esta medida; muros divisorios sin papel estructural fueron redondeados a 38 cm.

Por otra parte, se observó que los cuartos eran rectangulares y que existía muy poca deformación de los ángulos (más o menos dos grados) por lo que el modelo se realizó con ángulos de 90 grados.

Estas decisiones, fueron tomadas sobre la base de que todo el proceso de reconstrucción se realizaba mediante un análisis meticuloso de la información y buscando la intención del arquitecto mesoamericano (Lucet, 1997). El deterioro inevitable debido al envejecimiento y los medios tradicionales de construcción, hacen que el sitio tenga deformaciones que no corresponden con su ideal del espacio, situación que el trabajo fue buscando. Además el estudio mostró que existe realmente por parte de los constructores de Cacaxtla una búsqueda de perfección; por ello, en ningún momento se construyó al azar o sin planeación, y que esta búsqueda iba acompañada de los conocimientos matemáticos y tecnológicos necesarios para cumplir satisfactoriamente con ésta.

Se presenta a continuación una descripción general de cada una de las etapas constructivas encontradas y su reconstrucción. Más adelante se explican en detalle las transformaciones de cada estructura y cómo se fue justificando la agrupación por fases. En realidad, durante el proceso de estudio de la evolución del sitio, no existe una secuencia lineal. Una decisión tomada en una etapa repercute inmediatamente en las demás y se llega a una solución cuando cada parte encuentra su papel en la justificación del todo.

Las etapas constructivas

Fase 0

Algunos datos aislados permiten saber que existen etapas constructivas todavía enterradas que no han podido ser excavadas por la presencia de estructuras superiores.

- Existe en la parte baja de los taludes del poniente, una estructura teotihuacana con máscaras de Tláloc. No ha sido posible integrarla a las demás estructuras.

- Las perforaciones realizadas para la cimentación de las columnas que soportan el techo dejaron al descubierto elementos enterrados como un cuexcomate, escaleras y distintos pisos.
- Atrás del cuarto de las pinturas (35), en la ladera del talud, aparece parte de una estructura todavía enterrada correspondiente a la parte media de un muro, al nivel del arranque de los tableros.
- Daniel Molina (1978) escribe: “en los pozos excavados se han encontrado a cuatro y seis metros de profundidad y bajo varios pisos de estuco, escalones y otros elementos pertenecientes a estructuras... algunos de los pozos no se agutaron en su totalidad por el peligro que presentaba el seguir excavándolos”.
- Muestras tomadas en el pozo 8 realizado a partir del nivel del edificio B (5), fueron fechadas en 744 ± 91 para la capa XVIII y 649 ± 93 para la capa X (López de Molina, Diana, 1981).
- La plataforma superior de la escalera principal llega a un nivel cercano a toda la parte sur del sitio *i.e.*, el conjunto de Venus (32), el Templo Rojo (24) y el conjunto F (35) y (36). Esto permite pensar que hubo una época donde la parte central estuvo en continuidad con la parte sur, y al mismo nivel que ésta.

Los datos relativos a estas fases constructivas son demasiado escasos para poder ser integrados en un todo coherente.

Fase 1 (lámina 20)

Existe una fase constructiva donde la plataforma norte no tiene todavía el talud ubicado al norte de los edificios A (4) y C (6). A esta fase corresponde el dintel de la puerta tapiada fechado en 755 ± 75 , el cual podría ser material de reutilización de la época anterior (Andrés Santana Sandoval y Rosalba Delgadillo Torres, 1990).

En la parte central del sitio, existiría el talud (7) sin el edificio D (11).

El lado sur estaría a un nivel más bajo que la plaza central. Estaría compuesto de una gran plaza rodeada por edificios, en los cuales se pueden incluir las estructuras 26-28-35-36-39-23-24-32.

La articulación entre la zona central y la zona sur, se realiza mediante un edificio que podría haber agrupado las estructuras 14, 16 y 17. Es un edificio con columnas redondas internas.

La escasez de información en relación con esta fase no permite su reconstrucción. Excavaciones adicionales serían necesarias tanto bajo el patio hundido (3) para conocer la plataforma norte, como bajo el Palacio (19-20-21-22-30-00-33-31) para conocer la parte sur. La mayor parte de la información está presente pero sigue enterrada.

Fase 2 (láminas 21 y 22)

Del lado norte, se construye la plataforma cuyo talud (41) sirve de límite norte a los edificios A (4) y C (6). No existiría todavía el edificio B (5) y los edificios A (4) y C (6) son idénticos, sin retornos o divisiones en su pórtico. Es probable que esta plataforma haya servido de base para varias construcciones, sin embargo éstas fueron parcialmente destruidas y enterradas durante la construcción del patio hundido (3) y del montículo Y (40) por lo cual se desconocen totalmente.

En la parte central, la plaza norte (0) está delimitada del lado oriente por el edificio D (11), del lado poniente por el edificio E (13) y del lado sur, por las estructuras (14), (16) y (17), las cuales conforman un solo edificio. Su morfología es de un cuadrado.

Del lado sur del sitio, el nivel de la plataforma sigue siendo más bajo. Se encuentran la celosía (23), el pasillo del Templo Rojo (24), el pórtico de Venus (32) y los conjuntos F (35 y 36). Estos elementos rodean un plaza muy grande, aunque pudo contener en su espacio central estructuras difíciles de inventar por no tener ningún dato sobre su presencia. El pasillo del Templo Rojo que más adelante se convierte en una escalera, encuentra allí la justificación de su ubicación al estar exactamente al centro de la plaza. Por ello, en la reconstrucción, se decidió

remarcar esta observación al reproducir en forma simétrica los dos lados de esta plaza. La estructura intermedia entre los elementos (35) y (14) estaría ya en un nivel más alto que la plaza sur, en continuidad de la plaza norte (0).

Las representaciones murales de esta fase serían las del cuarto de las pinturas (35) y del fondo del edificio A (4). El edificio E (13) existe desde la fase anterior, así que el bajorelieve que ostenta en su centro estaría también presente.

Fase 3

Existe una fase muy breve que corresponde a la elaboración de varias pinturas y modificaciones menores en los edificios D (11) y E (13).

Se empieza la pintura del mural de La Batalla, la cual fue enterrada en 792 DC \pm 83, (Andrés Santana, 1990). El mural se reparte en ambos lados de la escalera central; sin embargo, antes de terminar su ejecución, se decide la remodelación de la parte central y sur del sitio. Sabiendo que la superestructura del edificio E (12) va a invadir parte de la plaza para que su plataforma pueda ser más ancha, se decide limitar temporalmente el mural del lado poniente con una plataforma provisional, hasta terminar las transformaciones. Esto explica porque en ninguna de sus extremidades, el mural está terminado. Del lado oriente, las últimas figuras están solamente esbozadas con el dibujo preparatorio y del lado poniente falta el marco que delimita la pintura. En esta fase el edificio B (5) no existiría aún.

Se pintan los murales de la serpiente (24-A) como cenefa del pasillo del Templo Rojo.

Fase 4 (láminas 23, 24 y 25)

La plataforma norte se extiende recubriendo el mural de La Batalla y se construye el edificio B (5). Existen transformaciones en los edificios A (4) y C (6).

Los edificios E (13) y D (8) son destruidos parcialmente y lo que queda de ellos es enterrado por las plataformas que reciben edificios de los cuales no queda nada en la actualidad.

Al sur de la plaza principal, sube el nivel de la plataforma, a una altura cercana a un piso. Así, la plaza (0) queda hundida y rodeada de construcciones ubicadas al mismo nivel. Se empiezan a distinguir varios elementos del Palacio *i.e.*, la columnata en la parte alta del Templo Rojo (24) y un edificio en la zona oriente de lo que más tarde será el Patio de los Rombos (19).

El conjunto F (36 y 35) sigue existiendo pero se construye una plataforma a desnivel ubicada al norte de este último. A esta plataforma corresponden las estructuras 29, 37 y 42.

El conjunto de Venus tiene importantes transformaciones; se conforma el cuarto central y las dos columnas que quedan adentro son reducidas de tamaño. Se construye una escalera en la esquina norte. La plaza que tiene enfrente queda hundida del lado norte de la altura de un piso y del lado poniente por un talud de medio piso de alto; asimismo tiene la proporción de un cuadrado. El talud del lado oriente de la plaza, frente al conjunto de Venus (32), tiene dimensiones muy cercanas a las dimensiones del talud de La Batalla (7).

En esta fase desaparece la pintura de La Batalla; la serpiente del Templo Rojo queda recubierta por una pintura de los dos lados de la escalera y se pintan los esqueletos e íconos sobre el piso; a esta fase corresponderían también los murales de la mujer y el hombre alacrán. Del lado norte, se puede pensar que las pinturas del pórtico y de las jambas del edificio A (4) corresponden a esta fase ya que los historiadores ubican a estas pinturas con una hechura muy cercana a la de La Batalla.

Según los fechamientos de las muestras de carbono tomadas en una ofrenda frente a La Batalla, cuando fue enterrada, esta fase iniciaría en 792 ± 83 , (Andrés Santana Sandoval y Rosalba Delgadillo Torres, 1990).

Fase 5 (lámina 26)

Se observa una extensión de la plataforma del Palacio hacia el sur, recubriendo el conjunto F (35 y 36). Desaparece la pintura del cuarto (35) lo cual causa que se recubra de lodo la pintura del cuarto de fondo del edificio A (4). Ambas tienen una manufactura muy parecida y

conformarían partes de una misma “historia” por lo que no tendría sentido la existencia de una sin la otra. Las estructuras 20-21-22-30-33 empiezan a conformarse así, al igual que la plaza (00).

En la zona centro, las superestructuras de los edificios E y D se extienden hasta cerrar el paso, tanto del lado sur como del lado norte de la plaza principal (0).

Fase 6 (lámina 27)

Las transformaciones continúan en la parte sur del sitio donde se cancela la escalera del Templo Rojo (24), recubriéndola con un basamento piramidal que no llega aún a enterrar al conjunto de Venus. Existen transformaciones en toda la parte del Palacio. El pórtico A (30) estaría recubierto de pintura en interiores y exteriores.

Fase 7 (lámina 28)

Se observa la extensión de los taludes piramidales. No es posible saber si la arquitectura de cuartos, pórticos y plazas deja lugar a una arquitectura piramidal, lo cual representaría un cambio en la concepción arquitectónica o bien si las plataformas son del mismo orden que las plataformas existentes y que hubieran sostenido una serie de elementos arquitectónicos desaparecidos.

Del lado norte quedan enterrados los edificios A (4), B (5) y C (6). En la parte superior se construye el Patio de los Rombos. Éste habría sido rodeado de construcciones.

En la zona centro, la plaza quedaría rellena.

Del lado sur, la pirámide recubre totalmente el conjunto de Venus (32). En el Palacio se construye el Patio de los Rombos (19), además se llevan a cabo múltiples transformaciones para tapar ciertos cuartos y la pintura del pórtico A (30) queda recubierta por un acabado rugoso.

Fase 8

Corresponde al entierro de las últimas estructuras conocidas. Es cuando coinciden la mayoría de los entierros masivos reportados (150 entierros), ya sea en la parte norte o sur del sitio. De hecho todas las partes correspondientes a esta fase habrían desaparecidos por haberse quedado expuestas a la intemperie o por el arado como lo menciona Daniel Molina.

El abandono de Cacaxtla puede tener varias explicaciones. La primera consiste en mencionar la presencia de grupos invasores y de fenómenos de conquista. Sin embargo la presencia de tantos entierros puede significar el fin de una época, quizá por problemas de sequía o de enfermedades. Una hipótesis muy reciente menciona posibles erupciones del Popocatepetl.¹⁵

Estudio de cada conjunto

Para facilitar el estudio, cada una de estas zonas norte, centro y sur fue dividida en grupos de elementos como muros, columnas y pilastras que parecen conformar un edificio con una cierta congruencia de unidad. La mayoría retoman los nombres especificados por los arqueólogos que han excavado el sitio.

Representación gráfica de la información temporal

Al retomar la idea desarrollada por Edward C. Harris en 1973 para codificar la representación gráfica de una secuencia estratigráfica espacial y cronológica, con el fin de poder definir fases de ocupación de un sitio, se adecuó el método a las necesidades del proyecto. El método llamado Matriz de Harris consiste en representar unidades estratigráficas como cajas entreconectadas. Una línea vertical muestra la superposición de capas estratigráficas, mientras que las líneas horizontales establecen las relaciones temporales entre las capas con las cuales existe un contacto físico.

¹⁵ Comunicación personal del arqueólogo David Morales.

Así, para simplificar la ubicación temporal de cada unidad en un esquema de configuración de conjunto del sitio, la información fue graficada en forma de tabla (lámina 29). En el eje horizontal se representan los conjuntos, mientras en el eje vertical el tiempo, dividido en distintas fases. Cada una de las configuraciones definidas para los edificios queda ubicada verticalmente. Dos configuraciones de edificios de las cuales se tiene la certidumbre que coexistieron quedan enlazadas con una línea y un círculo alrededor de las entidades involucradas.

Las cruces (†) significan la desaparición o entierro de la estructura.

Las celdas unidas verticalmente con un color, indican la existencia y continuidad de una estructura.

Zona norte

Pórtico norte y muro poniente

Pórtico norte (1)

1-1: Consiste en un cuarto alargado con pilastras, en el nivel 1.48 m. Se observa un guardapolvo blanco en toda su periferia interior. Este pórtico coexistió con el muro (2) y el relleno ubicado al sur.

1-2: Queda recubierto por el basamento norte.

Muro poniente (2)

2-1: Ubicado en el mismo nivel que el pórtico anterior, es un muro que une el pórtico A (4) con el pórtico norte (1). Presenta en su base un guardapolvo blanco lo cual permite deducir que corresponde al muro de fondo de un cuarto o de un pórtico pues los guardapolvos nunca aparecen en exteriores.

2-2: Queda recubierto por el basamento norte.

Reconstrucción

Estos dos elementos fueron reconstruidos integrándose como uno solo sin tener transformaciones, hasta quedar enterrados por la pirámide que los recubrió en la fase 7. El ancho del pórtico este fue definido retomando el del pórtico norte. Igualmente, las columnas conservan las medidas de las localizadas al norte y son en número par. Los pórticos fueron reproducidos en forma simétrica en relación con el norte sur. Es importante mencionar que la fachada norte, de una extremidad a la otra, resultó con una medida de exactamente 57.01 m, cuando 57 m corresponden a la medida reportada en Teotihuacan como módulo de base para la planeación urbana (Millon, 1967).

Patio hundido (3)

De forma rectangular con escaleras en cada lado, siendo la norte más ancha, el fondo del patio hundido se encuentra aproximadamente en el nivel 6.34 m mientras que su parte superior está en 5.48 m.

3-1: La construcción del patio hundido corresponde con la conformación de la plataforma que entierra los edificios A, B, C. Existen alrededor del patio varias construcciones.

3-2: Se encontraron varios entierros en el piso lo que deja pensar que más adelante fue rellenado y las construcciones que lo rodeaban destruidas; probablemente cuando fue modificado el montículo Y (40). Cerca del patio hundido fue encontrado el entierro ceremonial de un mural parecido al del edificio A (Molina Feal Daniel, 1978). Los entierros de humanos encontrados fueron dos infantiles primarios indirectos (Delgadillo Rosalba Torres et al, 1994) en una tumba mientras que la otra estaba vacía.

Reconstrucción

El patio hundido fue solamente modelado en el estado que presenta actualmente pues las huellas de construcciones circundantes son demasiado escasas para realizar una reconstrucción. Habría existido solamente durante la fase 7.

Montículo Y (40)

Corresponde a la última fase de Cacaxtla (Diana López de Molina, 1979). Según García Cook (1991), es una estructura piramidal de planta rectangular con una escalera adosada del lado sur. Habría tenido por lo menos dos etapas constructivas las cuales se observan claramente.

40-1: Primera configuración de la pirámide.

40-2: Segunda configuración, probablemente cuando se cancela el patio hundido.

Se han encontrado en la plaza superior del montículo Y, 21 entierros infantiles primarios directos mutilados, un entierro infantil primario directo, un entierro adulto secundario directo mutilado y un entierro adulto primario directo.

Reconstrucción

En la separación por fases, la construcción del montículo Y fue asociada con la del patio hundido, es decir durante la fase 7. Su transformación quedó en la fase 8. No existen elementos para saber si sirvió o no de base a algún templo.

Los edificios A y C

Edificio A (4)

El nivel inferior de la banqueta del edificio se encuentra a 1.42 m en relación con la plaza y el nivel superior a 1.48 m.

4-1: En una primera fase constructiva, el edificio es menos alargado que en su estado actual. Se observa la huella que dejó un muro en el piso del cuarto trasero, este fue posteriormente destruido para dar al conjunto las proporciones que tiene en la actualidad. Una puerta tapiada en el muro que divide el pórtico del cuarto parece pertenecer también a la configuración original del cuarto. El dintel ha sido fechado en 755 ± 75 pero puede ser de reuso de una época anterior. Existe muy poca información sobre las dimensiones de la construcción en esta época, se podría suponer que la puerta marca un eje de simetría, pero no hay datos para

confirmarlo. Marta Foncerrada (1976) citando el primer reporte de los Molina, dice que el talud norte (41) habría sido anterior a este cuarto, sin embargo no ha sido posible corroborar este dato. Por lo contrario el cuarto pudo ser recortado al momento de construir el talud.

4-2: Se agranda el edificio a su proporción actual. En esta fase el pórtico A corresponde a una imagen especular del pórtico C (6).

4-3: Se añaden los retornos de las mochetas en el pórtico, dejando dos pequeños cuartos laterales. Estos retornos parecen ser creados para dar más énfasis a las pinturas, por lo que se piensa que su creación puede ser ligada a la elaboración de las pinturas del pórtico.

4-4: Se modifica la esquina sur poniente del edificio para hacer la articulación con el edificio construido sobre la plataforma que cubre el edificio D (8), y la banqueta se extiende hacia adelante. Como en muchos eventos que modifican el espacio arquitectónico, no es posible saber si las fases 4-3 y 4-4 fueron separadas u ocurrieron al mismo tiempo, no obstante, para simplificar el proceso de descripción y análisis de las etapas constructivas, se decidió separarlas.

4-5: El edificio queda recubierto por la estructura superior al ser construido el patio hundido (3).

Mural del aposento del edificio A (4A)

4A-1: El cuarto presenta en el muro de fondo una pintura realizada directamente sobre barro (lámina 8), técnica que es parecida a la de los murales del “cuarto de la pintura” (35) en la esquina sur oriente del sitio. El mural queda perfectamente enmarcado por los dos muros laterales que permiten restablecer la simetría del cuarto, perdida por el hecho que el muro norte está constituido por el talud de un gran basamento. El estado de conservación del mural permite solamente ver unas piernas caminando hacia el centro donde se encuentra una máscara de Tláloc, algunas están terminadas con garras y parecen una representación del hombre jaguar; una cenefa compuesta de serpientes entrelazadas enmarca la parte central del conjunto. Según Daniel Molina (1978) este mural “pudo haber plasmado la síntesis de las representaciones de este edificio”. Sin embargo sorprende que el soporte de las pinturas del fondo del cuarto sea distinto del soporte de

las pinturas de las jambas y del pórtico. Por esta razón, estas pinturas pudieron ser anteriores a las del pórtico. Las figuras se asemejan más con las del pórtico F por su movimiento y escala que con las demás. La cenefa de serpientes es única dentro del sitio por la multitud de pequeñas serpientes en vez de una sola, y por el hecho que no constituye un marco general a la pintura ya que solamente enmarca parte de ésta. Finalmente, no se ha encontrado hasta la fecha, otra representación de la máscara central la cual se distingue con su círculo central marcado por una cruz y los ojos, igualmente de forma redonda.

4A-2: La pintura quedó recubierta por una capa de lodo. Este evento pudo coincidir con el entierro del cuarto de las pinturas (35). En éste, dos personajes ubicados a ambas partes de la escalera “parecen enfilarse hacia la puerta que da al norte”, su caminata pudo haber seguido hasta el centro del pórtico A. Tanto la técnica pictórica como el dibujo de ambos murales son muy parecidos por lo cual se puede suponer una fuerte interdependencia entre ellos, quizá una secuencia narrativa. Por ello es posible que al cancelar una pintura, la otra perdiera su significado y fuera necesario recubrirla.

Murales del pórtico del edificio A (4B)

4B1: Realización de los murales que enmarcan el acceso al cuarto del fondo. Se puede pensar que su creación coincide con los retornos por la relación directa que existe entre los dos elementos. Sin embargo, es posible que uno de los dos eventos haya ocurrido antes del otro y para la realización del segundo se haya tomado en cuenta la presencia del primero logrando una integración entre ambos.

La mayoría de la literatura relativa a Cacaxtla trata de estos murales y de los de La Batalla ya que fueron los primeros descubiertos, presentaron un excelente estado de conservación debido al cuidado con el cual fueron enterrados y, por la gran interrogante que produjeron al tener importantes características mayas mezcladas con rasgos teotihuacanos.

Varios autores han establecido una relación entre las pinturas del pórtico A y las del cuarto de Venus. El glifo que Marta Foncerrada (1993) llama “Entorno al agua” en el mural del

hombre jaguar (lámina 7) está compuesto de un rectángulo, varias medias estrellas y rodeado de pies. Dice: “a mi parecer, es el pictograma de un espacio arquitectónico, sea el de un patio rodeado de crujías y con un acceso al centro, o la configuración de una fachada con un vano central; en cualquiera de los casos, el prototipo es teotihuacano”. En relación con este glifo, y tomando en cuenta que la media estrella es la representación de Venus, Ellen Baird dice *The footprints around the glyph indicate that it is a place or structure that one could walk around and possibly enter (although there are no footprints inside the enclosure) and may be a name for Enclosed Place of the Star or Venus, perhaps a battlefield, a walled place, or even a pyramid associated with Venus, warriors, and the feathered serpent. Two such structures that readily come to mind are the Ciudadela (Teotihuacan) and the Pyramid of the Plumed Serpent (Xochicalco)* (1989). En un artículo posterior, en una época donde el conjunto de Venus era ya descubierto, Carlson (1993) precisa la idea de Ellen Baird afirmando que este glifo es una representación del cuarto de Venus (32), donde se preparaban las personas que iban a ser sacrificadas.

En el mural que se encuentra del lado norte de la puerta, en forma simétrica al anterior en relación con la puerta, existe un glifo parecido que Marta Foncerrada llama “Entorno a la estera” y lo interpreta como signo de “vinieron, llegaron los de la mano enojada y marcaron los linderos; la estera significa asiento del poder político-religioso, que señala su territorio” (1993). Si se admite que el glifo anterior sea una representación del cuarto de Venus, quizá éste corresponda a la celosía (23) o al Patio de los Rombos (20), por la semejanza entre las cruces que lo conforman y los elementos que han proporcionado su nombre a las dos estructuras.

4B2: Más adelante, se superponen a la pintura del pórtico, dos relieves de barro, a los lados de la puerta cubriendo así “las fauces y la planta de maíz que enmarcaban la puerta” (Molina, 1978).

Edificio C (6)

Del edificio C ha sido excavada solamente una parte. Está a la misma altura y parece similar al edificio A (4) por su planta, sus dimensiones de conjunto y los tableros y taludes de su fachada.

6-1: Época en la que este edificio es idéntico al edificio (4) A en su fase 4-2.

6-2: Se tapan las entrecolumnas laterales, dejando solamente el central como libre, y se construyen las conejeras que consisten en pequeños cajones de adobe con un agujero circular en la parte frontal, parece que hubo dos pisos de “conejeras” (García Cook, 1991). En realidad este nombre fue dado por los arqueólogos, por una asociación morfológica y no por tener datos que lo justificara.

6-3: En su lado sur, el espacio entre los edificios B (5) y C queda tapado por la construcción superior a la plataforma que cubre y entierra el edificio F (9).

6-4: El edificio queda enterrado. Este evento pasa en el mismo momento que los eventos 4-5 y 5-4.

Talud atrás del edificio A (41)

41-1: Empieza del lado oriente como muro de fondo del cuarto del edificio A (4) y continua hacia el sur perdiéndose en el relleno del patio hundido (3). Fisuras en el piso del patio hundido parecen indicar que seguía derecho probablemente hasta el edificio C (6).

41-2: Queda recubierto al ser construido el basamento que entierra los edificios A, B y C.

Reconstrucción

De la primera morfología del edificio A, ubicada en la fase 1, los datos son demasiados escasos para poder reconstruirlo, sin embargo, se realizó el modelo de sus dos configuraciones arquitectónicas posteriores. Varios muros del edificio son completos y los demás fueron parcialmente destruidos así que la última configuración de los edificios se logra restituyendo los

muros. Para la configuración anterior, se quitaron los retornos del A y los entrecolumnados laterales del C, así como los muros que encierran “las conejeras”.

Para ambos edificios, se tuvo que inventar un coronamiento. En muchos casos los edificios mesoamericanos tienen un pretil superior muy pronunciado, pero en Cacaxtla ninguno ha sobrevivido al ser desmontados en caso del entierro del edificio, o al ser destruidos por el tiempo. Las reconstrucciones hipotéticas de edificios del sitio muestran la parte superior decorada como los edificios de Teotihuacan sin embargo, al no tener más información sobre esta parte del edificio, se optó por hacer un pretil liso con una altura total, dintel más pretil, cercana al ancho de una columna.¹⁶ Este mismo pretil fue utilizado para todos los edificios salvo para el edificio E (13).

Las épocas constructivas de estos elementos quedaron de la siguiente forma:

En la fase 2, cuando se construye la plataforma norte con el talud (41), la estructura del edificio A 4-1 es transformada en la estructura 4-2 y se pinta el mural 4-A1. En esta misma época, se construye el edificio C (6-1). Alrededor del año 792 (± 93), en la fase 4, después de que haya quedado enterrado el mural de La Batalla, ambos edificios reciben transformaciones y en el caso del edificio A, se pintan los murales del pórtico y de las jambas (4-B1). En la fase siguiente, la 5, el mural de las serpientes entrelazadas, pintado sobre el muro de fondo del aposento, es recubierto de lodo y se colocan dos bajorelieves en ambos lados de la puerta central. Los dos edificios, el A y el C tienen ligeras modificaciones en sus exteriores, al ser extendidas las superestructuras de los edificios D y E (8 y 9). Finalmente, en la fase 7 todo queda enterrado para la construcción del patio hundido.

Edificio B(5)

5-1: Pozos realizados a partir del edificio B revelaron la presencia de subestructuras y una muestra de carbono fue fechada para 744 ± 91 .

¹⁶ Sugerencia del Dr. Alejandro Villalobos.

5-2: Ubicado en la misma plataforma que los edificios A y C, el edificio B no parece haber tenido modificaciones importantes. Para su construcción la plataforma fue extendida hacia el sur, recubriendo así la pintura de “La Batalla”.

5-3: El espacio entre el edificio B y el C(6) queda cancelado por la superestructura del edificio E(9) y se modifica la esquina sur poniente del edificio.

5-4: Es el entierro del edificio para la construcción del patio hundido (3). Esta fase constructiva corresponde a la 4-5.

Se ha encontrado durante la excavación del edificio B dos entierros infantiles secundarios directos (Delgadillo Rosalba Torres et al, 1994).

Reconstrucción

Para enterrar el edificio B, solamente le fue quitada su techumbre. Su planta es completa y los muros periféricos tienen alturas finales. Así que su estudio permitió definir alturas de muros y pilastras; además de conocer la morfología de los tableros. Esto proporcionó una información que fue reutilizada para la reconstrucción de los edificios cuyo estado actual es más deteriorado.

Se observó un desfase en las medidas de ambos lados del eje de simetría, la mocheta derecha siendo de 1.91 m y la izquierda de 1.98 m; el muro del fondo de 12.11 m del lado derecho de la puerta y de 12.21 m del lado izquierdo.

En relación con la techumbre, solamente queda la huella de las vigas maderas en la parte alta de los muros y se retomó el esquema decidido para los edificios A y C. Para los dinteles se retomó la información encontrada en la literatura la cual menciona que se encontró en la “subestructura I de El Palacio” que los vanos de las aperturas se realizaban con morillos como si fueran varillas y una mezcla de “mortero de lodo y fragmentos de tepetate” (Andrés Santana et al, 1990). Por ello se puede suponer que los dinteles eran elementos estucados.

El edificio B, construido en 792 (± 93), cuando queda enterrado el mural de La Batalla en la fase 4, vivió hasta la fase 7 cuando es parcialmente destruido para la construcción del patio hundido.

Talud del mural de La Batalla (7)

Corresponde a un desnivel que une el nivel 0.00 con el nivel 1.42.

7-1: El talud fue anterior a la construcción del edificio D (11), el estado de las excavaciones no permite saber si también fue anterior al E (13).

7-2: Posteriormente, el talud queda limitado por los edificios D (11) y E (13), construidos a distancias iguales en relación al eje central definido por la escalera del mural de La Batalla .

7-3: Antes de terminar la pintura del mural se limita el talud con el basamento piramidal (12).

7-4: El talud queda recubierto por otro talud que tapa el mural y se extiende así la plataforma que recibe el edificio B (5). Esta fase corresponde a la 5-2. Andrés Santana (1990) menciona una muestra tomada de “un depósito primario de restos carbonizados procedentes de material vegetal que fue quemado como ofrenda posiblemente cuando fue tapiado el mural de La Batalla y/o cuando toda la plaza frente a éste es rellenada” la fecha obtenida es de 792 ± 83 .

Mural de La Batalla (7A)

Al igual que para los murales del edificio A (4), existe una amplia bibliografía sobre el estudio de los murales, buscando explicar su significado. Según el autor la interpretación varía de una representación mítica a la representación real entre dos grupos étnicos (los hombres jaguar contra los hombres pájaros) o a la escenificación de un sacrificio. La composición de la pintura y la posición de los personajes son menos rígidas que en los demás murales del sitio y han llevado a comparaciones con las pinturas de Bonampak (lámina 9).

7-A1: El mural de La Batalla recubre el talud que limita al norte la plaza central (0), desde el edificio D (11) hasta el basamento piramidal (12). Probablemente planeado en forma simétrica a ambos lados de la escalera quedó más reducido del lado poniente ya que antes de terminar su ejecución, se toma la decisión de subir el nivel de la parte sur del Gran Basamento y de unirla con la zona norte, dejando la plaza (0) como plaza hundida. Así, se limita su extensión del lado poniente, con un retorno del talud.

7-A2: Antes de ser acabado, el mural queda enterrado al ser extendida la plataforma que soporta el edificio B (5). Del lado oriente, el mural presenta un marco vertical que muestra claramente su fin pero las últimas figuras humanas son solamente esbozadas, mientras que del lado oeste no aparece el marco. La mayoría de los autores coinciden en pensar que la ejecución del mural fue anterior a la de los murales del pórtico del edificio A (Foncerrada de Molina, Marta, 1983; Molina Feal Daniel, 1978).

Reconstrucción

El mural tiene una vida muy breve y ha sido ubicado en la fase 3. Ésta corresponde a la fase 2 a la cual se le añade esta pintura y modificaciones menores en los edificios D (11) y E (13). De hecho, se trata de una fase de transición, de poca duración, donde la parte sur del sitio empieza a transformarse hasta unirse con la plataforma norte. La pintura incluye tanto el talud como las partes laterales de la escalera.



Figura 24. Del lado izquierdo: pintura de La Batalla sobre talud. De frente: retorno de la escalera central, se distinguen huellas de pintura de la cual quedan solamente dos pies.

Zona centro

Plaza norte (0)

La plaza norte que se ha tomado para definir el nivel 0.00, ha tenido una serie de modificaciones que alteraron su tamaño, forma y configuración. Está constituida por un piso estucado y delimitada por los edificios circundantes.

0-1: En una etapa está limitada al oriente por el edificio D (11), al norte por el talud de La Batalla (7), al poniente por el edificio E (13) y al sur por un edificio del cual sólo se observan algunas columnas (18). La plaza es cuadrada.

0-2: Después, presenta un retorno en su esquina norponiente. Este retorno se une rápidamente al basamento piramidal (12). Es cuando se vuelve una plaza hundida al ser construido el conjunto del Palacio (20,21,22), la estructura superior del edificio D (8), la estructura superior del edificio E y sus basamentos (9 y 12).

0-3: Del lado norte se extiende el talud de La Batalla (7) para soportar el edificio B (5), tapando así el mural.

0-4: La plaza es rellenada, y sobre su piso estucado fueron encontrados varios entierros cubiertos solamente por lajas. (Diana López de Molina, 1979). Se han encontrado en el “patio del mural de La Batalla” nueve entierros infantiles directos primarios, dos entierros infantiles directos secundarios y un entierro de adulto secundario directo (Delgadillo Rosalba Torres et al, 1994).

Oriente de la plaza

Edificio D (11)

11-1: Construcción del edificio apoyándose del lado norte sobre el talud ya existente del mural de La Batalla (7).

11-2: La construcción inicial está sujeta a un pequeño cambio en el que se subdivide el cuarto sur.

11-3: Queda totalmente enterrada al ser construida la plataforma que recibe las estructuras (8). Al excavar este edificio se encontró un entierro infantil directo secundario (Delgadillo Rosalba Torres et al, 1984).

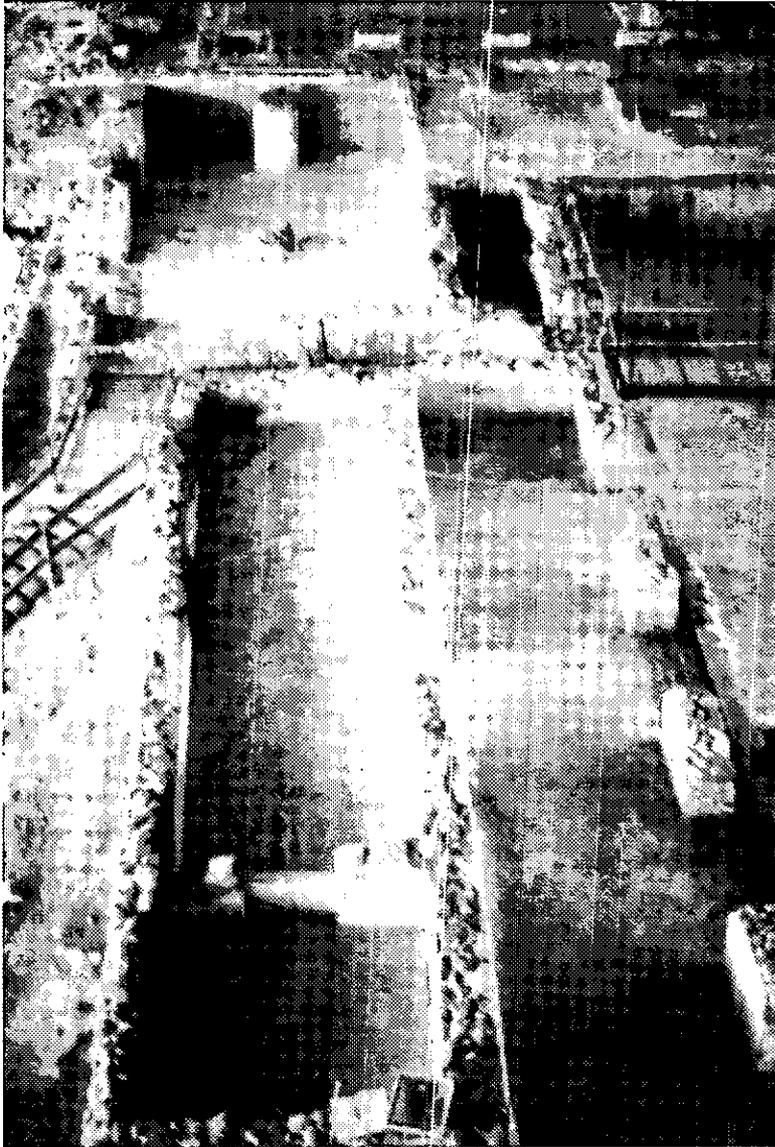


Figura 25. En primer plano: el edificio D; en el fondo: el edificio de las columnas.

Superestructura del edificio D (8)

8-1: Se construye una plataforma para unir el nivel del Palacio I (20) y el pórtico A (4), enterrando el edificio D (11). Sobre esta plataforma se erige un edificio que se junta en su parte norte con el pórtico A (4).

8-2: Al construir la plataforma del patio hundido, la parte norte de estas estructuras queda enterrada, por lo que son los únicos elementos sobrevivientes de la superestructura.

Reconstrucción

El edificio D ha sido rebajado para la construcción de la plataforma que lo cubrió cuando la plaza norte se volvió una plaza hundida y, en su parte norte, las excavaciones han dejado parte de esta plataforma. Sin embargo, se observa la continuidad del edificio hasta llegar al talud de La Batalla (7). La parte posterior del edificio está más destruida por los derrumbes ya que corresponde al límite de la plataforma, a pesar de esto se puede suponer que el muro con talud que se observa en la esquina noreste corresponde a la mocheta de un pórtico, por lo cual se reprodujeron de este lado las mismas columnas que las ubicadas del lado oeste.

En cuanto a la planta, la única modificación que vivió el edificio, consistió en la añadidura de un muro divisorio con puerta, en el cuarto sur durante la fase 3. En su primera configuración, en la fase 2, los dos cuartos eran de tamaños idénticos.

Las esquinas perdieron sus tableros, pero la presencia de un talud con una pendiente parecida a la de los taludes de los edificios A, B y C permite suponer de su existencia por lo que se modelaron tomando como referencia los existentes en otros edificios.

Así, en la fase 5, desaparece este edificio y se realiza una nueva construcción de la cual quedan solamente algunos elementos en sus extremos sur y norte. Al repetir las pilastras de la estructura (8) hacia el sur, coincidieron exactamente con los elementos ubicados arriba del edificio de las columnas (14), sin embargo el número de éstas quedó impar, lo cual no es común en Cacaxtla. Una explicación fue encontrada al desarrollar la evolución del conjunto (20). Se supone que inicialmente se hizo un edificio con una cantidad par de columnas, dejando el paso

hacia lo que más adelante se vuelve el Patio de los Rombos (19). En etapas posteriores, se cierra este paso y el pórtico se extiende quedándose con un número impar de columnas. Al construir la plataforma norte en la fase 7, se vuelve a corregir esta situación. En cuanto a la fachada exterior, se optó por una solución distinta ya que con ésta, una columna habría quedado en el eje central de la escalera. De esta forma, en la fase 5, el pórtico exterior está compuesto por un número impar de columnas mientras que en la fase 6, al ser extendido el edificio, el número de pilastras vuelve a ser par. En la fase 7, este edificio es parcialmente enterrado por la plataforma norte y las estructuras enterradas son justamente las que sobrevivieron al tiempo.

Poniente de la plaza

Edificio E (13)

13-1: Es un pórtico compuesto de tres naves perpendiculares a la fachada. Esta configuración destaca por ser totalmente diferente de los demás edificios y muy característica de los edificios teotihuacanos. Los taludes son más bajos e inclinados que los correspondientes a los edificios A (4), B (5), C (6), D(11), celosía (23), conjunto F (35, 36) y Venus (32); y en vez de tableros aparece un marco en relieve sobre las partes verticales. Las columnas de las dos naves laterales presentan estucos esféricos ubicados en una canaleta. Las columnas de la nave central incorporan un bajorrelieve de características mayas (lámina 10).

13-2: La puerta ubicada en el fondo del cuarto central es tapiada.

13-3: El edificio queda enterrado por la plataforma (12) que sostiene las estructuras (9) y el evento ocurre al mismo tiempo que el 11-3.

Superestructura del edificio E (9)

9-1: El edificio E (13) queda cubierto por una plataforma (12) que retoma, desfasándola hacia el sur, el diseño de la etapa anterior. Sobre esta plataforma se construyen varios cuartos, de los cuales quedan solamente algunos muros en la parte norte. Esta etapa corresponde con la 8-1.

9-2: Se cierra el espacio entre el edificio B (5) y el edificio C (6).

9-3: Como en el caso anterior, al construir la plataforma del patio hundido, parte de la superestructura del edificio E queda enterrada, y son los únicos elementos todavía existentes.

Basamento piramidal (12)

12-1: El basamento entierra las estructuras del edificio E (13) y recibe las estructuras (9). La plataforma une el Palacio (22) con el talud de La Batalla (7).

12-2: El basamento queda recubierto al ser rellenada la plaza.

Reconstrucción

La morfología del edificio F y su comparación con un edificio teotihuacano permite proponer una reconstrucción de la planta basándose en el eje de simetría que pasa por el entrecolumnado central. Para las alturas, fueron retomados los datos de estructuras teotihuacanas así como la configuración de los pretilos. Dado que las columnas, contrariamente a las de los demás pórticos no tienen su exterior liso sino que presentan canaletas, se dio al pretil una apariencia similar. Se desconoce la parte posterior del edificio.

Como en el caso del edificio D, el edificio F fue rebajado en la fase 4 para permitir la construcción de un nivel superior del cual quedan algunas estructuras del lado norte. La similitud morfológica entre la plataforma (12) y la de su subestructura hizo que el edificio E (13) sirviera de referencia para la construcción de la estructura superior, de la cual no queda nada. Se puede pensar que existe en Cacaxtla una conservación de los elementos y cuando quedan enterrados, se hace una clonación de éstos. Inicialmente diseñado como edificio aislado, en la fase 5 se extiende hasta el edificio B (5) del lado norte y hasta el Palacio (22) del lado sur.

Sur de la plaza

Estructura con columnas redondas (14)

Del edificio de las columnas se conoce solamente la parte norte, y se puede observar que continúa por debajo del conjunto del Palacio I (20). Tiene en su interior dos columnas de sección circular, las cuales son las únicas con esta característica en la parte superior del Gran Basamento.

14-1: Está parcialmente compuesto por los elementos visibles en la actualidad. Este edificio habría tenido más de 20 m de longitud (García Cook, 1991).

14-2: El edificio queda enterrado por la plataforma que une el Palacio I (20) al pórtico A (20), enterrando al mismo tiempo el edificio D (11).

Columnas enterradas al sur de la plaza norte (16)

Del lado sur de la plaza norte, aparecen tres columnas semienterradas.

16-1: Las columnas parecen conformar un pórtico que limita hacia el sur, la plaza norte. El lado norte de las columnas y sus laterales muestran la presencia de un guardapolvo blanco.

16-2: Estas columnas quedan enterradas al ser construida la plataforma que sirve de base al conjunto del Palacio (21, 22).

Cuarto poniente (17)

Consiste en un cuarto sin pórtico ni columnas, totalmente abierto hacia el poniente, en su parte posterior, hacia el lado oriente se observa el arranque de dos naves.

17-1: Estas estructuras son parte de un edificio del cual queda poca información.

17-2: Fueron recubiertas por la plataforma del Palacio (22) y la plataforma poniente de la plaza norte (12).

Reconstrucción

En todos los elementos que conservan guardapolvos, se observa que éstos están siempre ubicados en interiores, así las columnas enterradas localizadas en el lado sur de la plaza norte

corresponden a una construcción ubicada del lado de la plaza y no en la zona del relleno que soporta el conjunto del Palacio. El edificio al cual corresponden habría sido destruido para extender la plaza hacia el sur cuando se hundió. Por otro lado se nota un alineamiento entre las estructuras ubicadas del lado poniente (17), las columnas (16) y el edificio de las columnas redondas (14) por lo cual se pensó que estos tres elementos podían conformar un solo edificio en forma de "L". Esta hipótesis queda confirmada por la presencia de una esquina aflorando del relleno, atrás del edificio de las columnas. Para la parte oriente, asumiendo un número par de columnas y su reparto regular, se fue viendo la posibilidad de que fueran cuatro, seis u ocho columnas. La configuración con seis columnas fue la más adecuada al espacio disponible hasta el talud (26).

Las esquinas fueron modeladas con el talud-tablero cacaxtleco, pues el talud todavía existente del lado poniente tiene una inclinación y altura similar a la de los edificios A, B, C y E.

Escalera poniente (18)

18-1: Es una escalera que une un nivel correspondiente a la celosía (23) (-1.84 m) con el nivel del cuarto poniente (17) (0.00 m). En el piso superior de la escalera, cerca de la celosía, se observa una fisura que sigue bajando en el talud.

18-2: Al ser creadas las plataformas (12) y (22), esta escalera fue también recubierta por un talud piramidal.

Escalera oriente (10)

10-1: Es una escalera de grandes dimensiones que une una plataforma amplia de acceso a -5.64 m en relación con la plaza norte (0), a un nivel ubicado aproximadamente a -1.89 m donde se observa una pequeña plataforma de aproximadamente .90 m de profundidad.

Zona sur

Desnivel sur de la plaza norte (15)

15-1: Es un desnivel que une la plaza norte (0) con el conjunto del Palacio (20, 21, 22). Su construcción enterró las estructuras (16).

15-2: Cuando la plaza norte (0) queda rellena para subir su nivel, el talud queda enterrado a su vez.

Plaza de los Altares (00)

Ubicada en el nivel +1.39 m, la Plaza de los Altares ha tenido múltiples configuraciones. Los arqueólogos encontraron en una tumba del Patio de los Altares, seis entierros infantiles indirectos secundarios y un entierro indirecto primario. (Delgadillo Rosalba Torres et al, 1994)

00-1: En alguna época, es una plaza rodeada de edificios en dos o tres de sus lados. Del lado poniente, el talud (38) indica la existencia de un desnivel que unía el nivel del Templo Rojo (24) con esta plaza.

00-2: Se construye la pirámide sur (31) y se modifican las esquinas de los conjuntos (21) y (33).

00-3: Se rellena la plaza. Los arqueólogos han encontrado en el "Patio de los Altares" 41 entierros infantiles primarios directos y 11 entierros infantiles directos secundario (Delgadillo Rosalba Torres et al, 1994).

Conjunto del Palacio

En su última etapa, el Palacio está constituido por una serie de patios, cuartos, pórticos y pasillos que conforman el conjunto de la parte sur del Gran Basamento, alrededor de la pirámide sur (31) y a una altura cercana a 1.39 m. Contrariamente a las unidades definidas anteriormente que claramente se podían distinguir como conjuntos independientes, en este caso la división

quedó arbitraria y representa zonas, más que entidades bien definidas. Sin embargo fue necesaria para facilitar el estudio.

Patio de los Rombos (19)

El Patio de los Rombos (19) debe su nombre a la presencia de relieves en las entrecolumnas que conforman sus límites oriente y poniente.

19-1: Es parte del conjunto (20) del Palacio. Corresponde a una de las últimas etapas de toda esta parte del Gran Basamento, en la transformación final del Palacio.

19-2: El patio queda relleno y durante las excavaciones del Patio de los Rombos se encontraron 20 entierros infantiles primarios directos, dos entierros de adolescentes primarios directos y 18 entierros infantiles secundarios directos.

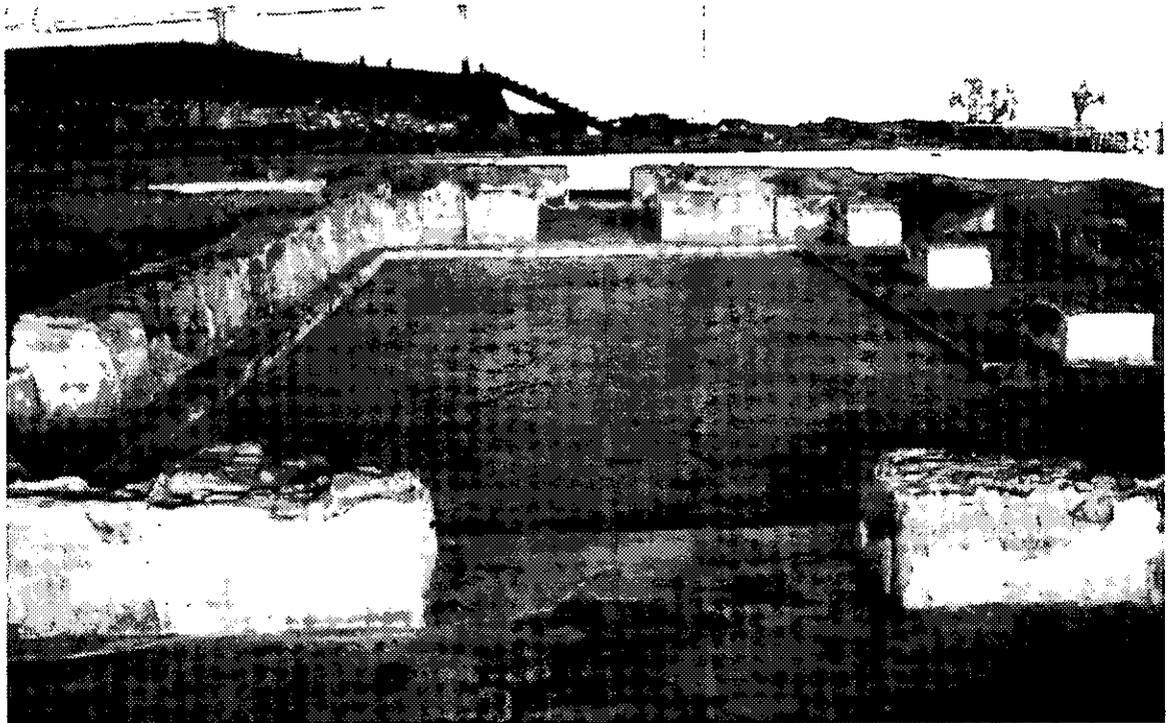


Figura 26. Patio de los Rombos, estado actual.

Palacio I (20)

Este conjunto presenta numerosas transformaciones. La secuencia que se puede definir está basada en estructuras puntuales como una columnata enterada y el Patio de los Rombos (19).

20-1: Existe un edificio del lado oriente, con una configuración parecida a la del edificio A y del *F i.e.*, un pórtico con dos columnas, un aposento y del lado exterior del sitio, otro pórtico.

20-2: La columnata existe. Está conformada por lo menos por tres columnas y entrecolumnas.

20-3: Se rellena el espacio entre las columnas para conformar un muro al que se le adosa un muro perpendicular, ambos conforman la esquina de un patio.

20-4: Se conforma el Patio de los Rombos (19). Ciertas partes del conjunto quedan enterradas.

20-5: El conjunto es rebajado y enterrado, ya que se han encontrado en “cuartos y pórticos” de El Palacio 16 entierros infantiles directos primarios, dos entierros infantiles directos secundarios (Delgadillo Rosalba Torres et al, 1994).

Palacio II (21)

21-1: En su primera configuración la esquina es más reducida del lado sur y marca el retorno del lado poniente de un corredor con pilastras que rodea una pequeña plaza en la desembocadura de la escalera del Templo Rojo (24), y continúa juntándose con el pórtico del Palacio III (22). Sobre esta esquina se observan huellas de pintura negra con un forma de estrella.

21-2: Posteriormente, el espacio entre la esquina y la columna ubicada directamente de su lado oriente queda relleno.

21-3: La esquina se transforma en un talud. La pintura mural queda recubierta y el pórtico ubicado a la vuelta del lado poniente, es cubierto por el talud hasta la esquina de la pirámide.

21-4: La apertura del lado sur se reduce de tamaño por la construcción de dos muritos. Éstos parecen mostrar un cierto descuido en su ejecución, además, no están bien alineados con la estructura existente. El talud del lado poniente se extiende hasta el retorno norte.

21-5: Se entierra parte o todo el Palacio, para construir la última época, ya que se encontró en el pasillo que separa los conjuntos I y II, 18 entierros infantiles primarios directos, y siete entierros infantiles secundarios asociados.

Palacio III (22)

Corresponde a la parte poniente del Palacio.

22-1: El pórtico continúa el del conjunto (21) y entierra las estructuras de la celosía (23).

22-2: Se cierra una región entre dos columnas y se tapan varios espacios para definir un pasillo entre (21) y (22).

Palacio IV o pórtico A (30)

Ubicado frente a la pirámide sur (31), el pórtico A cierra la Plaza de los Altares (00) del lado oriente. Los taludes que conforman las esquinas son parecidos en inclinación y configuración a los del edificio E (13), y presentan huellas de pintura. El muro posterior del pórtico, posee irregularidades en su paño interior que parecen mostrar una configuración anterior, sin embargo, los elementos disponibles son demasiado escasos para precisar su configuración.

30-1: Construcción de parte de la estructura, enterrando la estructura (29).

30-2: Construcción del pórtico con guardapolvos rojos en interiores y pintura azul en los exteriores de los taludes.

30-3: Se rellena el espacio entre las esquinas y el fondo, también se recubren las pinturas con un estuco rugoso.

Palacio V (33)

De este conjunto, queda solamente el pórtico que comunicaba a cuartos ubicados arriba del conjunto F (36). Sus columnas son idénticas a las columnas del Palacio I, y ambos conjuntos limitan en forma simétrica la Plaza de los Altares (00) del lado norte y sur. Se pueden observar transformaciones en la esquina poniente del Palacio V.

33-1: El pórtico con los cuartos. Corresponde con el entierro de las estructuras del conjunto F (36) y al muro (42).

33-2: La esquina se transforma para recibir un talud parecido al de la esquina ubicada del otro lado de la plaza.

Palacio VI (37)

37-1: En el nivel 0.47, en un nivel medio entre el conjunto F (36) y el Palacio (33), se observa un piso que no es parte del Palacio en sus últimas etapas sino que pertenece a una etapa intermedia en el proceso de transformación del sitio, la correspondiente a la gran plaza frente al conjunto de Venus (32) y las etapas finales. Este nivel convive con las estructuras F (36).

37-2: Al ser construido el Palacio V (33) esta estructura desaparece.

Superestructura del Templo Rojo (25)

25-1: En el mismo nivel que el Palacio, en la parte superior del Templo Rojo (24), y dentro de la pirámide que lo recubrió, se observa un piso estucado y del lado poniente una pilastra adosada a una porción de talud. Este mismo talud parece continuar del lado oriente de la escalera del Templo Rojo y podría haber correspondido al primer límite de la pirámide sur (31).

25-2: Las estructuras quedan enterradas por la pirámide sur (31).

Reconstrucción

La primera fase del Palacio consistiría en la construcción de la parte superior de la escalera del Templo Rojo (24) en la fase 4. Incluye una columnata que rodea la escalera y conforma una plaza. De ésta se tiene acceso a una serie de cuartos. De la misma época sería el edificio ubicado en el extremo oriente. De la plaza frontal a este edificio, se podría bajar de un medio nivel hacia la plaza norte (0) o hacia un nivel intermedio con las estructuras F (35) y (36). Este medio nivel explica la presencia de la escalera del cuarto de las pinturas (35), el talud frente a la estructura (36) y el piso (37).

En la fase siguiente, la 5, desaparecen este medio nivel y las estructuras F (35) y (36). El edificio aislado del lado oriente se integra a las demás estructuras y se construye a continuación un edificio con columnata.

Más adelante, existen importantes transformaciones en el sistema de circulación y se conforma el pórtico A (30) con sus pinturas.

La etapa siguiente está marcada por el Patio de los Rombos.

En la fase 8, todas las estructuras del Palacio habrían quedado enterradas por una plataforma. De hecho, se ha visto que las estructuras sobrevivientes han sido enterradas, lo cual garantizó su conservación, mientras que las correspondientes a la última etapa desaparecieron. Con esta lógica, es el entierro del Palacio lo que explicaría su existencia actual.

Esquina de basamento (26)

26-1: Una esquina de talud que une los niveles del pórtico oriente (28) (-1.84 m) con un nivel superior aproximado al piso de la plaza norte (0) en el nivel 0.00 m viene a interrumpir el pórtico (28).

26-2: Más adelante esta esquina se extiende hasta el muro de fondo del pórtico oriente (28).

26-3: El talud (27) viene a adosarse transversalmente, dejándola casi completamente enterrada.

26-4: Al quedar enterrado el pórtico oriente (28), lo que queda de este basamento, igualmente queda enterrado.

Pequeño talud (27)

27-1: Este talud cuya base se localiza a -1.84 m y recubre la esquina de basamento previamente descrita (26). No se alcanza a ver cuál es su altura final.

27-2: Probablemente haya quedado recubierto al mismo tiempo que los elementos (26) y (28).

Atrás del cuarto de las pinturas (29)

29-1: Se observan muros y pisos en el nivel que corresponde a la parte superior de la escalera del cuarto de las pinturas, alrededor del nivel -0.45 m. Del lado norte, el cuarto está delimitado por un muro. Del lado poniente las estructuras se pierden en el relleno del conjunto (30) aunque en la esquina de los conjuntos (35), (33) y (29) se observa un pequeño fragmento del muro de fondo poniente.

29-2: Se sube el nivel del piso (alrededor del nivel 0.00 m) lo cual hace que el último escalón del cuarto de las pinturas quede más alto.

29-3: Queda recubierto por la construcción de las estructuras (30), (33) y (20).

Conjunto F

El conjunto se encuentra ubicado en la esquina suroriente del Gran Basamento a un nivel cercano a -1.84 m.

Pórtico oriente (28)

28-1: Es un pórtico parecido al (1), de la misma forma se integra a los taludes periféricos de las plataformas del Gran Basamento siendo su fachada hacia el exterior. En sus partes inferiores se observa la presencia de un guardapolvo blanco.

28-2: Es posible que la extremidad norte del pórtico quede mutilada al ser construidas la estructuras (26).

28-3: Queda tapado cuando se construye el conjunto del Palacio.

Cuarto de la pintura y pórtico F (35)

35-1: El cuarto de la pintura y el pórtico F conforman un solo edificio con una configuración parecida al pórtico A. La mocheta existente muestra un talud tablero similar al de los edificios A, B y C. En la parte oriente, existe una columnata.

35-2: Se construye el desnivel (29) y una escalera dentro del cuarto de las pinturas para unir ambos niveles, dejando una apertura en el muro norte. Este muro queda recubierto por una pintura mural

35-3: Se cancela la puerta entre el pórtico y el cuarto. Es posible que este evento haya correspondido al evento anterior.

35-4: Más adelante el conjunto queda enterrado por las estructuras sur del Palacio IV y V (30, 33).

Pinturas del cuarto (35A)

35A-1: La capa pictórica fue aplicada directamente sobre lodo como en el caso del mural del cuarto del edificio A (4). Se encuentra en la actualidad casi totalmente borrada pero al parecer, cuando fue descubierta se alcanzaban a ver algunos contornos (lámina 10). García Cook (1991) describe la pintura como conformada por cuatro personajes “en actitud de caminar, dirigiéndose hacia el centro donde está la escalera”. Las figuras humanas tendrían una altura de 0.50 a 0.60 m. Marta Foncerrada (Diana López de Molina, 1979) afirma que esta pintura sería la más antigua del sitio aunque igualmente podría ser contemporánea a la del cuarto de fondo del edificio A dada la similitud de los materiales.

35A-2: Queda enterrado con el edificio. Como se mencionó al hablar del mural del aposento del edificio A (p. 119), ambos murales pudieron ser parte de un mismo mensaje y tener vidas ligadas.

Edificio F (36)

36-1: La estructura tuvo un estado inicial parecido al observado. Sin embargo su límite poniente se pierde en el relleno que sostiene las estructuras superiores. El muro oriente y su retorno del lado norte, muestran el típico talud-tablero de Cacaxtla. Se observan en el piso, huellas de columnas actualmente desaparecidas.

35-2: Tiene una modificación menor que consiste en un pequeño muro en la puerta.

36-3: Más adelante queda enterrada por las estructuras sur del Palacio V (33).

Muro con talud frente al edificio F (42)

42-1: Frente al edificio F, arrancando a un nivel cercano a -2.14 m, se observa un talud piramidal y en su parte superior un elemento vertical que llega hasta el piso del Palacio, con un relieve parecido a un tablero. Tanto el talud como el paramento vertical fueron estucados. Se evaluaron varias posibilidades para explicar este conjunto.

- El talud y el muro corresponden a la parte trasera de un edificio ubicado al mismo nivel que el edificio F. Sin embargo la forma del talud y el ancho de la parte horizontal entre su esquina y el muro, no corresponden a la conformación usual de un talud-tablero de Cacaxtla.
- Tanto el talud como el muro corresponden a un desnivel entre la Plaza de los Altares (00) y el edificio F. En esta configuración el desnivel estaría muy alto, por consecuencia el empuje de tierra sobre la parte vertical del mural sería muy fuerte y la estructura se presentaría debilitada. En caso de querer este desnivel, es más probable que los constructores de Cacaxtla hubieran construido un talud sobre toda la altura.
- El talud corresponde a un desnivel y el muro, al fondo de un edificio ubicado a un nivel más alto que el edificio F. Al construir la Plaza de los Altares (00), este edificio fue rebajado.

42-2: La extensión del Palacio recubre el muro y el talud al mismo tiempo que el edificio F.

Reconstrucción

Los dos edificios que conforman el conjunto F fueron recubiertos por las estructuras del Palacio, conservando las estructuras con sus alturas casi finales y removiendo la techumbre por lo cual su reconstrucción no presentó muchos problemas.

El edificio F tiene una configuración parecida a los edificios A y C sin modificaciones significativas. Del lado del talud sur, es un pórtico parecido a lo que fue definido para el edificio A.

El cuarto de las pinturas y el pórtico F, habrían sido unidos para conformar un solo edificio con una puerta central. En una segunda fase se tapa la puerta entre el pórtico y el cuarto, y se construye la escalera.

Pórtico sur (39)

39-1: Es la continuidad del pórtico sur del edificio F (36) y en la esquina sur poniente se une con el conjunto de Venus (32). En su parte posterior varios muros muestran la presencia de cuartos, sin embargo toda esta parte fue posteriormente recubierta por la pirámide sur (31) y el estado actual de las excavaciones no permite ver más.

39-2: Es parcialmente destruido al ser construida la pirámide sur.

Edificio de la celosía (23)

De este edificio cuya parte interior se encuentra a -1.84 m y el piso exterior cerca de -2.11 m, se observa solamente una parte ya que tanto su parte sur como la norte no han sido excavados por ser recubiertos por estructuras del Palacio III (22). Sin embargo se alcanza a definir el límite norte y se observan tableros parecidos al de los edificios A (4), B (5), C (6), D (11), F (36).

23-1: A esta configuración corresponden las estructuras visibles en la actualidad.

23-2: La celosía fue recubierta por la plataforma del Palacio III (22), fase que corresponde a la construcción de la escalera del Templo Rojo (24).

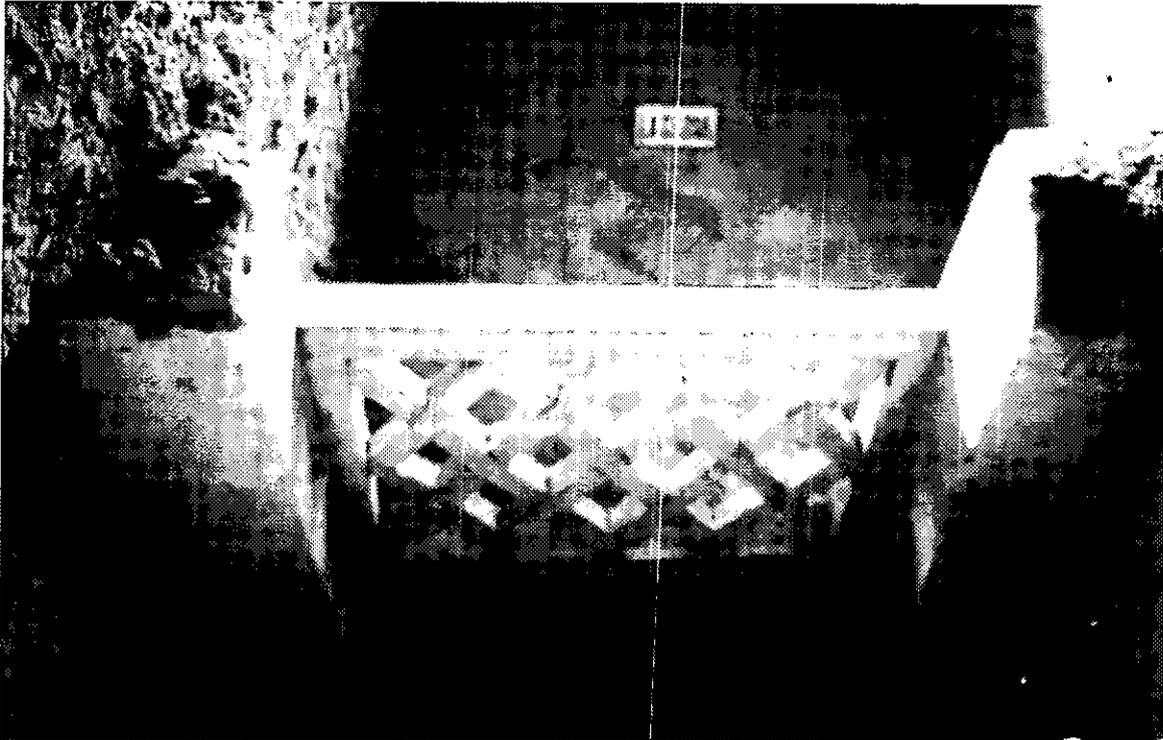


Figura 27. La celosía.

Reconstrucción

El estado actual de las excavaciones muestra solamente el extremo del edificio de la celosía. Se puede suponer esta construcción era simétrica en relación con el centro de su fachada, configuración que aparece para los edificios A, B, C y D. Sin embargo se desconoce la cantidad de columnas o si el entrecolumnado central pudiera ser más ancho que los entrecolumnados laterales como es el caso de los edificios A, C y E, casos donde hay solamente dos columnas; a cambio, los pórticos de los edificios B y D están compuestos por seis columnas. Se puede observar como el muro de fondo del pórtico continúa hacia el sur, hasta un pequeño tablero que sobresale del relleno. No se alcanza a ver si después del tablero, el muro sigue.

Se realizaron varias pruebas para ver qué cantidad de columnas pudieron conformar el pórtico. Se emplearon varios anchos de columnas y la configuración más viable fue la correspondiente a dos columnas con el espacio central más ancho.

En las esquinas del edificio, se observa el tablero-talud cacaxtleco aunque éste está compuesto de pocos paneles por el tamaño reducido de la mocheta.

Templo rojo (24)

El Templo Rojo presenta en ambos lados pinturas en un excelente estado de conservación, con fondo rojo, color que explica su nombre.

24-1: En la parte trasera de la escalera se observa la presencia de un “pasillo” estucado con guardapolvo y una pintura que representa una serpiente emplumada en ambos muros. Del lado norte, la serpiente se pierde en el relleno que fue realizado para construir la plataforma del Palacio II (21) y III (23); del lado sur fue recubierta por la escalera, así que no se conocen ni la cabeza, ni la cola de la serpiente. También de esta época son las columnas ubicadas frente a la escalera. En el piso están pintados esqueletos y en la parte vertical de la banqueta, glifos que han sido asociados a nombres de ciudades conquistadas por los habitantes de Cacaxtla (Carlson, 1993). Desprendimientos de la última capa pictórica del mural oriente de la escalera, permiten ver fragmentos de la pintura que corresponde a esta fase y aparecen plumas que parecen pertenecer a la cola de la serpiente inicial, similar a la cola de la serpiente de la segunda fase.

24-2: El pasillo queda tapiado por una escalera que une las estructuras (21) y (22) en la parte superior, a un nivel inferior que corresponde aproximadamente a la celosía (23), al conjunto de Venus (32) y al conjunto F (35, 26). Asimismo, se rellena el espacio entre la columna oriente y la esquina de la escalera. Los dos muros laterales de la escalera son recubiertos por la pintura mural que se muestra en la actualidad. Se observa desde el piso superior, la presencia de la columna que quedó tapiada. El guardapolvo rojo que recubre la base de la columna queda

recubierto por un estuco rugoso. Tanto la pintura de los esqueletos como la de la banqueta sufren mutilaciones al ser modificado el Templo Rojo, sin embargo no son borradas.

24-3: Más adelante se rellena totalmente el Templo Rojo y se constuye la pirámide sur.

Pinturas del pasillo (24A)

24A-1: Representa una serpiente emplumada sobre una cenefa acuática en ambos muros del pasillo, frente a frente. Su cabeza sigue enterrada dentro del relleno del Palacio.

24A-2: Se cancela esta pintura con la construcción de la escalera del Templo Rojo. La nueva capa pictórica recubre la extremidad de la serpiente que corresponde a su cola.

Pintura de la escalera (24B)

24B-1: A ambos lados de la escalera, se pintan dos murales.

24B-2: Los murales quedan mutilados por la construcción de una estructura superior que lo deja enterrado.

Pintura del piso (24C)

Muy pocos pisos están pintados en Mesoamérica lo cual da una particular relevancia a estas pinturas. Existen por un lado, pintado sobre el piso cerca del borde de la banqueta se observan dos esqueletos entrelazados, parte de un tercero y; en la cara vertical de la banqueta varios elementos aislados y alineados.

24C-1: Pintada de los murales.

24C-2: Modificaciones del Templo Rojo y/o de la plaza causan mutilaciones y daños en el mural de los esqueletos. Se puede observar una restauración de la época.

24C-3: Quedan enterrados con el Templo Rojo.

Reconstrucción

Dos etapas constructivas marcan el Templo Rojo. En la primera, en vez de la escalera existe un pasillo, mientras en la parte frontal, un pórtico. En la segunda, el pórtico queda tapado

del lado derecho y el pasillo se transforma en una escalera que llega al nivel del Palacio. Igualmente toda la región periférica del Templo Rojo queda enterrada por el piso del Palacio.

Para la primera fase constructiva, los datos que se tienen son escasos para reconstruir un edificio en su totalidad. Se observa que el pasillo del Templo Rojo está justo en el eje de simetría de la gran plaza sur, y que las columnas corresponden perfectamente con las columnas de enfrente, a continuación del edificio F. El “pasillo” como un espacio alargado, interior, pintado con un cenefa acuática, no tiene equivalente en los edificios aislados vistos hasta el momento y solamente podría ser comparado con el pasillo del Palacio. Sin embargo, en este último caso el pasillo sirve de unión entre la plaza norte y la Plaza de los Altares y es parte de un conjunto de varios cuartos. Es posible que el Templo Rojo haya quedado unido a la celosía, pero el estado actual de las excavaciones no permite adivinar de qué forma. Se encontró una morfología de pasillo en un edificio que limita el juego de pelota de Copán. (Marquina, plano p. 579).

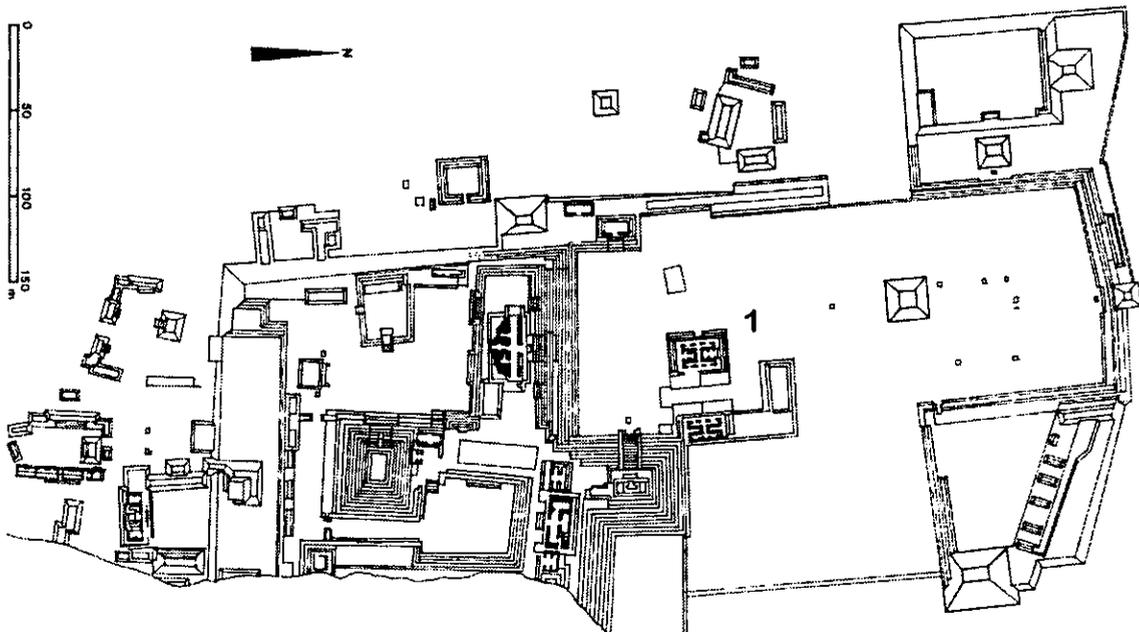


Figura 28. Copán. (1) El juego de pelota. (Marquina)

En la descripción de este edificio, Marquina menciona que pudo existir una relación entre Copán y Xochicalco por lo parecido de la configuración general del juego de pelota, los anillos

empotrados y la presencia en ambos de “cabezas de guacamaya semejantes” (Marquina, p.587). De las múltiples interrogantes sobre el origen de los olmeca-xicalancas, una hipótesis desarrollada por W. Jiménez Moreno plantea que serían inmigrantes que habrían llegado de Copán hacia Potonchan cuando la civilización maya empieza su decaimiento hacia el siglo X. (Kubler, 1980). Igualmente existe una fuerte relación histórica entre Cacaxtla y Xochicalco. Sin embargo no existen suficientes datos arqueológicos para dar a este conjunto una configuración parecida a la del juego de pelota de Copán. Por ello, el Templo Rojo fue modelado de la manera más sencilla posible, procurando integrar cuartos atrás de los muros del pasillo y remarcando su ubicación en el eje de la plaza mediante la reproducción del pórtico ubicado del lado sur.

En la fase 4, el Templo Rojo se reduce a la escalera, una columna y del lado derecho un muro. El espacio remitente entre el nivel del piso superior y las últimas plumas de la serpiente no es suficiente para la representación de la cabeza de la serpiente. En ese sentido, existen varias posibilidades para la desembocadura de la escalera:

- los muros laterales de la escalera sobresalen del nivel del piso superior para dejar lugar a la cabeza de la serpiente;
- la escalera desembocaba en un cuarto. Se descartó esta opción porque no se ve ninguna huella de esta estructura, y habría quedado muy cerca de las estructuras (21) y (22).

Pirámide sur

Basamento piramidal (31)

31-1: Un basamento piramidal cubre el Templo Rojo pero la presencia de una columna enterrada con perfil que se adosa a un talud permite pensar que inicialmente, no tenía la extensión hacia el norte que podemos observar en la actualidad. De la misma forma, en esta fase, su límite hacia el poniente corresponde al talud (34).

31-2: El basamento se extiende hacia el norte y el poniente, además se construyen en su parte superior otros basamentos piramidales.

Talud enterrado (34)

34-1: Este talud corresponde al desnivel entre el conjunto de Venus (32) y la parte superior de la pirámide sur (31), por lo que pudo corresponder a su primer límite del lado poniente antes de su extensión hacia Venus.

34-2: Queda enterrado al ser extendida la pirámide sur.

Reconstrucción

La parte superior de la pirámide sur se encuentra muy deteriorada y ha desaparecido su límite del lado sur. La reconstrucción fue realizada asumiendo que el eje de la escalera central define un eje de simetría de la pirámide. Resultó interesante ver como el reflejo especular de los límites norte de la pirámide, utilizando como ejes de simetría los ejes marcados por la escalera principal y las escaleras superiores, permitían definir un límite sur coincidente en ambos casos. Es decir que las dos escaleras no están alineadas para corresponder con el centro del ancho de la pirámide.

La pirámide fue reconstruida en sus dos etapas.

Conjunto de Venus (32)

Este conjunto ubicado a -1.84 m, debe su nombre a las dos pinturas que cubren dos columnas interiores del cuarto central.

32-1: Existiría una columnata con orientación norte-sur y aposentos del lado poniente.

32-2: Varias entrecolumnas quedan rellenas y se construye el cuarto de Venus, con lo que disminuye el ancho de las dos columnas que reciben las pinturas.

32-3: Se construye una escalera del lado norte para comunicar este conjunto con el nivel del Palacio III (22). Este evento puede haber ocurrido al mismo momento que el 32-2.

32-4: El conjunto queda enterrado al ser extendida la pirámide sur, es la fase que hemos definido como 31-2.

Pinturas de Venus (32A)

32A-1: Las pinturas fueron realizadas sobre columnas, después de la transformación del pórtico. Representan a un hombre con cola de alacrán y a una mujer (lámina 14). Están rodeados de estrellas de Venus, elemento típico de Teotihuacan ligado a Quetzalcóatl, y al sacrificio humano. Según Carlson (1993), este cuarto sería uno de sacrificio; en el mural de La Batalla, más que una pelea, quedaría plasmada esta ofrenda sagrada; el hombre ricamente ataviado representado sobre un fondo parecido a las columnas de Venus, sería un sacrificado de alto rango. Este sacrificio estaría ligado a la caída de Teotihuacan, en la cual habrían participado los habitantes de Cacaxtla.

32A-2: Entierro de las estructuras y de la pintura.

Reconstrucción

En una primera fase el conjunto de Venus es un pórtico. Para ubicar los muros faltantes, se supuso que las puertas visibles de ambos lados estaban centradas en relación con base en el cuarto interior. Resultó que la puerta central quedó centrada también en relación con su cuarto.

En la fase 4, el pórtico es recortado para definir en su centro el cuarto de Venus, Las columnas centrales son recortadas y reciben las pinturas. En los extremos las entrecolumnas son rellenadas para conformar muros. Del lado norte, una escalera lleva al nivel del Palacio.

En la fase 7, el conjunto queda enterrado por la extensión de la pirámide sur.

Talud (38)

38-1: Este talud corresponde a un desnivel entre el pórtico sur poniente (39) y las estructuras (33). Podría ser el indicio de donde se articulaba el nivel del Palacio con todo el conjunto inferior del Templo Rojo (24) y de Venus (32). Fisuras en el piso de la Plaza de los Altares (00) observables en ambos lados de la escalera del basamento piramidal (31) muestran que este desnivel continuaba en dirección del norte. Su función sería justificada hasta la construcción de la pirámide sur (31).

38-2: Queda enterrado al ser elevado el nivel de la parte poniente.

ELABORACIÓN DEL MODELO TRIDIMENSIONAL

Las unidades geométricas fueron modeladas en equipo Macintosh y se utilizó el paquete de Diseño Asistido por Computadora Microstation de Intergraph de Bentley. La especialización del software hace que estos paquetes, muy precisos para el modelado, no posean muchas posibilidades para *render* y animaciones y por otra parte, que los paquetes que sí resuelven este problema sean particularmente limitados para trabajar la geometría de las entidades, con coordenadas precisas. Su enfoque hacia animación para publicidad o cinema no requiere de una alta precisión geométrica sino que se satisface con obtener resultados visualmente atractivos.

Por estas razones, la volumetría fue primero definida con un programa de CAD que trabaja en forma precisa para luego ser transferida a programas que permitieran incorporar la definición de materiales, luces y finalmente producir imágenes y animaciones. Vertigo fue escogido por su costo relativamente bajo y por presentar una interfaz gráfica a las herramientas de RenderMan¹⁷, además es un programa ampliamente usado en el campo de la animación por computadora. RenderMan calcula una imagen utilizando algoritmos de iluminación local y mapeos para reflejos y sombras. Su fuerza reside en el hecho de que permite la elaboración de rutinas de programación, abriendo el espectro de posibilidades mientras que la mayoría de los programas quedan limitados por los criterios seguidos por sus desarrolladores. Sin embargo su uso es complejo; el usuario necesita controlar numerosos parámetros y no posee interfaz gráfica. Esta limitación queda resuelta con el empleo de Vertigo. Últimamente se utilizó también el programa Lightscape para generar imágenes con un mejor realismo de la iluminación. Lightscape recurre a algoritmos de radiosidad a los cuales añade *ray tracing* para el cálculo de imágenes.

¹⁷ RenderMan es un producto desarrollado por Pixar.

La transferencia de la información de un paquete a otro debería ser en principio un paso transparente; desgraciadamente no lo es, y durante este proceso, parte de los datos pueden desaparecer o transformarse en algo no deseado. Por lo tanto se vuelve necesario trabajar nuevamente las entidades geométricas desde el paquete de CAD o a partir del sombreador, según el problema presentado.

Cada programa tiene su propia forma de organizar y conservar la información. Por la necesidad de intercambiar material entre diferentes programas, formatos estándares de transferencia han sido desarrollados. En el caso de los paquetes CAD, los estándares más usuales son el DXF y el IGES. Éste primero resultó mejor que el segundo aunque presenta muchas deficiencias en sus capacidades, hecho que se debe a la aparente despreocupación o al poco interés de las compañías por mejorar la transportabilidad entre programas.

DXF es un formato limitado que no ha incluido los avances de los modeladores. Por ejemplo superficies definidas con agujeros se transfieren sin ellos, en tanto, superficies NURBS se vuelven una multitud de polígonos y se pierde la definición de los objetos resultados de operaciones booleanas. A este problema se añaden las deficiencias mismas de los modeladores al momento de generar el archivo DXF, al no aprovechar su potencial; y las de los sombreadores en no traducir en forma adecuada elementos del archivo DXF. Por ejemplo Microstation¹⁸ no soluciona adecuadamente la transferencia de entidades agrupadas, y Vertigo no entiende la lógica de los bloques cuando maneja un concepto parecido llamado *instance*.

Las entidades geométricas fueron ordenadas por grupos, siguiendo una lógica que facilitara el trabajo posterior de aplicarles materiales, y con vista a generar animaciones donde se pueda controlar la visibilidad de los edificios. Se agruparon los elementos que corresponden a edificios bien identificados, y se definieron subgrupos que agruparan las entidades de un mismo edificio en relación con su acabado.

¹⁸ MicroStation es un producto de Bentley.

Las primeras imágenes generadas se realizaron directamente con RenderMan al no contar todavía con Vertigo. Para ello se creaban archivos RIB¹⁹ desde MicroStation. Estos archivos son de tipo texto y pueden ser modificados desde un procesador de palabra. Así al editar el texto, se especificaron los materiales de los objetos geométricos, las luces y sus parámetros y también la ubicación de la cámara antes de calcular las imágenes con RenderMan. Evidentemente, trabajando de esta forma resultaba muy complejo controlar la orientación de las normales de las superficies²⁰, y partes de los objetos mostraban “el lado oscuro del polígono” al momento del cálculo de la imagen. Para resolver este problema, se integró al archivo una línea de código con objeto de que todos los polígonos tuvieran una doble normal. El resultado gráfico era adecuado, sin embargo se alcanzaba sacrificando el tiempo de cálculo. Parte de las ventajas de contar con un editor gráfico de las entidades geométricas fue que sin mayor dificultad se podía averiguar el sentido de la normal de cada una de las entidades geométricas e cambiarlo de sentido si fuera necesario.

Un problema adicional consistía en el hecho de que la transferencia traduce todas las entidades geométricas a polígonos independientes. Por esto fue necesario desarrollar una pequeña rutina²¹ para que polígonos adyacentes compartieran realmente los vértices que tienen en común, lo cual permitía modificar la ubicación de un vértice para que los polígonos que lo compartían se actualicen en consecuencia. Para el uso de las volumetrías con Lightscape, no fue necesario aplicar este proceso ya que este programa trabaja solamente polígonos independientes. Las exigencias de Lightscape son distintas y ligadas a la radiosidad. Por ejemplo, si dos polígonos

¹⁹ RIB es el formato desarrollado por Pixar. RenderMan lo interpreta para calcular las imágenes.

²⁰ La normal de una superficie es su vector perpendicular, y su orientación depende del orden con el cual fueron definidos los vértices del polígono. Por omisión, se supone que el sentido positivo de la normal indica el lado exterior del objeto mientras que el sentido negativo indica su interior. Para que el cálculo sea más rápido, el sombreador efectúa el cálculo solamente del lado positivo de la normal.

²¹ Esta rutina fue desarrollada por Ian García Olmedo en el Laboratorio de Visualización de la DGSCA.

llegan a superponerse aunque sea por la séptima decimal de una de sus coordenadas, aparecen efectos de sombra no deseados.

RESTITUCIÓN DE LA PINTURA MURAL

El registro de la pintura mural del sitio, se realizó a través de varios medios, *i.e.*, con calcas de los murales en caso de que existieran, o con fotografías.

Al contar con las calcas de algunos murales, se definió una metodología para reproducir a escala los contornos de los elementos de los murales (tesis de Claudia Lupone, en proceso). Esta metodología fue desarrollada para la documentación de la obra y de las actividades de restauración y proporciona un registro que permite una ubicación precisa de los diferentes elementos que componen la pintura y la captura de la intervención de restauración. Sin embargo, tiene la desventaja de eliminar la información relativa al color y de proporcionar solamente contornos. Después, los interiores de cada zona fueron rellenados con los colores correspondientes (tesis de Selene Salas, en proceso).

Los murales registrados de esta forma fueron:

- El hombre con cacaxtli.
- La rana jaguar.
- Las serpientes entrelazadas.
- La mujer y el hombre alacrán del templo de Venus.

El procedimiento resulta muy elaborado y todioso con un resultado de “demasiada calidad” para solamente incluir una imagen en un modelo tridimensional. Los objetivos de la reconstrucción no requieren de una reproducción con un alto nivel de precisión de los murales, sino que las pinturas solamente participen de un ambiente general y en la definición espacial. Ver los deterioros es un requisito indispensable en restauración; aquí, al contrario, estorban ya que se busca el estado del sitio cuando fue recién construido. Así, para los demás murales se emplearon fotografías, diapositivas o representaciones en libros, las cuales fueron digitalizadas.

- La cenefa del pasillo del Templo Rojo (lámina 12) fue extendida para cubrir todo el muro, se inventó la cola de la serpiente, utilizando una que recubrió este mural. La cabeza fue retomada de la serpiente del pórtico A. Se estudió la posibilidad de que la serpiente tuviera una configuración parecida a la serpiente de Xochicalco, es decir viendo hacia su cola y a la misma altura que ésta. Sin embargo sus plumas se quedaban en la parte interior del cuerpo, cuando en el edificio A están sobre la espalda de la serpiente.
- De la misma forma, para los murales de la escalera se añadió la cabeza de la serpiente en ambos lados de ésta, las plantas de maíz fueron extendidas y la cola de la serpiente completada.
- Un tercer esqueleto fue añadido a la pintura sobre piso (lámina 13), para ello se retomó el diseño del esqueleto ubicado frente a la columna.
- En el caso de los murales de Venus (lámina 14), utilizando el brazo existente en el hombre se reconstruyeron su segundo brazo en forma simétrica y el brazo de la mujer. Se añadió un seno en la mujer y el collar, que según los fragmentos de pintura sí habría existido. No fue posible reconstruir la cabeza, pues se desconoce aún de que lado miraba.²⁴

DEFINICIÓN DE LOS ACABADOS

Los materiales encontrados en Cacaxtla son: un estuco liso de color crema, casi blanco en superficies horizontales; un estuco rugoso del mismo color para las superficies verticales; y en las partes inferiores de los muros, una franja de acabado pulido que puede ser blanca o roja según el recinto. En las primeras imágenes generadas, los acabados fueron definidos como mates o brillantes de un solo color. Sin embargo después de las primeras pruebas, los muros parecían hechos de plástico y se tuvieron que desarrollar varias estrategias para ensuciar, cubrir de polvo y

²⁴ Los fragmentos de la pintura de la mujer existen y se está trabajando en la restitución del mural. Según al arqueólogo David Morales, actualmente encargado del sitio, la mujer tendría el pelo liso.

Se hizo un programa para corregir la distorsión de las imágenes debida a efectos de perspectiva.²² Contrariamente a la metodología de registro desarrollada en el capítulo sobre la digitalización del mural O’Gorman de la Biblioteca Central y dado que no se requiere de tanta precisión, una sola fotografía cubriendo todo el mural fue suficiente para obtener los resultados deseados. Los murales representados a partir de fotografías fueron:

- El mural del hombre jaguar ubicado en el pórtico A.
- El mural del hombre águila ubicado en el pórtico A.
- Las partes interiores de las jambas de la puerta central del pórtico A.
- El piso pintado con representaciones de esqueletos e íconos en la superficie vertical del escalón.
- El cuerpo de las serpientes que se encuentran en la parte inferior de los dos muros atrás de la escalera del Templo Rojo.

El mural de La Batalla fue digitalizado a partir de los dibujos realizados por Francisco Villaseñor y publicados en *Cacaxtla la iconografía de los olmeca-xicalanca* (Marta Foncerrada de Molina, 1993). Fue necesario cambiar sus colores y se completaron sus faltantes.

Después de tener en forma digital los murales, las imágenes fueron retocadas para restituir al mural una apariencia de “recién” pintado con distintos niveles de intervención. Las grietas fueron eliminadas y los colores fueron corregidos. Los faltantes fueron restituidos cuando era factible adivinar su contenido. Adicionalmente se hicieron propuestas de “reconstrucción”.²³

- En los murales del pórtico del edificio A, el hombre alacrán y el hombre jaguar (lámina 7), se terminó la parte superior con un retorno de la cenefa acuática que enmarca la pintura en la parte inferior y lateral. Asimismo se completó la cola del jaguar y de la serpiente junto con los bastones de mando.

²² Rutina desarrollada por Carmen Ramos y Héctor Perales de la DGSCA.

²³ Los trabajos de restitución y modificación de las pinturas fueron realizados por Selene Salas.

modelar irregularidades para que el aspecto final de las superficies de los edificios adquiriera más “materialidad”. Según el programa empleado las técnicas para obtener este efecto son distintas y permiten obtener más o menos realismo.

Una de las fuerzas de RenderMan, consiste justamente en la posibilidad de desarrollar rutinas para definir los materiales recurriendo a funciones aleatorias. Para las superficies cubiertas por un estuco fino, se simuló la aplicación de polvo utilizando una función *noise* la cual proporciona un número entre 0 y 1, dependiente de las coordenadas. El color resultante es una mezcla entre el color original de la textura y tono del polvo y ambos se combinan en una proporción definida por la función. Para que las manchas de polvo tuvieran un sentido longitudinal, en la función *noise* se lleva al cuadrado la componente x de la coordenada.

Definición del estuco fino

```
surface
fino(
/*declaracion de las variables*/
    float Ka = 1.0,
        Kd = 0.8,
        txtscale = 1.5,
        porcent;
    color polvo = 0)
{
    point Nf = faceforward(normalize(N),I),
        Ploc = transform("shader",P);
    color cout;
/* calculo del color en este punto de la superficie*/
    cout = mix(Cs, polvo, porcent * (noise(txtscale * (xcomp(Ploc) *
xcomp(Ploc), ycomp(Ploc), zcomp(Ploc)))));
    Oi = Os;
/* calculo del color resultante de los componentes de respuesta a
la luz y de la iluminacion*/
    Ci = Os * cout * (Ka*ambient() + Kd * diffuse(Nf));
}
```

Se retomó la misma estrategia para los guardapolvos blancos y rojos, para que la mezcla de dos colores simulará un efecto de marmoleado causado por la combinación de varios elementos o pigmentos para obtener el acabado final.

Algunas superficies, hechas con la misma mezcla que el “acabado fino” muestran un acabado más rugoso. Para su representación, añadimos a la superficie “fino”, un efecto de desplazamiento de superficie, también con una función *noise* (Figura 29).

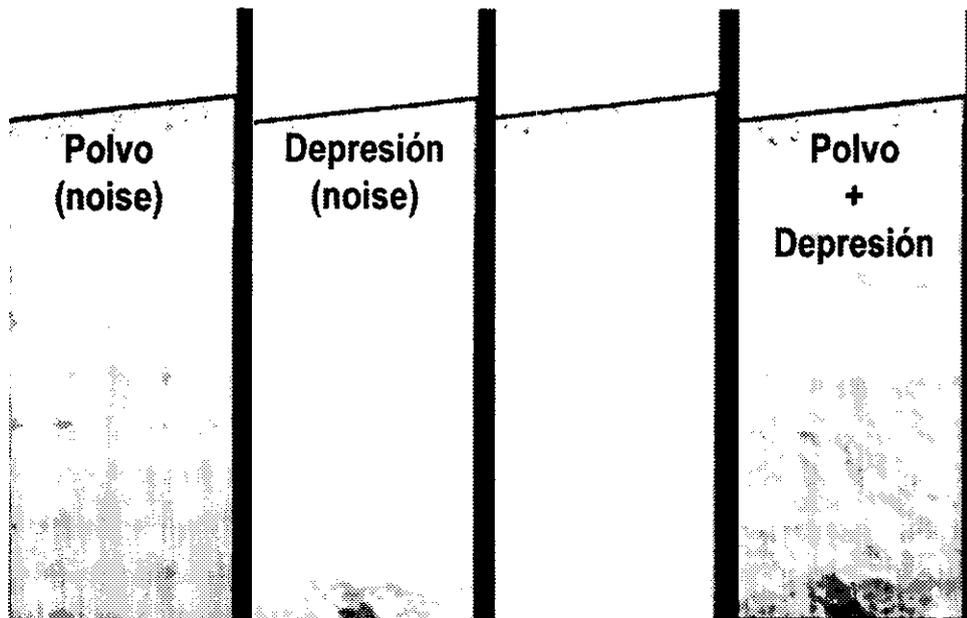


Figura 29. El material combinado con funciones aleatorias para obtener el estuco liso agregando polvo y el estuco rugoso agregando polvo y turbulencia de la superficie.

Para las superficies cubiertas por murales se utilizan las técnicas de mapeo de texturas, sin embargo algunas pinturas no corresponden a rectángulos rellenos de color y presentan un perfil irregular. Como los archivos de imágenes son matrices rectangulares, los píxeles que pertenecen al muro de fondo, y no a las partes de pintura mural, fueron definidos con un valor de “0” en el canal alfa. Al momento del cálculo del render, al encontrar que el píxel de la imagen usada para el mapeo de textura, tiene un valor de “0” en el canal alfa, se asume que es transparente.

Definición del material que recibe el mapeo de las pinturas

```
surface
alfapintura (
float Ks=.5,
Kd=.5,
```

superficie no exceda en luz y se reduce el componente de luz difusa K_d . Resultado, si la cámara no está ubicada en forma simétrica con la fuente de luz, en relación con la normal a la superficie, una superficie brillante aparece más oscura que una superficie mate. Existen en la actualidad aparatos que pueden medir los componentes colorimétricos de un material, sin embargo no incluyen todavía sus componentes de respuesta a la luz K_a , K_d y K_s . La percepción de las imágenes calculadas depende también del medio para verlas, los colores cambian de un monitor a otro, de una forma de impresión a otra y de la luminosidad ambiental.

En el registro de las pinturas, este problema se agudizó por la importancia que tiene el color en una pintura, y por las condiciones difíciles con las cuales se hicieron las tomas fotográficas. La presencia del techo genera condiciones de iluminación donde las partes bajas de la pintura son muy oscuras y las partes altas están demasiado iluminadas, todo esto provoca además, un problema de exposición por el efecto de contra luz. Adicionalmente, el digitalizador empleado para la digitalización de las transparencias llevaba los colores hacia los verdes. Finalmente los colores mismos que presentan las pinturas tampoco corresponden a lo que eran recién pintados. La presencia de polvo, sales y capas de productos empleados en la restauración con el efecto del sol y las transformaciones de los materiales debidas al tiempo, modifican el color original. La restitución de los colores quedó aproximada. Por sí misma, justificaría todo un estudio.

EJEMPLO DE VISUALIZACIÓN

La visualización se entiende como el procedimiento que permite hacer visibles a través de imágenes, fenómenos que no lo son. Pueden ser fenómenos físicos, meteorológicos o algún concepto abstracto. Así la conversión de datos numéricos, como es el caso de la definición digital de la arquitectura del sitio de Cacaxtla a una imagen, constituye un proceso de visualización. Para la arquitectura, lo importante es que la imagen obtenida corresponda a un estado del sitio,

```

Ka=1, roughness=.1;
color specularcolor=1;
string texturename = ""; )
{
point Nf, V;
color Ct;
Nf = faceforward( normalize(N), I );
V = -normalize(I);
if (texturename != "")
{Ct = color texture(texturename);
} else{Ct = 1.0;}
/* si el valor del pixel en el cuarto canal es zero, entonces es
transparente, sino es opaco*/
if (color texture(texturename[3]) == 0)
{Oi= 0;
} else {Oi = 1;}
Ci = Oi * ( Cs * Ct * (Ka*ambient() + Kd*diffuse(Nf)) +
specularcolor * Ks * specular(Nf,V,roughness) );
}

```

Finalmente, existen en Cacaxtla dos bajorelieves cuya simulación no puede ser modelada desde un modelador geométrico, ni tampoco interpretando un mapeo de textura como si fuera una pintura. El bajorelieve es un juego de volumetría, en este caso monocromática, cuya apariencia depende de la luz que recibe. La imagen del bajorelieve fue redibujada en tonos de grises proporcionales a la profundidad. A los pixeles que representan las superficies más frontales se les asignó el valor “blanco” y a los que afectan a superficies más traseras el valor “negro”. Se escribió una rutina que retoma este mapeo de grises para modificar la orientación de la superficie cambiando su posición y normal en este punto (ver Figura 11, p. 39).

Los problemas encontrados en la definición de los materiales

Resulta difícil reproducir exactamente el color de una superficie. El color es una respuesta compleja a una serie de factores y depende de las características del material, de su respuesta a la luz, su rugosidad, tanto en la realidad como en lo virtual. Por ello, definir los parámetros de un material es poco intuitivo y muy subjetivo. Además, en lo virtual el aspecto final de una superficie depende de los algoritmos empleados en el cálculo de la imagen, y se obtienen resultados distintos si se utilizan algoritmos con iluminación global o local. Por ejemplo, en el caso de un material pulido y brillante, se aumenta el factor de luz especular Ks y, para que la

resultado de un análisis de cómo pudo haber sido el sitio. Por lo tanto, en este caso, se visualiza una hipótesis de reconstrucción. Adicionalmente, se busca obtener realismo.

La imagen del conjunto F “reconstruido” fue realizada con RenderMan y se puede apreciar la calidad de la textura de los materiales (Figura 30). RenderMan trabaja la iluminación en forma local, empleando técnicas de mapeo para la inclusión de sombras y reflejos especulares. Se puede suponer que la iluminación de ambientes naturales requiere de una sola fuente de luz cuando se busca una simulación de la luz solar. Sin embargo, con los algoritmos de iluminación local, al hacerlo así muchas superficies quedan ocultas. Para compensar este problema, se añaden luces complementarias y auxiliares que alumbran las superficies que deberían haber quedado iluminadas por los rebotes luminosos. Este proceso es tardado y de ensayo-error ya que al añadir luces, otras partes del modelo empiezan a saturarse. En la búsqueda de una visualización fiel del espacio de Cacaxtla, la simulación de la iluminación debería llegar a ser más apegada al comportamiento físico de la luz, como fenómeno natural, para reproducir en forma fidedigna las condiciones del lugar, hora del día y temporada; en caso contrario, el resultado no corresponde a una simulación física real de la luz natural, y queda sujeto a la subjetividad del creador de las imágenes. Se puede ver en el “Templo de Venus” (Figura 30), como varios programas pueden ofrecer resultados tan distintos. El único que de hecho está concebido para simular el trabajo físico de la luz es Lightscape. Para ello, no solamente integra algoritmos de radiación y de *ray tracing* pero, adicionalmente permite que el usuario defina las condiciones de iluminación con los parámetros reales, por ejemplo, día de mucho o poco sol.

El espacio arquitectónico llamado el “Templo Rojo” es un buen ejemplo para mostrar en qué medida las distintas herramientas de cómputo pueden ser empleadas para entender una hipótesis de su estado en varias fases constructivas.

Las vistas del modelo reproducen, la visión de un hombre con su ojo ubicado a 1.40 m en relación al piso, con un ángulo de visión de 60° en el sentido horizontal y una proporción de ancho por largo de la imagen de 1.5.

Como se ha mencionado anteriormente, en su última fase constructiva, el “Templo Rojo” fue enterrado bajo una pirámide. Las excavaciones abrieron la pirámide para dejarlo al descubierto, de esta forma, el visitante puede apreciar las pinturas ubicadas a ambos lados de la escalera, una columna y, atrás de la escalera, un muro estucado que tiene en su parte baja una serpiente emplumada como cenefa. Las extremidades de la serpiente desaparecen de un lado, en el relleno que sostiene las estructuras superiores y del otro lado, bajo la capa del mural de la escalera.

La reconstrucción hipotética muestra que en una primera fase, en el lugar de la escalera existía un pasillo con la pintura de la serpiente emplumada de ambos lados.

En una segunda fase, el pasillo queda condenado, se construye un conjunto en la parte superior y una escalera para unir los dos desniveles. Asimismo, el lado derecho del pórtico queda relleno y por ello el mural derecho de la escalera es más alargado que el mural izquierdo.

En la siguiente etapa, el Templo Rojo queda relleno y se construye en la parte superior una estructura adosada a un talud.

Y finalmente, se construye la pirámide que todavía se puede apreciar.

Este ejemplo ejemplifica la imposibilidad de reconstruir físicamente un sitio arqueológico dado que se tendría que escoger una época de la historia, cuando lo importante de un sitio es mostrar **toda** su historia para entender su evolución. Si en este caso, se escogiera la fase más espectacular, cuando los murales flanquean la escalera, la lógica constructiva llevaría a destruir la pirámide superior y rellenar la parte trasera de la escalera, tapando la cenefa; y si se extiende el proceso al conjunto del sitio, la destrucción sería masiva. Con el objetivo de obtener un “objeto congruente” se sacrificaría la historia. Asimismo el sitio quedaría congelado a una de sus épocas, impidiendo mayores excavaciones y el aumento del conocimiento sobre la historia de sus constructores.

Nota: la saturación en amarillo se debe al sistema de impresión.

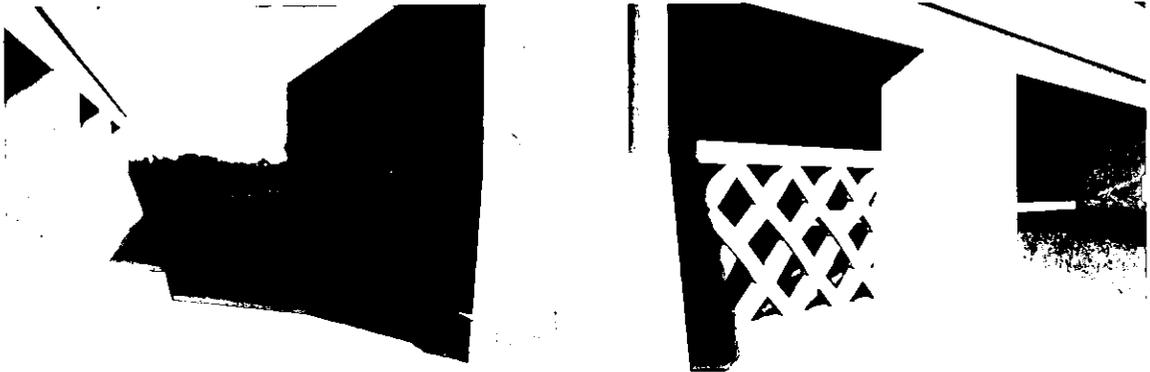


Figura 30. Conjunto F y Celosía. Reconstrucción digital. Imágenes obtenidas con RenderMan.

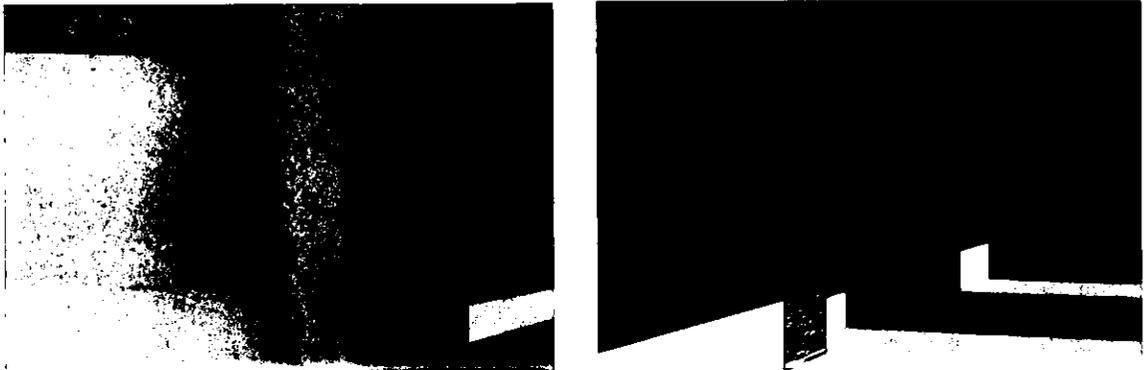


Figura 31. El edificio A. Reconstrucción digital. Vista desde el interior del pórtico y desde el aposento. Cálculo con radiosidad y ray tracing utilizando Lightscape.

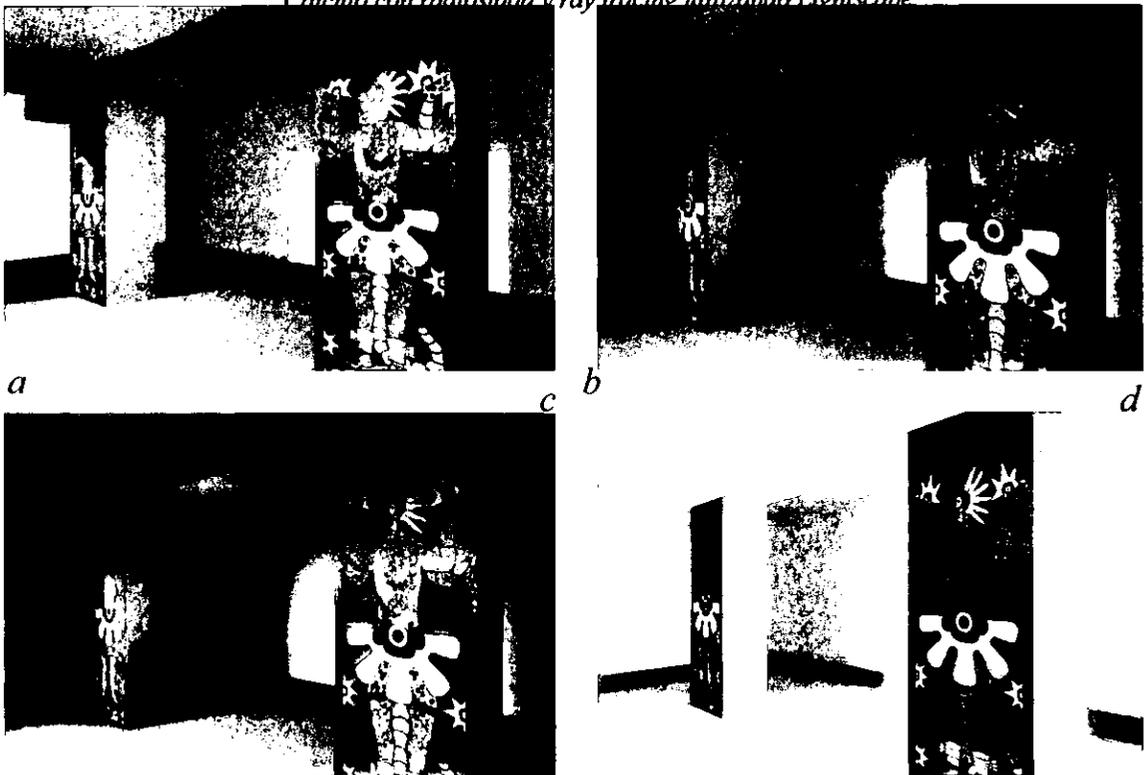


Figura 32. El cuarto de Venus. Reconstrucción digital. Diferencias de resultados en iluminación con a) iluminación local, RenderMan; b) ray tracing, Alias; c) ray tracing y radiosidad, BlueMoon; d) radiosidad para simulación de iluminación real, Lightscape.

Nota: la saturación en amarillo se debe al sistema de impresión.

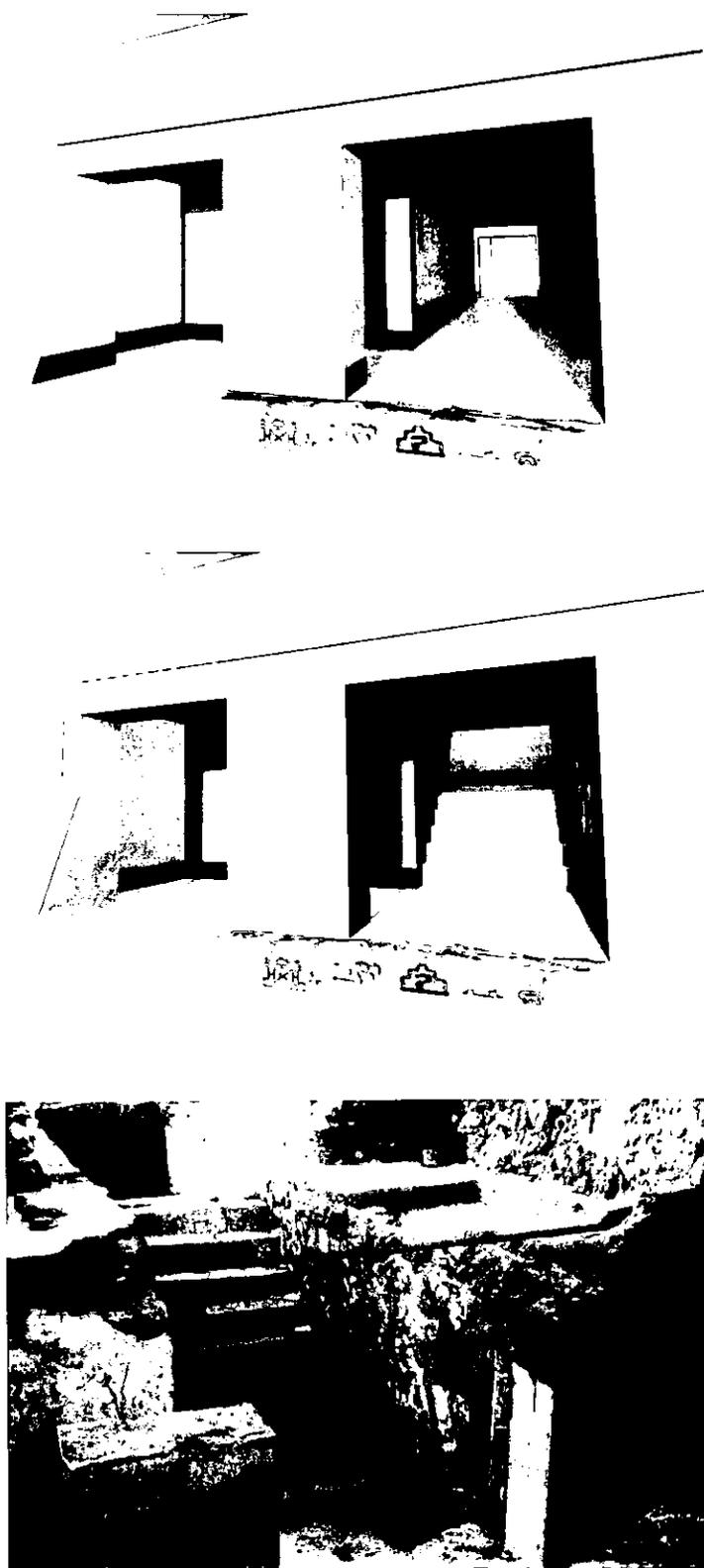


Figura 33. Secuencia de imágenes mostrando la evolución del Templo Rojo. (las imágenes de síntesis no deben ser consideradas como propuestas finales de reconstrucción virtual del sitio: corresponden a estudios preliminares)

La secuencia de imágenes permite relacionar los elementos existentes con las hipótesis de reconstrucción, y establecer un enlace entre los elementos encontrados en el sitio y su interpretación. Además, son una forma didáctica de presentar el resultado del análisis para entender el proceso evolutivo del sitio.

De la misma forma se puede realizar una animación que sea para su salida a película, o para su uso en tiempo real con o sin inmersión del usuario. Una vez definido el modelo, su explotación hacia varias formas de visualización está abierta.

ALCANCES LOGRADOS

Las ventajas de la definición digital

Además de ofrecer una forma de explotación de los resultados mucho más completa que las maquetas y los dibujos, en relación con éstos, el modelo digital de un sitio conlleva una serie de ventajas en la definición de las volumetrías y de exigencias que resultan benéficas.

El modelo tridimensional computarizado favorece una definición espacial más precisa que una maqueta, gracias al uso de coordenadas con decimales que van más allá del milímetro.

Para dibujar una perspectiva, se debe resolver la conformación espacial y la intersección de volúmenes desde un sólo punto de vista mientras que la reconstrucción por computadora obliga a una reconstrucción completa del espacio tridimensional. En un caso, se construye una imagen mientras que en el otro, la imagen es la resultante de un proceso donde el esfuerzo principal fue enfocado a la definición de elementos geométricos que llegan a plasmarse en imágenes. La imagen es solamente una resultante de un cálculo.

El modelo es una herramienta de trabajo fácilmente actualizable en la medida que se mejore el conocimiento sobre la arquitectura del sitio, sea gracias a nuevas excavaciones o como resultado de análisis que aporten nuevas hipótesis sobre el estado original del sitio. Mientras que

la maqueta y sobre todo la perspectiva ofrecen un estado congelado y se requiere volverlas a construir totalmente para integrarles los nuevos descubrimientos o hipótesis.

El modelo tridimensional

Al concluir esta fase del proyecto, se cuenta con los modelos tridimensionales correspondientes al sitio en varias de sus fases constructivas, hasta donde fue factible llevar el proceso de análisis para deducir su estado original. Varios factores hacen que las reconstrucciones, según la fase constructiva, se hayan realizado con variados grados de certidumbre.

Por una parte, en relación con las últimas etapas constructivas, el arado se ha llevado las estructuras más recientes y se desconoce el estado en el cual los arqueólogos de Cacaxtla encontraron el sitio; por ejemplo si tuvieron que quitar algunos elementos indicadores de pisos o arranques de estructuras para tener acceso a las subestructuras. El análisis tuvo que realizarse con base en los elementos actualmente existentes, 20 años después de las primeras intervenciones de los arqueólogos y restauradores. Su trabajo se recupera y se aprovecha el hecho que tuvieron que analizar los elementos encontrados para presentar un espacio limpio donde claramente aparecen las diferentes estructuras. Por ello, en las zonas menos intervenidas como en los taludes del norte y del poniente, resultó mucho más complejo levantar la información y analizarla por lo que se dificultó el trabajo de reconstrucción.

Por otra parte, en relación con etapas anteriores, se observa que muchas estructuras descubiertas, continúan por debajo de los rellenos que soportan las estructuras superiores. Éstos son los casos de los edificios C (6), D (11), E (13), edificio de las columnas (14,16 y 17), Templo Rojo (24), conjunto de Venus (32), la parte norte del edificio F (35), edificio de la celosía (23). Estas evidencias dejan prever que además de la continuidad de estos edificios, otras estructuras completas siguen enterradas bajo el conjunto del Palacio, la pirámide sur y el patio hundido. No existe ninguna información sobre estos elementos y la única forma de llegar a conocerlos sería mediante la realización de excavaciones, tuneles y pozos donde, sin quitar las estructuras

superiores, se tuviera acceso a la información enterrada. Sin embargo, el estado actual del sitio dificulta la realización de estas obras por su estado de debilidad, sus materiales constructivos y su resequeidad general, debida a la falta de infiltración de agua pluvial impedida por la presencia del techo.

Asimismo, varias huellas de estructuras no han podido ser integradas al estudio. Existe una fotografía de un mural que fue descubierto y enterrado de nuevo para evitar su deterioro, e ignoro donde está ubicado. Sobre el talud oriente, más abajo de la columnata ubicada del lado norte del Cuarto de las Pinturas, aflora lo que correspondería al arranque del tablero de un edificio, la cual significa que todo el talud se encuentra abajo y el espacio interior del cuarto en el relleno del talud. Del lado poniente, debajo del montículo ubicado al poniente del edificio E, fue descubierta una estructura con máscaras de Tláloc de piedra al perforar uno de los pozos de la estructura del techo. Esta estructura se encuentra separada de los demás, por rellenos de tierra, y tampoco ha sido factible integrarla al conjunto.

En general, la reconstrucción abarca las estructuras de la plataforma superior y una presentación simplificada de los taludes. Falta limpieza en toda la periferia del basamento para dejar al descubierto su base. El sitio de Cacaxtla abarca un área mucho mayor que la del Gran Basamento. Como se ha mencionado anteriormente, del lado sur se encuentra la Plaza de las Tres Pirámides, del lado oriente dos pirámides y se ha detectado que el piso estucado se extiende en un amplio perímetro (tesis de Andrés Santana, ENAH).

El conjunto del Palacio fue particularmente difícil de analizar. En su configuración actual, presenta una serie de cuartos, pasillos, patios, pórticos que impiden su fragmentación en pequeños elementos aislados que permitirían simplificar el análisis como se hizo con los edificios A (4), B (5), C (6), D (11) y E (3). Además es evidente que este conjunto ha tenido múltiples modificaciones que fueron cambiando drásticamente su configuración y si algunas son claras, desgraciadamente en la parte norponiente, el uso de bloques de tepetate para la consolidación de los muros esconde información importante para entender el proceso de transformación de los espacios. De hecho, la calidad del estuco de Cacaxtla y su plasticidad, no permite observar la

presencia de aperturas tapiadas viendo los paramentos verticales de los muros, y es en la parte superior del muro recortado donde estas transformaciones son muy visibles.

Por estas razones, existen varios grados de certidumbre en la reconstrucción virtual del sitio. Si algunos conjuntos, por el hecho que solamente les falta su techumbre, fueron *reconstruidos con un alto grado de certeza* (edificios A (4), B (5), C (6) y F (35-36)), otros conjuntos pueden ser considerados como representados con *un alto grado de probabilidad*. Éste es el caso del edificio D (11) que, a pesar de la poca información que presenta, muestra un gran parecido con otros conjuntos en mejor estado (edificios A y B) lo cual permitió reconstruirlos retomando la lógica extraída de éstos últimos. En otros casos, como el edificio de la celosía (23), al contar solamente con una extremidad del edificio, ya que lo demás sigue enterrado, se puede considerar una *reconstrucción probable*, sin embargo se ignora cuál pudo haber sido la extensión del edificio. En este caso, la reconstrucción presenta un entendimiento “global” del fenómeno del objeto, sin embargo no puede pretender ser exacta. Donde la información es todavía más escasa o la configuración del edificio no permite aplicarle la configuración de otros (caso del Templo Rojo (24)) se entiende en forma muy parcial el fenómeno arquitectónico *i.e.*, un pasillo más adelante convertido en una escalera para ser más adelante totalmente enterrado por un basamento piramidal (Lucet y Lupone, 1994); sin embargo su integración a un fenómeno de conjunto no deja de ser *muy* hipotética. Finalmente, se han podido observar en varias partes del sitio esquinas de edificios que afloran de la tierra, pero al no poder realizar excavaciones para obtener más información, su *integración al conjunto no ha sido posible*.

Así, el estado actual de las excavaciones realizadas en el sitio ha mostrado ser insuficiente para llevar a cabo reconstrucciones completas con toda certeza y en cada una de éstas existe un componente hipotético.

Aportación al conocimiento sobre el sitio

Si uno de los resultados del proyecto es la obtención de modelos tridimensionales del sitio que muestran distintas fases constructivas y permiten la obtención de imágenes “bonitas”,

más importante para la historia de la arquitectura es el proceso analítico que se efectuó para obtener estos resultados gráficos. Reconstruir el sitio implicó llevar a cabo un estricto análisis para entender las estructuras actuales y deducir algunas de las reglas de su composición arquitectónica, obteniendo así un conocimiento sobre la lógica conceptual del arquitecto mesoamericano.

Fue necesario estudiar las fases constructivas de cada una de las estructuras y las relaciones de convivencias entre éstas. Para tratar de entender la evolución del sitio se buscaron algunas de las reglas que pudieron ser seguidas por sus constructores al momento de tomar decisiones de composición para modificar el sitio y realizar las nuevas construcciones.

La arquitectura de Cacaxtla muestra varias características:

- Un amplio uso de pórticos alrededor de las plazas y en toda la periferia del sitio.
- Un uso racionalizado de los distintos acabados que recubren las estructuras.
- El empleo de ejes de composición y de simetría.
- El sistema de medidas empleado para los pórticos no está relacionado con las épocas constructivas y sigue un padrón estandarizado.
- Las plazas son concebidas como espacios rectangulares, cerrados y limitados en sus cuatro lados.
- Se hace un uso extensivo de los pórticos para delimitar las plazas y el sitio en toda su periferia.

El estudio arquitectónico limitado a un solo sitio no permite aportar un conocimiento sobre su época de ocupación ni tampoco sobre el origen de sus pobladores. Sin embargo, al ser realizados trabajos parecidos para otros sitios mesoamericanos, se abre un amplio panorama de enriquecimiento de los conocimientos sobre las culturas que los crearon gracias al uso de comparaciones, sobre cada uno de los puntos que fueron abordados, medidas, sistemas de composición y definición de los espacios.

Registro y estudio de murales mediante las herramientas de procesamiento digital de imágenes: estudio de caso en los murales de la Biblioteca Central de la UNAM

DESCRIPCIÓN DE LA BIBLIOTECA

Descripción formal

La Ciudad Universitaria fue construida al principio de los años 50 para agrupar las diferentes facultades y escuelas que componían la Universidad, las cuales se encontraban diseminadas en varios edificios de la ciudad. Fue planeada como una obra de prestigio donde se plasmara la importancia dada por el país a la educación y al conocimiento, como forma de mejorar la existencia humana. Cabe señalar que México vive en esta época, un importante movimiento artístico totalmente *sui generis*, marcado por una posición de los artistas frente a los movimientos sociales característicos de la primera mitad del siglo, impregnados por los ideales revolucionarios. Así, este dinamismo enfocado a la construcción de un futuro de calidad, otorga a la educación una importancia particular que se refleja en el apoyo de la nación para la construcción de la nueva Universidad a través de un gran logro arquitectónico. El campus fue proyectado como una ciudad del saber donde las diferentes áreas del conocimiento fueran integradas, un conjunto de armonía que incluyera además, amplios espacios verdes y áreas deportivas. Su diseño y construcción fueron encargados a la Escuela de Arquitectura donde se encontraban los más prestigiados arquitectos de la época. Retomando la corriente arquitectónica

internacional del funcionalismo y los principios de la continuidad espacial, le dieron un matiz local nacionalista que se puede resumir en el uso de materiales naturales propios de la zona del Pedregal (piedra volcánica), integración de las artes plásticas (murales) para la conformación de los espacios y referencias a modelos prehispánicos. La variedad espacial de la Ciudad Universitaria con plazas, patios, pasillos abiertos y cubiertos, además de variedad de áreas con distintos niveles de privacidad, le proporcionaron una particular riqueza.

En este conjunto urbanístico, la Biblioteca Central fue idealizada como el elemento de mayor jerarquía. Se recurrió a elementos de diseño que permitieran cumplir con esta intención inicial, tales como su ubicación espacial en relación con la explanada central, el hecho que sea el remate de varios ejes de composición (algunos visuales otros virtuales), su volumetría y la decoración dada a sus fachadas (Figura 34). Cumpliendo su objetivo, la Biblioteca se volvió el símbolo de la Universidad, de la cultura y de un país que progresa por la importancia que da a estos factores.

El diseño de la biblioteca de la UNAM estuvo a cargo de los arquitectos Gustavo Saavedra, Juan Martínez de Velasco y Juan O'Gorman, quienes la concibieron como dos paralelepípedos superpuestos. El inferior, con una superficie mayor posee un piso de doble altura con mezanine y está dedicado a las funciones administrativas, por lo cual sirve de basamento al paralelepípedo superior donde se encuentra el acervo bibliográfico. Éste, remarcando su papel de resguardo de la riqueza cultural presenta fachadas ciegas, cubiertas por un mural diseñado y realizado por Juan O'Gorman. El inmenso mural de 3712 m² fue dividido en placas de 1x1 m de 5 cm de espesor y fabricado en un taller de la UNAM. En un molde de yeso se colocaba el dibujo y equipos de obreros ponían piedras según los colores marcados. Posteriormente se colaba el cemento y se insertaba una malla metálica de refuerzo (Ana Lilia Torices, 1993a). Finalmente las placas eran instaladas sobre la fachada a una distancia de aproximadamente 10 cm de la estructura.



Figura 34. Fotografía de las fachadas sur y oriente.

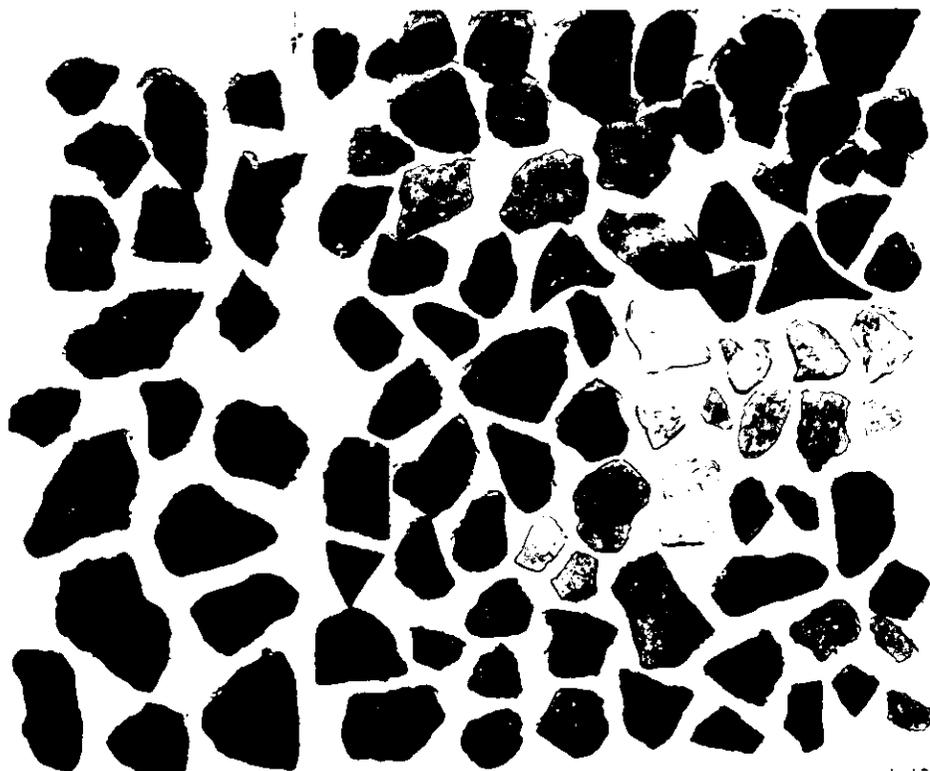


Figura 35. Muestra de las piedras que fueron utilizadas para la realización del mural.

Los diferentes colores se consiguieron mediante el uso de variadas piedras naturales, salvo el azul que fue logrado fabricando piezas de vidrio. Según O'Gorman, empleó 11 tipos de piedras de distintos colores, aunque hasta la fecha solamente 10 hayan sido distinguidas claramente (Torres *et al*, 1993). Él mismo afirma que los colores son:

- Rojo Venecia, amarillo Siena, rosa salmón, rosa violeta, gris violáceo, gris oscuro (piedra del Pedregal), negro (obsidiana), caledonia blanca (no ha sido identificada), mármol blanco, verde oscuro, verde claro y el vidrio azul más según el estudio “algunos fragmentos de tezontle y recinto, de colores rojo y negro” (Torres, 1990) (Figura 35).

O'Gorman compone el mural como si fuera un código, con una lectura de elementos simbólicos donde representa el pasado prehispánico, los grandes descubrimientos de la humanidad y la importancia del conocimiento (Ana Lilia Torices, 1993b).

La fachada norte está dedicada a la representación del pasado prehispánico, con la ciudad lacustre azteca y una fuerte presencia de Quetzalcóatl.

La fachada sur muestra el pasado colonial, con su eje central marcado por el emblema de la familia de los Habsburgo, reyes de España en el siglo XVI, mientras que en la parte inferior se observan construcciones características de la arquitectura occidental. Del lado derecho, el concepto cristiano del bien con el listón franciscano y el sol. En la zona izquierda, lo negativo, lo malo con el mundo de la luna. La época colonial está representada por el plano de la ciudad de México enviado a Carlos V por Cortés, torres militares e iglesias barrocas.

La fachada oeste describe el mundo moderno con un paisaje del valle de la ciudad de México y el escudo de la Universidad. Los estudiantes aparecen en forma alegórica, alimentados por el conocimiento y la fuerza de las artes. El oeste representa el período de la revolución mexicana.

La fachada este contiene una descripción del mundo moderno que incluye la representación del átomo, la historia marcada por la estrella roja, el libro abierto de la cultura y la presencia del nacionalismo dada con la imagen de Cuauhtémoc.

El conjunto tiene una constante presencia del mundo mesoamericano y del español, combinados para conformar la identidad nacional y la imagen de la Universidad.

Descripción de los daños

A 45 años de su construcción, el mural ha sufrido una serie de daños debidos a la contaminación, su exposición a la intemperie y defectos constructivos. Por ello la UNAM, a través de la Dirección General de Patrimonio, y la Fundación Mexicana para los Monumentos del Mundo, decidieron intervenir el mural y restaurarlo. Una Comisión Interdisciplinaria fue creada para estudiar los daños y definir la estrategia de restauración. Ésta fue integrada por personal y expertos del Departamento de Bienes Artísticos y Culturales de la Dirección General de Patrimonio, del Instituto de Geología, del Instituto de Investigaciones Antropológicas, de la Facultad de Arquitectura, de la Escuela Nacional de Artes Plásticas, de la Facultad de Química, del Centro de Ciencias de la Atmósfera, del Instituto de Investigaciones Estéticas y de la Dirección General de Obras, todos de la UNAM; y de la Asociación Mexicana del Cemento y del Concreto, así como de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Guanajuato (Torres et al, 1993). Antes de tomar alguna decisión sobre el método de restauración, se llevaron a cabo múltiples estudios para caracterizar las piedras empleadas por O'Gorman, definir sus propiedades químicas e identificar las diferentes causas del deterioro del mural. (Torres, 1990, 1991, 1992; Torres *et al*, 1993)

De estos estudios, resalta la presencia de los siguientes deterioros:

- **Desprendimiento de piedras.** En el caso de los fragmentos azules de vidrio, la falta de adherencia entre el material liso y el cemento propicia un desprendimiento de la pedacería. Es de notar que existe el mismo problema en mosaicos griegos.²⁵ En otras partes, este desprendimiento se debe al empleo de un cemento demasiado seco que Juan O'Gorman utilizó con el fin de no manchar las piedras, a las infiltraciones de aguas

²⁵ Comunicación personal de la Dra. Anne-Marie Guimier-Sorbets, Universidad de Nanterre, París.

pluviales y a los fenómenos de dilatación-contracción de las estructuras por los cambios de temperatura (Figura 36).



Figura 36. Ejemplo de daños del mural, caída de piedras.

- **“Enfermedad” de piedras.** La misma naturaleza química de las piedras verde oscuro y verde claro que presentan un alto grado de porosidad provoca que su exposición a la intemperie cause su desintegración. La piedra verde oscuro se pulveriza y ha perdido su consistencia, por su parte, la piedra clara se desprende por grandes capas y deja una capa adherida al cemento (Figura 37).
- **Cambios de color.** De igual forma, las piedras verdes desarrollan un cambio de color durante el proceso de deterioro. En general, el cambio de color de la fachada se debe más al depósito de partículas del medio ambiente que a la transformación del material y estas piedras son las únicas en presentar este fenómeno.



Figura 37. Ejemplo de daños del mural, enfermedad de piedras.

- **Estallamiento de placas.** Las infiltraciones de agua han corroído las varillas metálicas de las placas y de sus amarres. En algunos casos esto ha causado el estallamiento del concreto, la caída de zonas completas de piedras y la exposición de las varillas. (Figura 38)
- **Abombamiento de algunas placas.** El mismo sistema de colocación de las piedras hizo que algunas fueron puestas a presión o quedaron apretadas entre otras, con lo que se genera un abombamiento y descuadramiento de los paneles.
- **Ensuciamiento.** La exposición exterior combinada con la contaminación ambiental tienen el inevitable resultado de ensuciar las piedras con una capa gris. En otras partes, los escurrimientos de aguas sobre la fachada han dejado marcas negras y manchas.
- Estos estudios permitieron la realización de los trabajos de restauración que empezaron a finales de 1995 y terminaron a la mitad de 1996.



Figura 38. Ejemplo de daños del mural, estallamiento de placas.

PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

Para llevar a cabo el estudio de las obras del patrimonio histórico, artístico y de su restauración, se reconoce la necesidad de integrar varios campos del conocimiento. Por ello, en los trabajos de restauración, frecuentemente se encuentran incorporados especialistas de distintas disciplinas como restauradores, arquitectos, químicos, ingenieros o físicos. El uso de las herramientas de cómputo para este propósito ha ido evolucionando a la par con el desarrollo de la computación. Es cada vez más común encontrar sistemas de información computarizados para la recopilación y clasificación del patrimonio o para obtener un inventario que, desde hace unos años, tienen la capacidad de incluir gráficas. Sin embargo, el manejo computacional de imágenes se limita en muchos casos a ser una forma diferente (y con ventajas que más adelante se analizarán) de almacenar fotografías; por ello, es escaso su empleo para la búsqueda de

información nueva aprovechando las capacidades de análisis que ofrece el tratamiento digital. Asimismo, se olvida con frecuencia que el cómputo puede ser también una herramienta “inteligente” para procesar imágenes, pues extiende las capacidades del ojo humano y permite distinguir con mayor facilidad la información buscada para procesar muchas imágenes en un tiempo más corto. Favorece también cuantificar la información en forma selectiva.

Este proyecto desarrolla el empleo de las técnicas de manejo de imágenes por computadora para su uso en restauración de bienes muebles, aplicándolo al mural O’Gorman de la Biblioteca Central de la UNAM. El primer objetivo consiste en definir una metodología para la obtención de la representación digital del mural, tomando como ejemplos sus partes más accesibles. Se analiza la finalidad de esta digitalización, y se sopesan los diferentes factores que se deben tomar en cuenta para la obtención de una solución. El segundo objetivo se refiere al desarrollo de una serie de técnicas computacionales para corregir esta imagen, al eliminar las imperfecciones debidas a la toma. Finalmente, se muestra un ejemplo de posibilidad de uso de las imágenes, relacionado con el cálculo de la superficie cubierta por cada tipo de piedras.

Importancia del registro en restauración

En la actualidad la historia ya no es entendida como la sucesión de acontecimientos independientes, sino como la reubicación de cada uno de los hechos en una secuencia concatenada que permite extraer un conocimiento adicional sobre la evolución de la humanidad; de la misma forma el objeto de estudio no puede ser visto como un elemento aislado sino que se debe relacionar con múltiples factores que conforman el marco general donde se inscribe. La historia es el estudio y análisis de la memoria y corresponde a la necesidad de conocer el tiempo, ligando el pasado con el presente y el futuro, y generando conocimientos acumulativos para entender los cambios. Es a partir del siglo XIX cuando el monumento y las obras del hombre se vuelven documentos fundamentales para el estudio de la historia. Son parte del material que permite obtener información concreta para estudiar el pasado de la misma forma que lo son los escritos.

La búsqueda de racionalidad, de inteligibilidad, de precisión y de objetividad real y tangible, es el saldo positivo de las discusiones decimonónicas sobre la historia. Las cualidades enumeradas, carecerían de sentido si no se fundamentaran en un manejo especialmente cuidadoso de la autenticidad de las fuentes, representadas por las huellas del pasado.

Así pues, las corrientes nacidas del movimiento ilustrado, plantearon exigencias nuevas, que requirieron de un instrumento adecuado, para proteger la autenticidad de sus fuentes de conocimiento. El instrumento adecuado, tercer satisfactor en el proceso de la historia de la historia, es la restauración. (Chanfón, 1985)

Esta evolución del papel del monumento, con el desarrollo mismo de la arqueología, va acompañado de la evolución de la restauración con fines de proteger el documento histórico. Sin embargo, una restauración deja huellas. Generalmente se juzga su necesidad (o emergencia) cuando el objeto empieza a mostrar una serie de daños, es decir que ha perdido parte de lo que lo inicialmente era, y la intervención implica en muchos casos el uso de materiales distintos a los iniciales cuando éstos mostraron su debilidad y cuando se conocen nuevas técnicas que no tienen estas desventajas. Al no registrar una obra antes y después de una intervención, se puede caer en el peligro de no precisar datos que pueden confundir el estudio de la historia de una obra. Por ejemplo, en el caso del mural O'Gorman se menciona que por la falta de adherencia entre el vidrio azul y el cemento, el vidrio liso fue reemplazado por un vidrio cuadrículado en su cara posterior (Torres, 1991). De no quedar documentado este hecho, se podría pensar que tal vidrio cuadrículado es original.

En ese sentido, el registro de las obras y actividades de restauración son actividades inseparables de la intervención misma, donde no solamente se deben conservar los documentos que conforman la memoria humana, es decir los monumentos, sino que también se requiere "documentar el documento" con la finalidad de que su testimonio sea lo más confiable y objetivo posible.

Es porque el monumento es parte de la memoria del hombre, que su documentación y el registro de los trabajos de restauración a los cuales está sometido, son de importancia fundamental.

El proceso de deterioro de una obra es inherente al fenómeno del paso del tiempo y en muchos casos, inevitable. En el caso del mural O'Gorman, expuesto a la intemperie y a la contaminación no se puede impedir que se ensucie y que el material expuesto se vaya degradando. Además, las propias técnicas de consolidación y restauración que en algún momento fueron adecuadas, sufren de "envejecimiento". La restauración requiere de una evaluación permanente de sus herramientas y procesos para progresar. Es analizando el comportamiento de las soluciones empleadas como se pueden mejorar los materiales. Por ejemplo, el primal que es ampliamente utilizado para proteger la pintura mural, presenta un fenómeno de amarillamiento con el tiempo. Sin un registro adecuado del color antes de la aplicación, no hay forma objetiva de mostrar este cambio en los colores y empujar a la búsqueda de materiales idóneos.

Un registro cuidadoso de una obra debe incluir su estado antes de la intervención y después de ésta. Quedan así documentados por una parte, las debilidades de la obra inicial, las fallas constructivas que pudo tener, y por la otra, las decisiones tomadas por los restauradores. Años después, se evalúan de nuevo los deterioros al poseer la información necesaria para el análisis. Se puede así conocer por ejemplo, si los materiales empleados fueron adecuados, si los materiales iniciales desarrollan un proceso de deterioro, si existen cambios de color, si aparecieron nuevas fuentes de deterioro o si las primeras persisten.

Técnicas de documentación de restauración

En forma tradicional, la documentación en torno a la restauración recurre a múltiples medios, *i.e.*, se toman fotografías del objeto de estudio, donde se abarcan tanto el espectro visible como el invisible, y se realizan calcas cuando la intervención es sobre una superficie plana; también se realizan levantamientos de conjuntos y de detalles de las estructuras arquitectónicas. Esta información gráfica está ligada a informes donde se transcribe toda la información complementaria. El uso del cómputo permite la integración ésta en bases de datos (Lupone, en proceso), y extiende su potencial de cruce de información para relacionar eventos.

Para la restauración de la Capilla Sixtina del Vaticano, fue realizado un cuidadoso trabajo de documentación de la intervención recurriendo a sistemas de cómputo. Financiado por la televisión japonesa, éste consistió en el desarrollo de un programa especial para el registro de la información del mural y de los procesos de restauración empleados (Jeffery, 1989). Las líneas verdes muestran faltantes de yeso; otras líneas verdes gruesas, las jornadas de trabajo de Michelangelo; las líneas rojas, craqueluras; las cruces amarillas, tornillos metálicos, y los círculos azules, áreas delicadas de restauraciones pasadas. El levantamiento inicial fue realizado mediante técnicas de fotogrametría.

La Biblioteca Central de la UNAM representa un fuerte problema para el registro de su información, por el tamaño de la obra (3712 metros²), su ubicación (11 pisos para el paralelepípedo superior), y la necesidad de obtener una información que llegue al nivel de detalle de una piedra y de su junta.

Para reportar este nivel de detalles, en caso de tomar una fotografía por metro cuadrado, el restaurador estaría manipulando 3712 imágenes lo que representa un serio problema de manejo y clasificación de documentos. Además, esta cantidad se duplicaría al tener la documentación anterior y posterior a la restauración. El nivel de precisión obtenido en las imágenes dependería del tamaño de la impresión. Si la toma fotográfica fuera realizada desde el piso, existirían fuertes problemas de perspectiva que impedirían tener una buena visión de la placa del mural; en ciertos casos (fachada oeste), la presencia de árboles dificultaría esta toma. La fotografía quedaría como una representación aproximada de las piedras, sin escala y con distorsión.

Adicionalmente, al manipular las fotografías, éstas se van degradando y con el paso del tiempo sería necesario volver a imprimirlas.

Propuesta: información digital

Por las razones enunciadas, se plantea que una forma adecuada para manejar la documentación del mural de la Biblioteca Central de la UNAM sea mediante el uso de imágenes digitales. Almacenadas en discos ópticos o en un disco duro pueden ser manejadas desde un

sistema de base de datos que facilite su acceso y donde pueda ser manipuladas de distintas maneras.

Se pueden reproducir en forma inmediata mediante copias digitales o imprimiéndolas. Es posible proporcionarlas a cualquier persona interesada en utilizarlas para investigación o la publicación de un trabajo. Su transferencia mediante los sistemas de red es rápida y pueden ser enviadas tanto en la localidad como a escala internacional sin mayor pérdida de tiempo. Además, una imagen digital no sufre daños al no requerir de una manipulación física.

El principal problema de las imágenes digitales es el volumen de almacenamiento que demandan. Si una página de texto, es de unos cuantos Kbytes, la misma superficie digitalizada en blanco y negro a 300 pixeles por pulgada es de aproximadamente 1Mbyte (1024 Kbytes) y en color, de 24 Mbytes. Este problema se resuelve en forma cada vez más económica con la baja del costo de los medios de almacenamiento.

Otro problema se presenta cuando se desea conformar bancos de imágenes para un acceso amplio, pues consiste en definir los formatos estándares de archivos y de sistemas de compresión para que puedan ser leídos desde plataformas múltiples, con objeto de evitar los problemas de obsolescencia tan frecuentes en cómputo.

Si la propuesta de un registro digital se justifica por simplificar el manejo de imágenes, existe también una amplia gama de posibilidades adicionales del sistema, basadas en el uso de técnicas de procesamiento de imágenes. El procesamiento de imágenes es un área del cómputo gráfico ya bien asentada, no está sujeta a grandes avances en sus fundamentos pero sí en la extensión de sus campos de aplicación. Inicialmente empleadas para el estudio de fotografías obtenidas por satélite -con fines militares, de información geográfica o económica- en los últimos años, han tenido un desarrollo fundamental en medicina para el análisis de las imágenes médicas obtenidas por ultrasonido, rayos X o resonancia magnética nuclear, y las investigaciones en este campo se han multiplicado ya que permiten una mejor detección de los problemas de los pacientes y planeación de las intervenciones quirúrgicas.

En todos estos casos, el procesamiento de imágenes es aplicado con el propósito de mejorar la información al realzar y hacer más evidentes al ojo humano las diferencias morfológicas, de colores o en general, aquellos rasgos que permiten distinguir los elementos constitutivos de un conjunto gráfico.

En el caso de las fotografías del mural de la Biblioteca, pueden servir al propósito de corregir los defectos de la toma inicial, como distorsión, diferencias de iluminación y falta de escala de la fotografía; también para fines de publicación, se podría mejorar su apariencia modulando los colores. Finalmente, se abre toda una gama de procesamientos posteriores para obtener el dibujo de los contornos y realizar análisis para detectar daños y cuantificarlos.

El procesamiento digital de imágenes aplicado a la restauración abre nuevas posibilidades para que la información del objeto de estudio sea más objetiva y extienda las posibilidades humanas en cuanto a extracción de información. Datos que a primera vista no son muy aparentes pueden ser detectados y la velocidad de proceso permite, una vez definida la forma de detección de información, procesar en forma automática miles de imágenes, lo cual sería muy costoso en tiempo para el hombre. Los procesos avanzados de procesamiento están ligados a algoritmos inteligentes que posibilitan el reconocimiento de formas y patrones incluidos en la visión por computadora.

ANTECEDENTES

La primera fotografía realizada con una cámara, hecha por Joseph-Nicéphore Niépce en 1826, era de poca calidad y requería de ocho horas de exposición. Así que generalmente se reconoce que fue inventada en 1839 por Louis-Jacques-Mandé Daguerre. Aun cuando el "daguerrotipo" consistía en una sola impresión en positivo con placas de 6.5 x 8.5 pulgadas y tenía un efecto de inversión especular, fue el primer sistema fotográfico empleado

comercialmente. Los primeros daguerrotipos requerían de un tiempo de exposición de 20 a 30 minutos. Fue William Henry Fox Talbot el que desarrolló el sistema del negativo.²⁶

Rápidamente se generó el interés del registro fotográfico en arqueología. En 1839, Jean François Dominique Araga, defiende frente a la Academia de Ciencias en París, las ventajas del sistema para el registro de la información dando como ejemplo los jeroglíficos de Tebas, Mephis y Karnak que en forma manual, hubieran requerido de un ejército de dibujantes. Richard Lepsius es el primer arqueólogo que lleva consigo todo el equipo en su misión de 1842-45 en Egipto. (Necci, 1992). En restauración, Viollet-le-Duc, utiliza el daguerrotipo para documentar sus intervenciones (Lucet, 1995).

El término fotografía generalmente entendido como la formación de una imagen óptica sobre una película sensible a la luz por medio de una cámara con lente, se extiende a otros sistemas que no incluyen siempre procesos químicos; así se pueden considerar como fotografías las placas de rayos X y las radiografías, así como el uso de señales electromagnéticas para el registro y la transmisión de las imágenes *i.e.*, televisión, cintas de video e imágenes digitales.

En los últimos años, la digitalización de información gráfica como extensión de la fotografía, se ha extendido debido a las múltiples ventajas que ofrece. De la misma manera, el procesamiento digital de las imágenes, anteriormente usado en áreas que tradicionalmente emplean y desarrollan tecnologías se empieza a difundir en el estudio del patrimonio histórico y cultural.

Previamente a su uso en restauración, es en arqueología donde el tratamiento de las imágenes ha sido utilizado con mayor frecuencia. Procesando las tomas fotográficas aéreas, se ha facilitado la ubicación de sitios arqueológicos. Elementos tales como la presencia de materiales en el suelo como cerámica, subestructuras de piedra, pisos, restos humanos o animales, elementos de madera, etcétera perturban el suelo superior y son visibles desde el espacio (Forte, 1995). Aun cuando estas imágenes tienen una larga tradición de uso en esta disciplina desde épocas anteriores

²⁶ Enciclopedia Británica. vol. 14, p. 328.

a las computadoras, el procesamiento de las imágenes permite al arqueólogo percibir con mayor claridad, la información de las huellas de conjuntos construidos en el pasado y recubiertos por vegetación.

Para el registro de información en sitios arqueológicos, el tratamiento de imágenes puede ser utilizado para apoyar las actividades de documentación. En el informe de 1994 de un proyecto de investigación desarrollado en Pompeya, Jones (1995) explica la imposibilidad de llevar a cabo un registro de los muros mediante las técnicas tradicionales de dibujo por la cantidad de muros, lo lento de la metodología y por el hecho de que la complejidad de la mampostería no justificaba tanta atención. Sin embargo el registro de los muros es parte de la labor de información arqueológica. Así, encontró una solución satisfactoria al tomar fotografías que eran digitalizadas, aunque admite que el siguiente paso podría consistir en una toma digital directamente desde la cámara. Posteriormente, estas imágenes son procesadas de tal forma que se obtiene el equivalente de un dibujo que sirve de base para registros de información adicional como por ejemplo: actividades de restauración.

El procesamiento de las imágenes puede ser también empleado en forma predictiva para visualizar la composición de colores de una pintura al aplicar procesos de limpieza. La Universidad de California en San Diego desarrolló durante 10 años un estudio de la Gioconda cuyo objetivo consistía en quitar los efectos de amarillamiento del barniz y las craqueladuras para obtener una imagen con alta resolución de la pintura original. Para corregir el efecto del amarillamiento, se efectuó un estudio del comportamiento del barniz y de sus propiedades de transmisión espectral, para modelarlo y poder revertir su efecto en la pintura. Las craqueladuras fueron eliminadas aplicando filtros. El resultado fue según Awcock y Thomas (1996) espectacular. “El resultado fue un cielo azul donde antes había solamente cafés, una piel con tonos de alabastro, en vez de un amarillo poco saludable, y una vestimenta que reveló tonos verdosos en vez de un negro uniforme.” El proceso permitió también la identificación de elementos no visibles como la presencia “de un posible adorno en el cuello de la Gioconda,

modificaciones a la escena detrás de su cabeza y la evidencia de un trabajo de restauración anterior.” La aportación al estudio del arte fue evidente.

El proyecto Vasari (*Visual Art System for Archiving and Retrieval of Images*) es la muestra de un trabajo donde el objetivo se concretiza en el registro de pinturas, buscando una captura precisa y fiel de éstas. Los fotógrafos conocen lo difícil de la fotografía de pinturas pues se debe tener un cuidado extremo en la reproducción de los colores y por lo tanto, en la iluminación de la obra al momento de la toma. Este proyecto fue financiado entre 1989 y 1992 por el *European Community Esprit II*. Consistía en la captura de imágenes digitales de pinturas con un alto grado de detalle para permitir la investigación, conservación, enseñanza e impresión (Robinson, 1993). Las condiciones de la captura especificaban como requerimiento fundamental registrar las craqueladuras y las pinceladas, así como obtener una alta fidelidad del color. Considerando que las craqueladuras variaban entre 0.1 mm de ancho y 0.01 mm, se optó por una definición de 20 pixeles por milímetro lo que para una pintura de 1 metro cuadrado implica una imagen de 20 mil por 20 mil pixeles o sea 400 mil pixeles en cada una de las bandas espectrales. Dado que ningún sistema de digitalización ofrece esta resolución, las pinturas son fotografiadas en una serie de subzonas superpuestas según un sistema reticular regular. Las imágenes tienen una franja común de 100 pixeles con sus vecinas, lo cual permite su superposición para reconstruir la imagen de la pintura en su totalidad. Esta técnica es conocida como *Mosaicing*. La cámara queda fija sobre una estructura metálica que se mueve en sentido horizontal y vertical o adelante-atrás. A pesar de utilizar una cámara fabricada con un sistema sofisticado para el control del color, su evaluación permitió concluir que no cumplía con el nivel de exigencia respecto a la reproducción del color inicial y se decidió trabajar en forma monocromática y aplicar siete filtros, tomando así siete fotografías de cada porción de la pintura correspondientes a longitudes de ondas distintas. Estas imágenes son combinadas con fórmulas matemáticas complejas, tomando en cuenta el filtro de cada una, las características de la iluminación, la lente y la fotocelda. El resultado es una imagen de 24 bits. Se escogió una iluminación proveniente de una sola fuente y distribuida en varios puntos frente a la pintura, mediante una fibra óptica. Los filtros fueron

colocados entre la luz y el objeto (generalmente se ubican entre la cámara y el objeto). Tanto el sistema de luz como el filtro quedan ligados al sistema móvil de la cámara, para asegurar la uniformidad de la iluminación entre las diferentes fotografías. Tal metodología posee un alto grado de sofisticación y cada uno de los componentes está estrictamente controlado, los diferentes movimientos de cámara y filtros son computarizados, por consiguiente, la luz no tiene cambios ni siquiera en su alimentación.

La adquisición de imágenes puede ser también realizada con técnicas totalmente distintas, como son la resonancia magnética (Hughes, 1994) o por tomografía computarizada de rayos X (Applbaum *et al*, 1984). Se obtienen así imágenes internas de objetos tridimensionales sin dañarlos. Estas imágenes son generalmente de 512 x 512 píxeles. Los trabajos sobre la reconstrucción tridimensional de momias o de apertura virtual de los rollos del Mar Muerto, a partir de la adquisición de imágenes por tomografía y su procesamiento, fueron presentados en el evento *Imaging the past*, organizado por el British Museum en 1994.

Eric Lange de la Getty Conservation Institute desarrolló en 1993-1994 un proyecto sobre la factibilidad del registro digital *in situ* para la documentación de obras y el análisis de su estado. Este proyecto cumple tres objetivos “la búsqueda de la tecnología adecuada, desarrollar configuraciones de equipo específicos y una metodología para la captura de las imágenes y finalmente aplicarlo a un mural de Siqueiros en Los Angeles”. (Lange, 1994)

OBJETIVOS, DEFINICIÓN DE CRITERIOS Y DE LA METODOLOGÍA

En la búsqueda de un sistema adecuado para el registro digital del mural de la Biblioteca Central de la UNAM, es importante definir primero el objetivo del trabajo. Como se ha visto anteriormente, la solución idónea depende del fin del trabajo. Si se considerara una digitalización para hacer un estudio estético del mural, la información necesaria sería distinta a la que requiere un restaurador. En este caso se está buscando un registro preciso del mural, pero qué quiere decir la palabra “preciso” en este contexto.

- Para poder percibirse de los cambios colorimétricos del mural, el restaurador debe poder controlar los parámetros que definen los colores de las imágenes, *i.e.*, la luz al momento de la toma, el revelado y la digitalización. El nivel de exigencia puede ser menor que en caso del proyecto Vasari (ver sección anterior) ya que lo importante no es tanto la fidelidad del color sino la posibilidad de comparar tomas realizadas en distintas épocas.
- El restaurador requiere también estudiar el fenómeno del desprendimiento de piedras, y la aparición de fisuras en el mural. Es por ello que las imágenes deben presentar un nivel de precisión donde se distingan claramente piedras e intersticios.
- Otro de los daños reportados ha sido un fenómeno de abombamiento en las placas sometidas a presión por sus vecinas. Para su detección es necesario tener una representación con una escala precisa del mural. Así, se hace factible comparar las dos imágenes de una placa en épocas diferentes para conocer si existe variación en su tamaño o en su deformación. Además, el regreso de la imagen a una escala predeterminada es indispensable para poder comparar éstas en forma automatizada. Contrariamente a la percepción humana que extrae una observación general de la información relacionando muchos datos y tiene la capacidad de superar problemas de escala entre dos imágenes al momento de compararla; en cómputo para poder comparar dos imágenes, la forma más sencilla, consiste en un cálculo realizado en forma sistemática al nivel de los puntos que componen la imagen.

Sobre esta base, se realizaron varias pruebas a partir de distintas técnicas que permitieran tener el registro del mural en forma digital y teniendo en consideración estos requerimientos, se buscó la optimización de los recursos físicos y humanos.

Para definir el medio de la toma inicial, se tomaron y digitalizaron imágenes utilizando cámara de video; cámara fotográfica con película de 35 mm. para diapositivas y fotografías en papel, y una cámara con negativo de media cuartilla (4 x 5 pulgadas). Sin poder realizar pruebas, se estudiaron las características de los sistemas digitales de toma de imágenes.

torre. No era factible construir la estructura propuesta para solamente un experimento puntual, por ello, las tomas se realizaron en forma “artesanal” sin llegar al rigor propuesto en la metodología. Por otra parte, este registro fotográfico en condiciones parecidas a la ideal se pudo realizar solamente después de la intervención de restauración. Las imágenes tomadas antes de la restauración fueron tomadas con luz del día y sin controles.

SOLUCIÓN: ESTRATEGIA PROPUESTA PARA LA ADQUISICIÓN DE LAS IMÁGENES

La fase de adquisición de las imágenes es un paso fundamental, constituye la base misma del registro y de la obtención de la información que conforman la memoria de la obra. En muchas ocasiones es un paso que se toma con cierta ligereza, aunque de hecho, digitalizar una imagen no significa un logro mayor mientras se cuente con los equipos necesarios. Sin embargo como se ha mostrado en los antecedentes, la definición de los criterios de captura depende del objeto de estudio, de la información requerida y del objetivo de la digitalización. Los procesos computarizados posteriores pueden ser ampliados con el tiempo, en la medida que aparezcan nuevas necesidades de información y se desarrollen otros algoritmos o más eficientes cálculos. Sin embargo la imagen inicial es crítica, dado que constituye la representación del objeto de estudio en un momento específico y esta información puede diferir años después y no poder ser tomada nuevamente.

La captura de imágenes

En la toma de decisiones sobre la forma de digitalizar el mural de la Biblioteca Central deben ser tomados en cuenta toda una serie de factores. Como se ha mencionado anteriormente, dada la magnitud del mural, una de las condiciones fundamentales para la toma de las imágenes, consiste en obtenerlas en condiciones constantes, para generalizar los cálculos, definiéndolos primero sobre una muestra.

Se hicieron ensayos con el uso de filtros de luz interpuestos entre la cámara y el objeto para definir si era más conveniente la toma de varias imágenes con varios filtros o una sola toma en color; y también pruebas con película infrarroja para ver si era posible obtener más información que con el espectro visible.

Adicionalmente, se realizaron tomas ubicando la cámara desde diferentes distancias para optimizar su posición respecto a la superficie.

En relación con esta información, se definieron:

- Las condiciones de la toma de imágenes en las que se obtiene la información deseada con el grado de precisión requerido.
- El medio de captura de imágenes (fotografías, diapositivas, video, digital).
- La forma de digitalización.
- El medio de almacenamiento de la información y la organización de las imágenes.

La solución al problema implicó resolver en su conjunto cada uno de los elementos de la relación “toma fotográfica-sistema de digitalización-requerimientos”. No tenía sentido escoger una solución fotográfica que no fuera acompañada de una solución de digitalización viable. Menos aún tendría sentido incorporar una solución “cómoda” de fotografía-digitalización que no cumpliera con los requisitos del registro de la obra. Por otra parte, dada la magnitud del mural que se digitaliza con el fin también de realizar análisis computarizados, la sistematización de los métodos es muy importante. No es viable que cada imagen requiera de un proceso particular. Se debe buscar la definición de modelos de comportamiento general para poder aplicarlos en forma automática al conjunto de las imágenes.

Aun cuando la solución final de una toma de fotografías en forma cercana al mural apareció atractiva desde el principio, se insistió en buscar una metodología más rápida mediante tomas lejanas, lo cual habría permitido no colgar una estructura a la fachada con los riesgos que eso conlleva, tanto para el mural como para las personas que toman las fotografías.

Finalmente, se aplicó la metodología definida a las partes más accesibles del mural, es decir a placas con la altura humana del cubo de los elevadores, ubicado en la azotea superior de la

También se debe contar con los parámetros necesarios para conocer y controlar el grado de precisión de la imagen, y atenuar los defectos debidos al conjunto toma fotográfica-digitalización.

Selección del grado de precisión

Las imágenes computarizadas están compuestas de una serie de puntos (píxeles) organizados en forma reticular para representar una imagen. La selección del grado de precisión consiste en definir la superficie plasmada en un píxel. Es una decisión importante ya que si un píxel corresponde a una superficie muy grande, ello implica que no se contará con una información suficientemente detallada; si por ejemplo, un píxel corresponde a 1 cm^2 , no podemos esperar observar fisuras de 1 mm de ancho. Por otra parte, si el píxel corresponde a una superficie muy chica, los archivos crecerán en forma proporcional y rápidamente pueden llegar a ser demasiado grandes para una manipulación cómoda por las computadoras. En ese sentido, el tamaño del archivo de una imagen digital es directamente proporcional a la cantidad de píxeles que la definen, así como al número de bits asignados para cada uno de los píxeles.

Tabla 1. Tamaño de un archivo en relación con el rango cromático de la imagen.

Tamaño de la imagen	Tamaño del archivo		
	Blanco y negro (1 bit)	Grises (8 bits)	Color 24 bits
1000 x 1000 píxeles	250 KB	1 MB	3 MB

Si una imagen va a ser utilizada solamente para ser observada en un monitor que posee la característica de presentar 640×480 píxeles con ocho bits cada uno, la digitalización óptima retomará estas características para las imágenes; el archivo resultante será de 640×480 píxeles o sea de 307,200 píxeles y tendrá un tamaño de 308 Kbytes.

Cuando se digitaliza una imagen para incluirla en una publicación, se toman en cuenta las características del sistema de reproducción y las dimensiones que tendrá la imagen; con estos

datos se calcula la resolución ideal de la digitalización. Si se escogiera una resolución menor, habría pérdida en la calidad mientras que al seleccionar una resolución mayor no se llegaría a una mejoría y se obtendrían archivos más grandes. Un archivo empleado en una publicación para generar una imagen de 2 x 3 pulgadas, con una resolución de 300 dpi²⁷, y la máxima calidad de colores (*i.e.*, 24 bits), requiere 600 x 900 píxeles equivalentes a 1.620 Mbytes.

Es posible reducir el tamaño de un archivo cuando queda almacenado, cuando se recurre a sistemas de compresión. Éstos son más o menos eficientes según las características particulares del archivo. Podríamos suponer que en el caso de una imagen en blanco y negro, en vez de que quede especificado el valor de cada píxel, se registren solamente los píxeles blancos o los negros; y que además se registraran solamente las extremidades de las cadenas de píxeles; el resultado sería un archivo de menor tamaño. Sin embargo, la máxima compresión se hará inevitablemente en detrimento en la calidad de la imagen; por ello muchas veces el compresor pregunta si se desea una compresión que no genera una pérdida de la calidad o una compresión óptima. JPEG es uno de los formatos de compresión más empleados en la actualidad.

Por los problemas que generan los archivos de gran tamaño, es importante reconocer si el nivel de detalle definido es indispensable para cumplir con el objetivo del trabajo. Se ha visto anteriormente que en el proyecto Vasari de digitalización de pintura de caballete, se optó por una precisión de 20 píxeles por mm para llegar a capturar las pequeñas grietas de la capa pictórica. El archivo resultante para un metro cuadrado con colores definidos por 24 bits es de 1,200,000,000 bytes o sea 1.2 Gbytes. Aún para una supercomputadora, esto significa un archivo muy voluminoso para procesos ulteriores.

Una tendencia común, consiste en digitalizar con la máxima resolución proporcionada por el sistema de digitalización. Además de hacer el resultado dependiente de la capacidad tecnológica, esta posición no tiene sentido en la medida que igualmente se obtendría un nivel de

²⁷ *dots per inch*. Se acostumbra conservar la abreviatura de la notación en inglés.

detalle muy grande si la fotografía inicial se relaciona con un acercamiento, o muy deficiente en caso de corresponder a una superficie grande.

Considerando que las piedras del mural tienen una superficie de 2 a 4 cm, y que sus intersticios son de aproximadamente 2 mm, el límite inferior de 1 pixel por mm fue seleccionado, sabiendo que podría ser modificado si mostrara ser insuficiente al momento de aplicar los algoritmos de procesamiento de imágenes para buscar información. Esta resolución tiene además la ventaja de facilitar las mediciones. Al medir 3 pixeles, sabemos que son 3 mm. Si una piedra posee una superficie de 342 pixeles, éstos corresponden a 342 mm².

Adquisición analógica de imágenes vs. adquisición digital

Existen varias alternativas para obtener en forma digital una imagen. Es posible digitalizar imágenes obtenidas de video, fotografías o diapositivas es decir a partir de imágenes analógicas, u obtener imágenes en forma directamente digital al usar cámaras independientes o controladas por computadora.

Al emplear la secuencia fotografía análoga-digitalización intervienen varios factores que condicionan el resultado final, a saber: las características de la cámara, de la película, las condiciones del revelado y finalmente de la digitalización. La toma digital tiene la ventaja de ser condicionada solamente por las características de la cámara. Por consecuencia, si se desea controlar todos los parámetros que influyen en el resultado, esta segunda opción asegura mayor estabilidad en el proceso al intervenir menos variables.

Adquisición digital. Se puede realizar de dos formas; a través de una cámara digital que, en lugar de imprimir la luz que recibe en una película fotosensible, la transforma en información digital y la registra en un sistema de almacenamiento interno, o mediante un captor de tipo CCD conectado y controlado por una computadora donde queda almacenada dicha información.

El proyecto Vasary utiliza este último sistema. Desde la computadora, se controla la ubicación de la cámara, los parámetros de la toma y de los colores y se origina la orden de

capturar la imagen²⁸. Se trabaja con una matriz de CCD, sensores que registran directamente el valor del pixel, cubriendo la imagen por zonas de 512 por 290 pixeles, y realiza translaciones horizontales y verticales para abarcar toda la superficie. Éste es en la actualidad el equipo más sofisticado para realizar tal tipo de trabajo. Por ejemplo, en vez de trabajar con las tres componente RGB como la mayoría de las cámaras, utiliza dos componentes para el color verde, tomando en cuenta que éste tiene mayor importancia en la percepción humana del color. Después se promedian los dos valores de verde para conservar solamente uno, pero su medición es más exacta. Además, cada color está manejado con 12 bits, ampliando para cada uno su rango de valores posibles de 256 a 4096. La resolución máxima obtenida por esta cámara es de 3096 x 2320 pixeles. Según la distancia de la cámara al objeto se podrá hablar de pixeles por pulgadas.

La cámara digital retoma las características de la cámara tradicional, pero en vez de registrar la imagen en una película, la almacena en forma digital. Varias empresas han desarrollado en los últimos años dichas cámaras y probablemente, a futuro, lleguen a reemplazar a la cámara tradicional. El espacio de almacenamiento incluido en la cámara varía según el modelo, en tanto, la cantidad de fotografías que la memoria puede conservar depende de su resolución. Después de llenar este espacio, se puede cambiar el cartucho "memoria" o es necesario vaciar su contenido al disco duro de una computadora. Probablemente porque se trata de una tecnología reciente, a pesar de las ventajas que ofrece, los profesionales estiman que la calidad fotográfica obtenida con una cámara tradicional es mayor.

Cuando se solicitó mayor información sobre las cámaras digitales y los CCD, resultó que los fabricantes no las recomendaban para tomas de exteriores, y menos en las condiciones de equilibrio de la biblioteca. El tiempo de adquisición de la imagen, durante el cual la cámara debe quedar inmóvil, es relativamente largo y no se podía asegurar tanta estabilidad por el viento. Así que se escogió un sistema clásico de toma de imágenes seguido de su digitalización.

²⁸ Esta cámara es una ProgRes 3012 de marca Kontron.

Video o fotografía. Una imagen de video no ofrece más que 512 líneas y para el objetivo de la digitalización del mural queda descartada como forma de captura pues demanda requiere de más de 1100 píxeles. La digitalización de un negativo o positivo de un imagen fija puede llegar a 2700 dpi con los equipos más accesibles y por lo tanto permite sin ningún problema, una adquisición con la resolución deseada.

La fotografía, las longitudes del espectro visible e invisible

La fotografía tradicional consiste en el registro de la luz visible que llega a una película fotosensible, sin embargo es posible seleccionar o ampliar esta información mediante filtros o películas con sensibilidades a otras longitudes del espectro.

El proyecto Vasari, en vez de confiar en la calidad del color de la cámara, escogió tomar siete imágenes en blanco y negro con filtros de color y recomponer la imagen final basándose en algoritmos. Esta solución resulta en una mayor precisión que la proporcionada por la cámara con sus cuatro sensores (rojo, azul y dos de verde) sin embargo complica la obtención de la imagen al tener que realizar múltiples tomas y procesar siete archivos. Tanto el tamaño de las obras registradas por el sistema Vasary como las condiciones en las cuales éstas se llevan a cabo, son muy distintos de los del mural de la Biblioteca Central. Por un lado, se trata de pintura de caballete que difícilmente excede los 2 m², mientras que del otro son 3712 m². Además, la toma se realiza en un local cerrado con una cámara sujeta a una estructura controlada por computadora lo cual proporciona estabilidad y movimientos precisos, en tanto, para el mural, la cámara queda soportada por una estructura colgada desde la azotea de la biblioteca. Por ello las exigencias específicas deben ser consideradas a partir de las condiciones correspondientes. Por otra parte, el objetivo del registro del mural consiste en dar al restaurador la información necesaria para controlar el fenómeno de deterioro y facilitar sus necesidades de análisis; el color, por lo tanto, no requiere ser exacto sino que todas las tomas sean efectuadas en las mismas condiciones con la finalidad de comparar las imágenes.

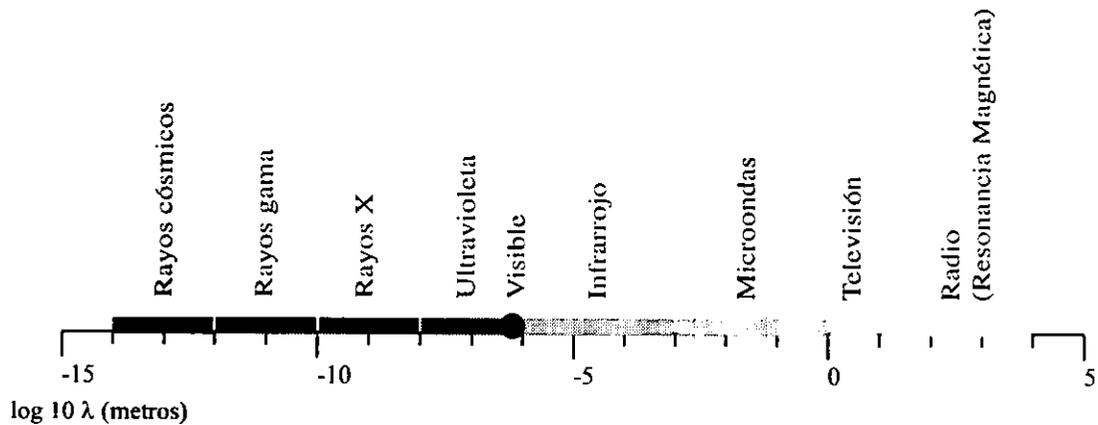


Figura 39. El espectro electromagnético.

El espectro electromagnético abarca de las ondas de radio y de microondas hasta los rayos X y gamma, parte de éste corresponde a la luz visible (de 4.000 Å a 7000 Å); cerca de los 780 nm se encuentran las ondas luminosas que corresponden al rojo y aproximadamente a los 380 nm las del azul violeta. (Figura 39). Las ondas fuera del rango de lo visible aportan una información distinta de un objeto haciendo necesario el uso de lentes, filtros y películas especiales para poder registrarla. Ha sido posible determinar que ciertas longitudes caracterizan mejor ciertos elementos y esto ha sido fundamental para definir la toma y el estudio de imágenes desde satélite. Por ejemplo, en el proyecto Landsat 7²⁹, se toman siete imágenes con bandas de longitud de ondas entre 450mm y 1250mm. Éstas han sido escogidas en relación con la información buscada, entre otros datos meteorológicos, sobre agricultura, minerales, higrimetría y contaminación.

Las longitudes del infrarrojo y del ultravioleta son regularmente empleadas en restauración de pintura de caballete y en arqueología.

²⁹ El proyecto Landsat consiste en un sistema de información a partir de imágenes obtenidas por satélite de los recursos de la tierra. El primer satélite fue enviado en 1972 y en la actualidad Landsat 4 y 5 (1982 y 1984 respectivamente), siguen funcionando y dan vueltas alrededor de la tierra en 98 minutos pasando por los polos. Landsat 7 está en su fase de planeación para su envío al espacio programado para marzo de 1998. El espacio de almacenamiento necesario para una imagen es de aproximadamente 375 GB. (información obtenida en el WEB de la NASA)

La fotografía infrarroja. Las imágenes resultantes de las radiaciones en el campo del infrarrojo pueden ser obtenidas con medios sensibles a estas longitudes de onda o en forma indirecta al fotografiar la imagen producida por un equipo que puede registrar la radiación infrarroja. Así, es posible fotografiar el sistema sanguíneo, dado que la piel es transparente al infrarrojo o los cuerpos que emiten calor en la oscuridad mostrando la distribución del calor sobre su superficie; los militares la utilizan para distinguir elementos pintados de verdes del follaje como es el caso del camuflaje, tomando en cuenta que la clorofila es transparente a la radiación infrarroja. Permite descifrar documentos antiguos o alterados. Asimismo puede ser utilizada para tomar objetos distantes con más nitidez que con luz visible, dado que la luz infrarroja tiene la calidad de no ser dispersada de la misma forma que la luz visible por los factores atmosféricos (Necci, 1992).

Como las películas de infrarrojo del mercado abarcan una parte del espectro visible, es necesario utilizar filtros al momento de la toma, para eliminar esta parte del espectro electromagnético. Se usa generalmente un filtro rojo mediano (Wratten 25) el cual elimina las radiaciones del violeta y del azul, pero deja pasar la zona roja del espectro visible. Otra serie de filtros, Wratten 87(A-B-C-D) impiden el paso de las longitudes de ondas del espectro visible. En la imagen resultante, las partes brillantes muestran aquéllas que son más calientes.

Se realizó una prueba de toma con película de infrarrojo con una serie de problemas, dado que no hay forma de controlar el tiempo de exposición de la película (Figura 40). El resultado óptimo fue, en condiciones de iluminación con luz de tungsteno, a una distancia cámara-mural de 1.80 m, con un diafragma de 5.6 y una exposición de 1/8. Adicionalmente, es necesario corregir el enfoque aumentando un poco la distancia ideal registrada a través del objetivo, de esta forma, las lentes llevan generalmente un punto rojo en la escala de distancias de enfoque para efectuar esta corrección.



Figura 40. Toma con película de infrarrojo.

La observación de esta fotografía muestra solamente las piedras con distintos tonos de grises, y no aporta información adicional a una fotografía del espectro visible (Figura 41). Se habría podido esperar la aparición de manchas indicativas de zonas de humedad o de varillas cercanas a la superficie sin embargo, estos datos no aparecieron por lo que fue descartada la toma de imágenes de infrarrojo.

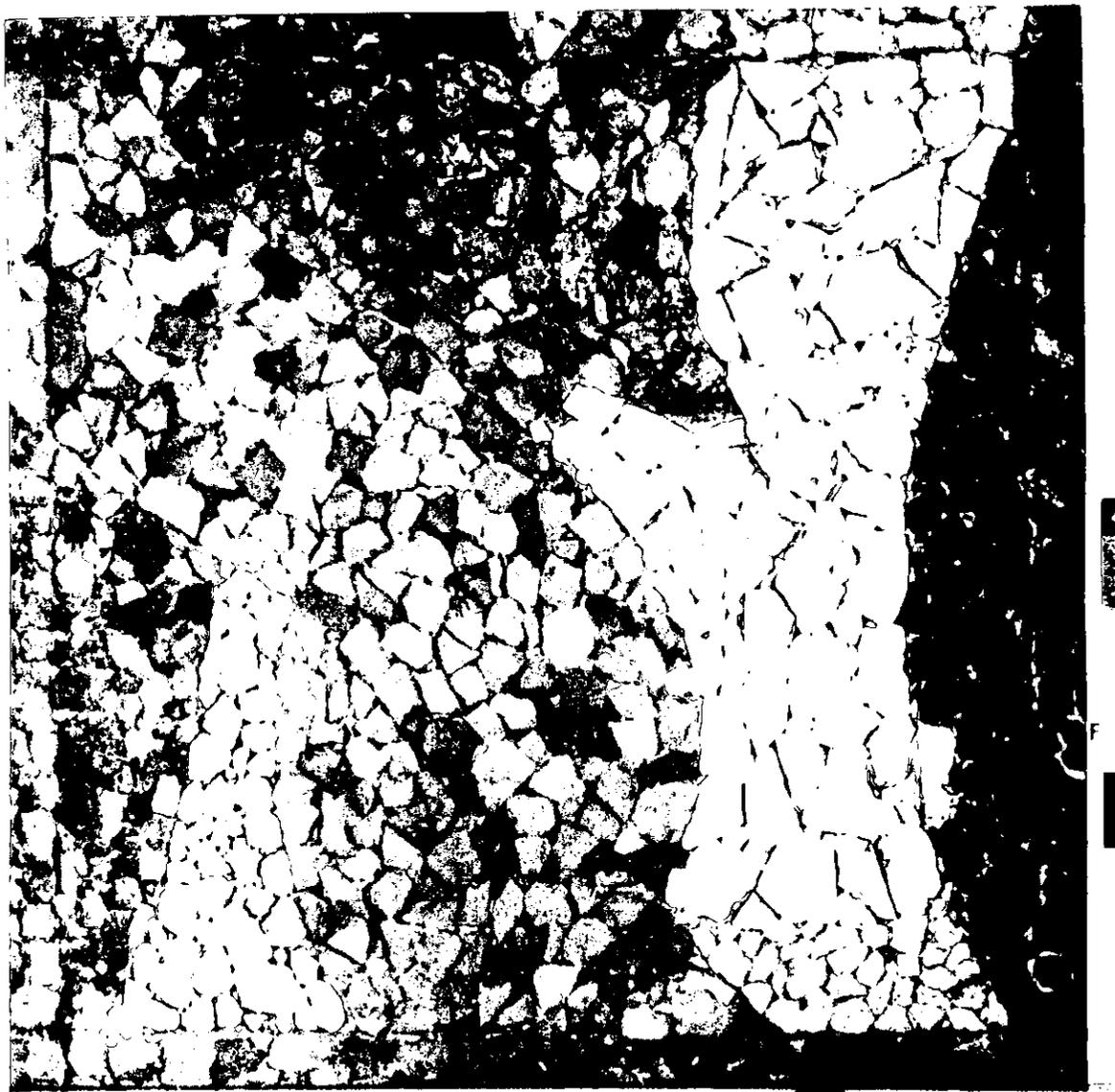


Figura 41. Placa del mural utilizada para los estudios.

La fotografía ultravioleta. De igual manera, es posible registrar las bandas correspondientes a la radiación de ultravioleta. La luz ultravioleta aumenta la resolución del microscopio y por la forma de absorción en forma selectiva por el objeto, es posible distinguir detalles estructurales diferentes en especímenes vivos. Tiene también la capacidad de diferenciar regiones por las características de fluorescencia, lo que la ha mostrado como una herramienta útil en la identificación de pinturas, cerámicas, granos de papel, y borrados en documentos. Sin embargo, la luz ultravioleta presenta el problema de dispersarse en condiciones ambientales, lo que no la hace una técnica adecuada para la fotografía de paisajes, ya que en ella, las fotografías se muestran borrosas y sin sombras (Necci, 1992). No ha sido factible realizar pruebas de fotografías con luz ultravioleta para el mural de la Biblioteca.

Superficie cubierta por cada imagen digitalizada

Al conocer la resolución adecuada, se puede definir qué superficie del mural quedará registrada por cada imagen digital, tomando en cuenta la capacidad del equipo de cómputo para procesar rápidamente las imágenes, así como las características de los sistemas de digitalización. El mural presenta la característica de haber sido construido con cuadros de 1x1m, así que es lógico respetar esta retícula para las imágenes. Un metro cuadrado digitalizado con una precisión de 1pixel=1mm y 24 bits por pixel genera un archivo de 3 Mbytes. Si se considera que, además es necesario dejar una franja de unos 50 pixeles (5 cm) alrededor de este cuadro para poder tener la relación con las placas vecinas, el archivo crece hasta 3.62 Mbytes. No existe problema alguno para ver y editar un archivo de este tamaño en una computadora personal, pero si multiplicamos por 4 o 6 el tamaño del archivo al abarcar una zona más amplia del mural en cada imagen, entonces su procesamiento empieza a ser lento. Por ello se decidió que cada imagen digital correspondiera a 1 m².

Superficie cubierta por cada fotografía

En el punto anterior se determinó que cada archivo de imágenes correspondería a una sola placa del mural, es decir 1 m^2 más una franja periférica. Ello no implica que cada fotografía cubra esta superficie. De hecho, cada una podría corresponder a una superficie menor y varias ser agrupadas para reconstruir la imagen de una placa o, al contrario, la fotografía podría cubrir varias placas y ser digitalizada por subpartes o en su conjunto para después aislar cada una de las imágenes de placas en un archivo independiente.

Fotografiar subzonas para agruparlas más adelante, no se justifica para obtener imágenes de 1000×1000 píxeles ya que cualquier digitalizador tiene la capacidad de digitalizar con mayor resolución y porque abarcar la superficie de una placa del mural no implica alejar mucho la cámara del mural.

Integrar una zona más amplia del mural presenta la ventaja de no requerir de tantos movimientos de cámara, por lo tanto, los cuadros tomados en una sola fotografía presentan las mismas condiciones de iluminación ambiental. Sin embargo se presentan varios problemas. ¿Qué tan factible es alejar la cámara de la fachada de una distancia suficiente para tomar esta fotografía? ¿Cuál es el sistema de digitalización que se emplearía?

En el caso de digitalizar toda la imagen en una sola vez, se requiere de un digitalizador que proporcione muchos puntos. Por ejemplo, si la fotografía abarca dos cuadros en altura por tres en lo largo, se está hablando de la necesidad de obtener una imagen de 3000×2000 píxeles lo cual es factible con digitalizadores comunes. Sin embargo, para superficies muy grandes (15 cuadros de largo por 10 de alto), ya no existirían en el mercado digitalizadores con estas características y una vez más, el tamaño de los archivos generaría una serie adicional de problemas. La mayoría de los digitalizadores de diapositivas ofrecen una resolución un poco mayor que 2000×3000 píxeles y en consecuencia se limitaría la superficie posible a seis placas.

Si se digitaliza la imagen dividiéndola por zonas, intervienen más pasos manuales para la ubicación de la zona a digitalizar. Adicionalmente, los procesos posteriores de corrección de

distorsión y de iluminación deben tomar en cuenta la posición relativa de la imagen dentro de la fotografía con la finalidad de realizar las correcciones de los defectos causados por la aberración de la lente y la iluminación ya que éstas varían sobre la superficie. Otra limitante a la posibilidad de tomar fotografías amplias de la fachada y digitalizar cada placa con la resolución adecuada, está impuesta por la resolución de la película fotográfica. Al querer digitalizar con mucho detalle una parte, el grano mismo de la película puede empezar a estorbar.

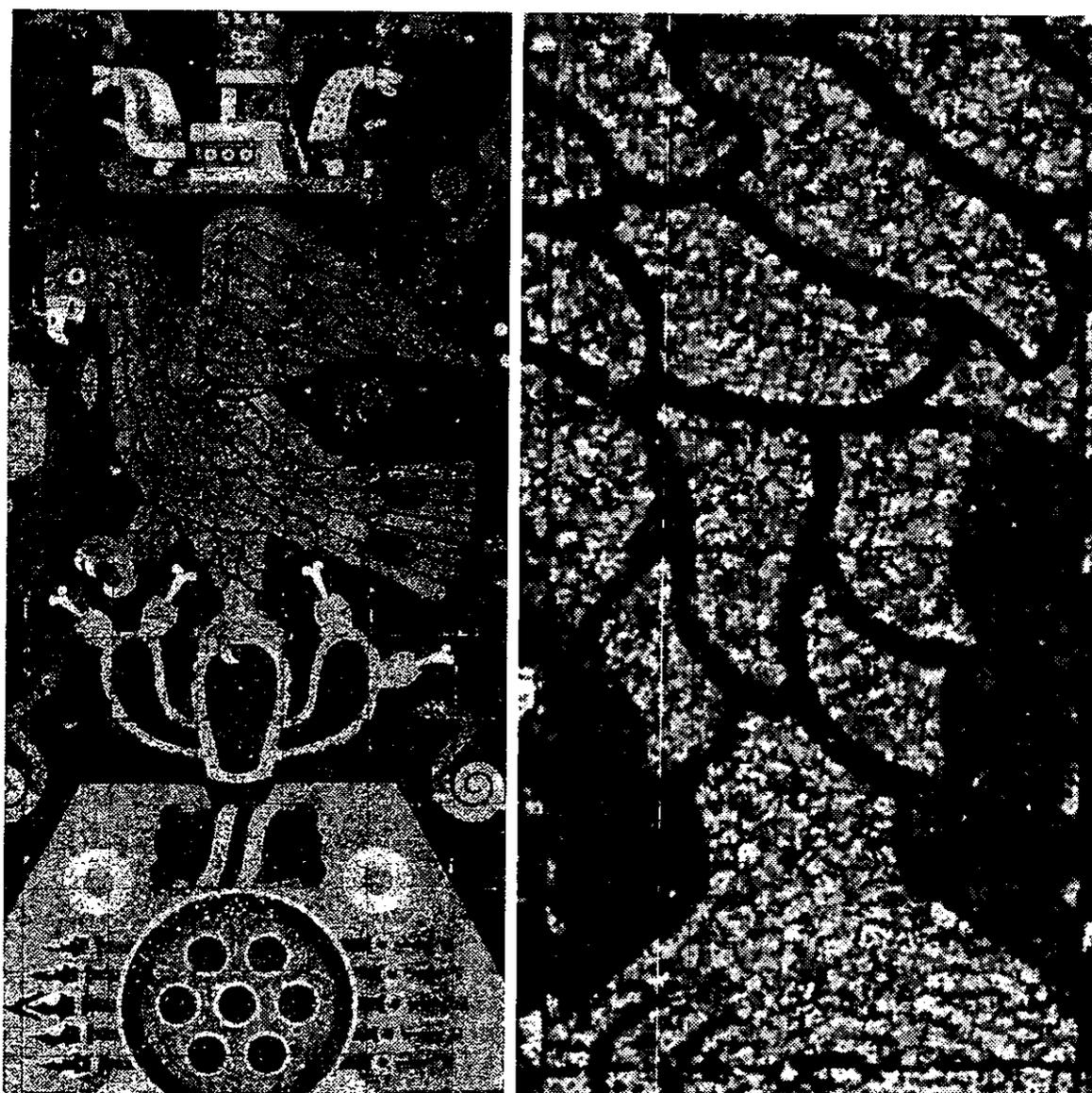


Figura 42. Digitalización donde aparece el grano de la película.

En la Figura 42 se observa como, desde una fotografía de tamaño de hoja carta impresa a partir de un negativo de 4" x 5", en la digitalización realizada a 2400 dpi, aparecen los granos de la película.

No es posible decidir cuál es la superficie cubierta por cada fotografía sin antes estudiar tanto la ubicación de la cámara en relación con la fachada, como las características de la cámara a emplear *i.e.*, su lente y el tamaño de los negativos. Sin embargo, se sabe en este punto que la superficie mínima es de 1 m²; que hasta 2 m por 3 m se podría digitalizar la imagen en su

conjunto y después recortar las áreas correspondientes a cada placa; en el caso de fotografiar superficies más grandes se tendría que digitalizar por subzonas.

A qué distancia ubicar la cámara, qué lente utilizar, tamaño de negativo

La posición de la cámara debe ser definida en relación con la superficie por capturar, el tipo de lente utilizado y el espacio disponible para ubicarla.

Se analizaron dos posibilidades, una captura desde el piso con lente telescópica o una toma cercana al mural empleando una estructura de soporte que se desliza a lo largo de la fachada. Mientras que la primera posibilidad ahorra muchos esfuerzos, se escogió la segunda por ofrecer varias ventajas.

- La precisión requerida era difícilmente alcanzable con telefoto. El efecto de perspectiva hace perder los contornos inferiores de las piedras, ya que quedan escondidos por el relieve de las piedras ubicadas más abajo.
- No es posible controlar la iluminación ni corregirla. De un día al otro la iluminación ambiental cambia y también la iluminación por fachada, lo que implica colores distintos y el no corregir este defecto elimina parte del requerimiento inicial de obtener un registro preciso. La piedra de la fachada norte quedaría de un color distinto a la de la fachada sur y no se podría saber si es porque está más sucia o por una diferencia en la iluminación.

Una vez definido que la cámara estará amarrada a una estructura que se desliza sobre la fachada, queda por definir a qué distancia de ésta debe ubicarse, lo cual depende en parte de la definición de la lente fotográfica idónea.

Las lentes que generan menos distorsión son las de 50 mm y los telefotos. Con un telefoto, se tendría que alejar la cámara de la fachada haciendo la estructura más pesada y complicada. La captura de un área más amplia fue evaluada como forma de economizar la cantidad de movimientos de la cámara. Sin embargo fue descartada por implicar el uso de un gran angular que genera mucha distorsión y el empleo de una estructura de soporte pesada.

Utilizando una lente de 50 mm, y cubriendo una placa del mural por fotografía, la cámara debe ser ubicada a una distancia de aproximadamente 1.65 m de la fachada. Así, la estructura de soporte puede ser sencilla y ligera, y las tomas realizadas con la mínima distorsión.

Un factor adicional para la selección de la cámara es el tamaño del negativo. Si las cámaras más usuales tienen negativos de 35 mm, también existen cámaras con negativos de 120 mm, y de 4"x5". La información capturada en negativos más grandes es mucho mayor, aunque el costo en general es también mayor. Su uso habría sido importante si se hubiera escogido abarcar un área muy grande en cada fotografía, pero en este caso no presenta muchas ventajas.

Tipo de película fotográfica

Como se mencionó anteriormente, después de estudiar varias posibilidades, las películas de 35 mm que abarcan el espectro de lo visible fueron escogidas para fotografiar el mural de la Biblioteca. Éstas deben ser seleccionadas en relación con la fuente de iluminación, si es luz del día o luz de tungsteno, lo cual se definirá más adelante al estudiar el problema de la iluminación. Falta definir aún la conveniencia de recurrir a negativos o positivos. Mientras que las películas fotográficas para impresión en papel ofrecen una definición de 80 líneas por milímetro, las de diapositivas proporcionan 120 líneas por milímetro. Esta última es por consecuencia más precisa y por ello fue escogida.

Control de la distorsión

Es casi inevitable que la imagen presente algún efecto de distorsión en relación con el original por el efecto acumulado de varios fenómenos, *i.e.*, la cámara, su lente, el sistema de digitalización y los efectos de perspectiva. Las técnicas de procesamiento digital de imágenes permiten corregir este problema, y para ello es necesario proporcionar al sistema la información necesaria para generar un modelo del fenómeno de distorsión. La atención particular dada al

hecho de contar con una imagen precisa del objeto se debe a la necesidad de medir los elementos y comparar imágenes del mismo objeto, tomadas en épocas distintas.

La distorsión entre el objeto inicial y su imagen puede ser debida a la acumulación de un efecto de perspectiva, sumado a los defectos inherentes de la lente de la cámara y el digitalizador (Figura 43). Para recuperar una representación precisa del objeto inicial, es necesario revertir paso a paso estos dos fenómenos, primero la distorsión lente-digitalizador y después la perspectiva.

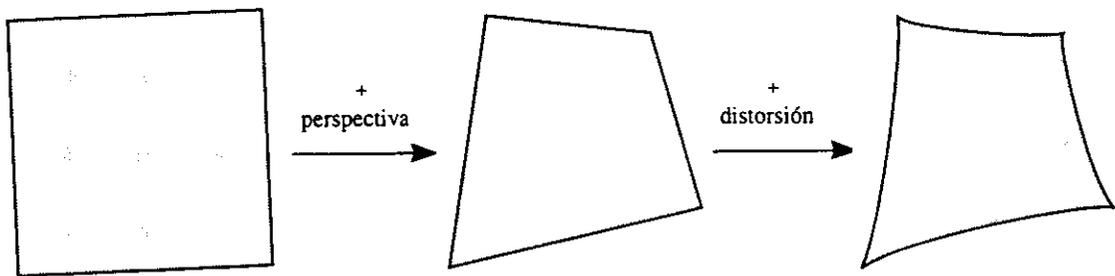


Figura 43. Esquema del efecto acumulado de la perspectiva y de la distorsión en la captura de la imagen.

La distorsión causada por la lente (la aberración), la cámara y el sistema de digitalización no depende de qué tan lejos esté la cámara del objeto de estudio ni de las condiciones ambientales, es una distorsión totalmente física, constante en todas las imágenes digitales creadas con el mismo equipo. Por lo tanto se puede calcular el modelo de transformación una vez, para reinvertirlo en las imágenes. Para ello, se utiliza un elemento conocido, medible, el cual es fotografiado y digitalizado. Se dibujó un damero con cuadros de 10 cm y se imprimió con un plotter. Esta impresión fue fotografiada y digitalizada con el mismo equipo que las demás imágenes (Figura 44), se midieron las coordenadas de cada una de las esquinas y se pudo comprobar que el equipo utilizado no generaba distorsión.

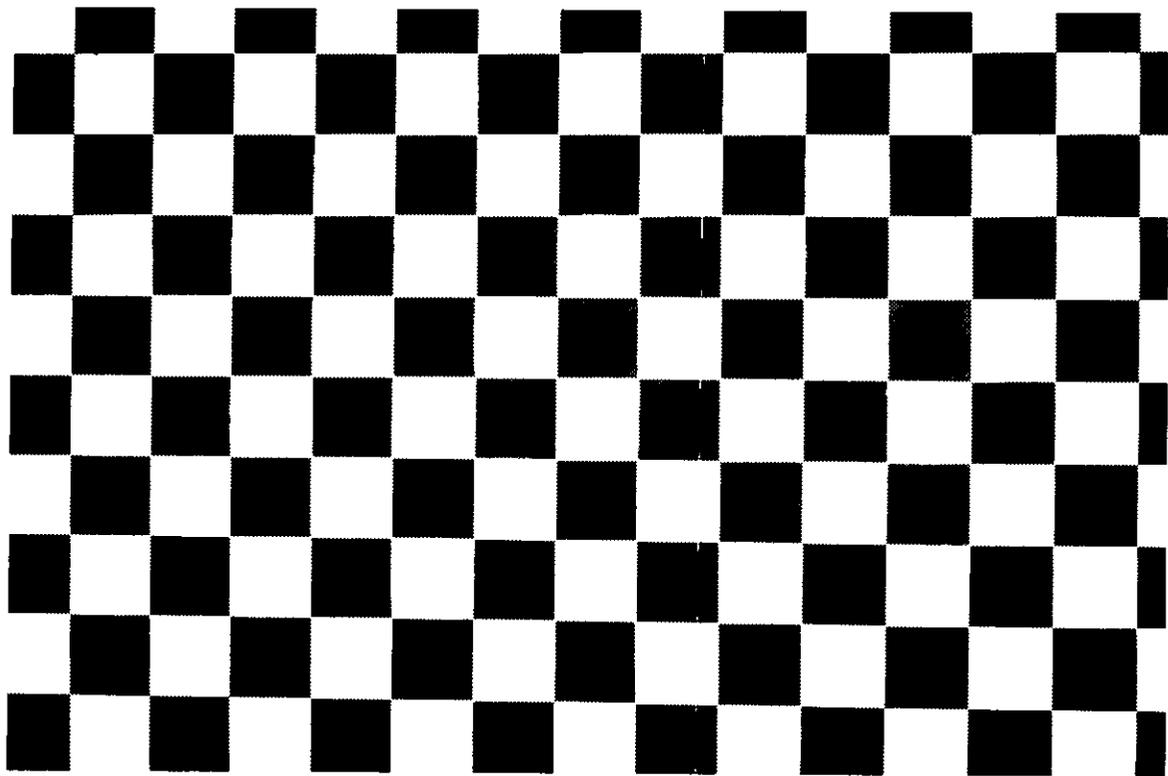


Figura 44. Damero digitalizado para estudiar la distorsión del sistema óptico.

La distorsión perspectiva está causada por la falta de paralelismo entre el plano del mural de la Biblioteca y el plano de la película fotográfica. En principio se debe buscar que estos dos planos correspondan, sin embargo para poder comprobar que lo sean y en caso que no lo fueran poder corregir este error, se decidió aplicar sobre el mural un marco. Con los cuatro puntos de las esquinas se tienen suficientes elementos para realizar la recuperación. Además este marco permite tener una referencia de escala ya que se conocen sus medidas. Este marco es parte de la estructura que carga la cámara y mide 1.10 m x 1.10 m, abarcando así una placa y una franja circundante de 5 cm.

Control de la iluminación

Para comparar imágenes digitales, agruparlas y analizarlas, es necesario que todas estén tomadas bajo las mismas condiciones de iluminación. La luz solar por naturaleza, es una luz

cambiante según la época del año, la hora del día y adicionalmente, se encuentra modificada por las condiciones atmosféricas. Además, las fachadas ubicadas del lado norte de un edificio no tienen las mismas condiciones de iluminación que las fachadas del lado sur. La única forma de asegurar una iluminación controlada cuando se trata de fotografía de exterior, es trabajando de noche con luz artificial.

Para que cada una de las fotografías esté tomada en las mismas condiciones de iluminación, las luces se integran a la estructura que soporta la cámara y ambos elementos quedan así fijos, uno en relación con el otro y se mueven en conjunto.

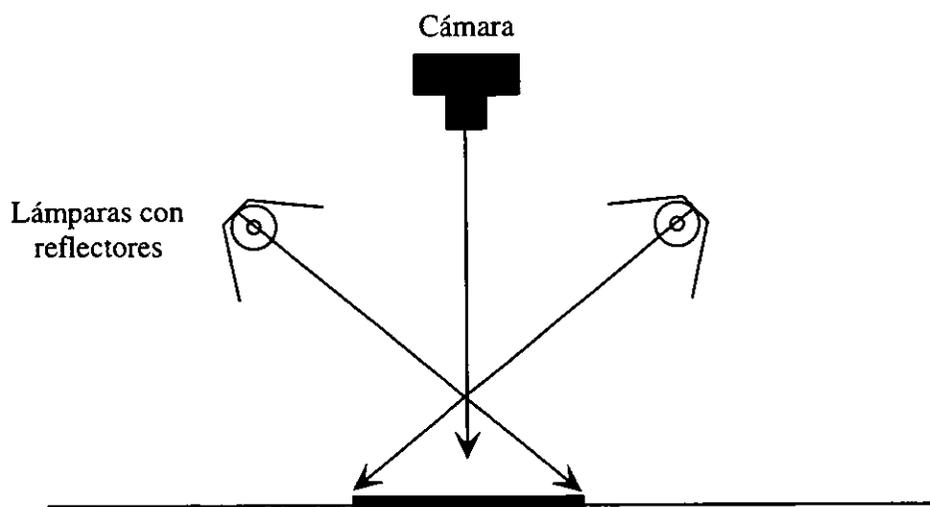


Figura 45. Esquema de iluminación directa.

Las sombras, importantes para observar el relieve de los objetos, son un estorbo en el caso del registro de las contornos de las piedras. El sistema de análisis puede interpretar un elemento en la sombra como diferente del mismo en condiciones de iluminación. Para eliminar sombras y tener un reparto homogéneo, se utilizaron dos luces de 600 watts ubicadas a 45° en relación con el plano del mural, a la mitad de la altura de la placa fotografiada y orientadas hacia el lado opuesto (Figura 45). Sin embargo, en la parte central, es posible que se sume la luz proveniente de las dos fuentes.

Otra **estrategia** para obtener una luz difuminada en todas las direcciones consistiría en utilizar un tubo **fluorescente** alrededor del objeto (Figura 46), usando la luz indirecta reflejada por un domo cubierto por un material difusor (Awcock *et al*, 1996). Ésta es una solución que permite obtener una luz **más homogénea** que en el caso anterior, pero resulta difícil de implementar por el tamaño de las **placas**.

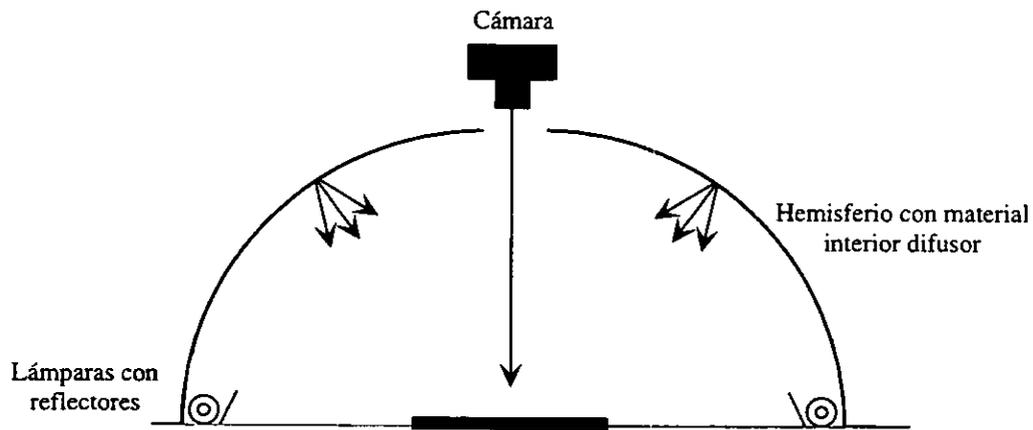


Figura 46. Esquema de iluminación indirecta.

Aún tomando las medidas necesarias para que la iluminación sea lo más constante posible en toda la superficie fotografiada, ciertas partes reciben más luz que otras, sobre todo en el caso de la iluminación directa. Para solucionar este problema es necesario obtener una imagen que corresponde al reparto de la luz sobre la superficie. Para ello, se fotografía una placa de color uniforme, de color neutro. (Figura 47)



Figura 47. Fotografía de una placa gris para modelar la iluminación.

Control del color

Contrariamente al caso de la fotografía de pinturas en el proyecto Vasari mencionado anteriormente, si las imágenes del mural necesitan un cierto grado de fidelidad del color para poder comparar imágenes antes o después de restaurar con su evolución varios años después, tampoco se busca una fidelidad absoluta. Así, fue ubicada una lámina de color (*Kodak Color Separation Guide*) sobre el marco, con objeto de tener un control sobre los cambios de color debidos a la luz, la película, el revelado y la digitalización.

Estructura de soporte para la cámara

Se diseñó una estructura ligera que permitiera la toma de las imágenes (Figura 48). Está colgada desde su eje de gravedad para evitar esfuerzos contra la fachada, considerando que sus

movimientos verticales y horizontales pueden ser controlados desde el techo del edificio. A esta estructura debe ser añadida una plataforma para que una persona pueda posicionar el marco sobre la fachada antes de tomar la fotografía. El marco es de 1.10 m de altura, de esta forma abarca así una placa más 5 cm de cada lado para permitir la superposición de dos imágenes vecinas. En el sentido horizontal, existen dos configuraciones, una de 1.40 m de largo para la captura de las placas de 30 cm que se encuentran en los orillas del edificio en la misma toma que la placa vecina de 1 m; la otra configuración es de 1.10 m de largo para las placas normales. Una referencia de color queda pegada al marco, así como un nivel de agua para colocarlo derecho.

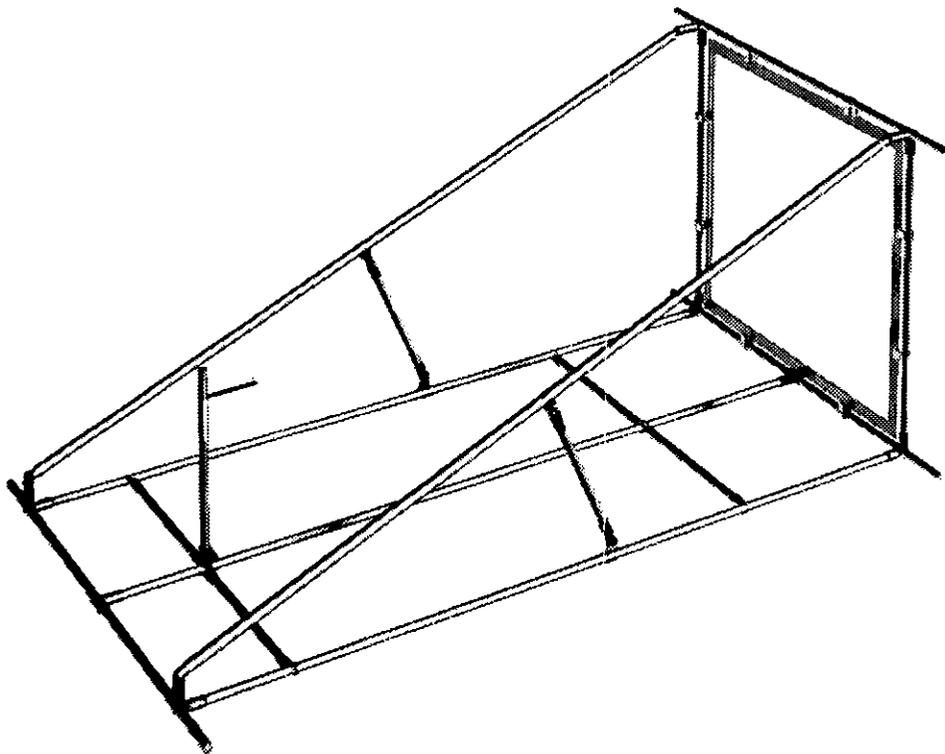


Figura 48. Estructura para la toma fotográfica.

Esta estructura fue diseñada en forma teórica, para resolver los principios desarrollados anteriormente, sin embargo en caso de decidir llevar a cabo la digitalización del mural, se deberá adecuar al sistema de hamacas instalado durante el proceso de restauración.

Definición del método de digitalización

La calidad de la imagen digital depende del equipo utilizado para su adquisición y éstos afectan el resultado en cuanto a la resolución, el rango de tonos, el balance de los colores y la nitidez. Aun cuando es factible realizar una serie de correcciones y mejoras sobre una imagen, gracias al uso de programas específicos y de técnicas de procesamiento, la captura debe procurar ofrecer la más alta calidad posible para trabajar con un material de calidad. Una frase famosa en el ámbito de la computación es *Garbage In, Garbage Out* o GIGO, es decir que si el original no tiene calidad o la información deseada, no será posible inventarla. Los digitalizadores que funcionan para la captura de imágenes impresas trabajan con la luz reflejada por el original, mientras que los que permiten la captura desde un negativo o una diapositiva usan la luz que pasa por éste, es decir la luz transmitida. La digitalización de diapositiva presenta un problema adicional por el tamaño del original, y los equipos requieren de una resolución mayor para obtener una adecuada imagen final.

Características de un sistema de digitalización

La resolución. La resolución ideal depende del uso final de la imagen, pero no todos los medios disponibles permiten obtenerla

El rango de tonos y el balance tonal. En la actualidad, muchos digitalizadores tienen la capacidad de digitalizar con más de ocho bits por canal, mientras que al final sólo se emplean ocho, esta característica favorece una mejor calidad de la imagen gracias a los ajustes factibles al momento de la captura. Éstos tienen que ser realizados en el momento de la digitalización, dado que después se pierde la información de los bits adicionales. Los digitalizadores que posibilitan una captura mayor que 24 bits presentan generalmente resultados con menor ruido, mejor graduación y contraste, así como mayor saturación de los colores, nitidez y detalles en las partes oscuras.

Para estudiar el comportamiento de una imagen digital, es posible recurrir a su histograma, el cual consiste en una gráfica donde el eje X representa la escala de grises y el eje Y cantidades de píxeles. Se observan así, cuantos píxeles tienen un cierto valor de gris, para todos los tonos de grises, desde el blanco hasta el negro. En el histograma presentado en la Figura 2 de la página 16, se puede ver como todos los píxeles tienen valores cercanos al negro y como el rango de grises de la fotografía es muy limitado. En el histograma de la imagen corregida, este rango abarca del blanco hasta lo negro.

En el ejemplo, el histograma muestra la deficiencia de la imagen inicial, pero de la misma forma podría indicar una mala calidad de la digitalización, realizada en condiciones de sobre o subexposición. En este caso, el histograma presenta en sus extremidades picos donde se acumulan todos los niveles que pasan del rango definido. Si la digitalización dio a un gris oscuro el valor del negro, todos los grises más oscuros tendrán este mismo valor negro, por lo tanto no se distinguirá uno del otro. Un pico del lado izquierdo del histograma corresponde a una subexposición y pérdida de información en los tonos oscuros, en tanto, una acumulación del lado derecho, conduciría por otra parte a una sobreexposición y pérdida de información en los tonos claros.

La componente gama define de qué manera quedan mapeados en una escala numérica de grises los tonos de grises que en la imagen inicial van del negro al blanco. Si se usa una escala proporcional en el mapeo, no se obtiene una escala de valores de grises que parezca continua, pues no se considera una característica particular del ojo humano que le permite distinguir más tonalidades en los tonos oscuros que en los claros. Por ello se aplica una escala de conversión logarítmica (Foley, 1991). Contrariamente al punto anterior, su impacto es más visual que sobre la cantidad de información, por lo cual no resulta tan fundamental para el objetivo de este trabajo.

Existe toda una serie de herramientas que permiten modificar el histograma; sin embargo, es importante que al momento de la digitalización no se pierda información. Una de las más sencillas, cuando el rango de grises no abarca el correspondiente de valores del blanco al negro, consiste en reasignar valores de tal forma que el gris más claro toma el valor blanco, y el más

oscuro el valor negro, ello aumenta los contrastes y, en ciertos casos permite distinguir elementos que quedaban confundidos por tener valores de grises muy cercanos. Esto fue lo que se hizo para la Figura 2. De la misma forma que esta corrección puede ser proporcional, puede ser también logarítmica o ser aplicada a una sola franja de los tonos de grises, para abrir la amplitud de los tonos de grises que se acumulan en una zona específica.

En el caso de una imagen en color, el problema es más complejo ya que no se trata solamente de recuperar un rango de grises, sino que los tres canales de rojo, verde y azul (RGB), al ser combinados, presenten un adecuado balance de colores. Para este efecto, se buscan en la imagen puntos neutrales (elementos grises) en forma ideal; uno en una zona clara, uno en mediano y otro en la parte oscura. En estos puntos, los valores de cada canal RGB deberían ser idénticos. Un valor muy diferente en uno de los canales permitirá detectar y modificar una tendencia hacia un color específico en la digitalización. Una vez localizado el problema, se ajusta el histograma de cada canal.

No todos los sistemas de digitalización ofrecen los parámetros necesarios para controlar la calidad, así, y de un sistema al otro el color puede resultar muy distinto, en relación con la sofisticación del sistema óptico y de los algoritmos instalados. Se observa en Figura 49 que aun cuando el equipo casero Nikon (imagen de la izquierda) tiene mayor resolución, la nitidez del resultado es inferior a la obtenida en la digitalización en Photo CD a 2701 dpi. Los equipos de mayor calidad tienen también un alto costo y por esta razón las casas comerciales se han especializado en ofrecer el servicio de digitalización a los profesionales.

La nitidez. Las imágenes obtenidas vía digitalización presentan muchas veces una falta de nitidez inherente a la calidad del equipo utilizado y su tecnología. La Figura 49 permite ver cómo se mejora la calidad obtenida entre el equipo económico de marca Nikon y el sistema profesional desarrollado por Kodak. De igual forma que para el trabajo del histograma, existen varias técnicas de procesamiento digital de imágenes para mejorar la nitidez. Sin embargo, solamente es posible perfeccionar su calidad visual y es imposible reinventar una información inexistente en la imagen.

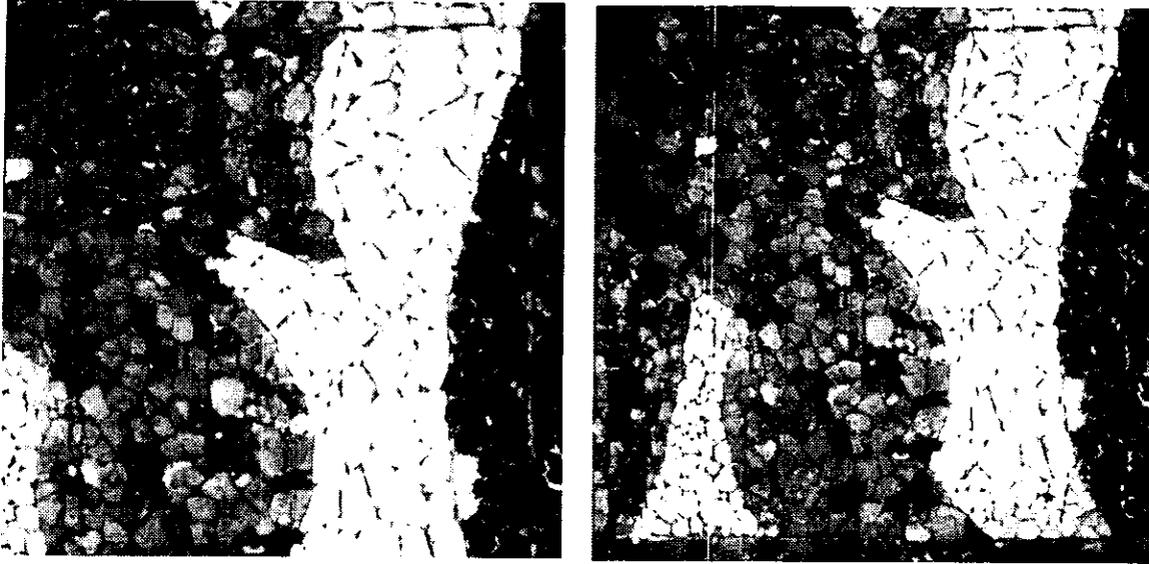


Figura 49. Comparación de nitidez entre dos equipos.

Sistema de digitalización propuesto

Después de comparar la calidad obtenida mediante el sistema Nikon y el Kodak, se escogió este último por su calidad, velocidad y costo.³⁰

Eastman Kodak anunció el sistema PhotoCD en 1990 como aquél que permitiría obtener fotografías en un disco digital para verlas con un monitor de televisión y editarlas con programas de cómputo. El servicio fue comercializado a partir de 1992. Cada imagen queda digitalizada a partir de negativos o positivos (diapositivas) en cinco formatos que quedan agrupados en un solo archivo de 4.5 MB, comprimido, sin pérdida de información. Los formatos son Base/16 de 128 líneas por 192 pixeles (99 K), Base/4 de 256 líneas por 384 pixeles (394 K), estándar de 512 líneas por 768 pixeles (1.6 MB), 4Base de 1024 líneas por 1536 pixeles (6.3 MB) y 16Base de 2048 líneas por 3072 pixeles (25.2 MB). En el sistema PhotoCD "Pro", la resolución máxima es

³⁰ Un estudio realizado en noviembre de 1996, daba como costo total para obtener las 3712 imágenes digitalizadas en CD-ROM, la cantidad de 14,386 pesos.

de 4096 líneas por 6144 píxeles, y además permite la digitalización de material de hasta 4 x 5 pulgadas.

El equipo consiste en una estación de trabajo, un digitalizador de diapositivas y un "quemador" de discos compactos, con un costo total de 80,000-100,000 dólares (Gugliemo, 1993). En cada disco es posible almacenar de 100 a 150 imágenes dependiendo de si las fotografías son en blanco y negro o en color.

Se lleva a cabo la digitalización con un *scanner* desarrollado por Kodak con una resolución de 2048 líneas por 3072 píxeles y 12 bits por cada color en menos de cinco segundos y luego la estación de trabajo procesa la imagen con un programa propiedad de la misma compañía, para calcular y salvar las cinco imágenes que corresponden a los cinco formatos. La imagen está modificada para corregir sus colores tomando en cuenta el tipo de película. Los dos formatos inferiores corresponden a una reducción de la imagen de base y son guardados sin compresión. Por lo que corresponde a los dos formatos de mayor resolución, igualmente se guardan usando un algoritmo de compresión que conserva solamente la diferencia entre la imagen de formato mayor y la imagen básica.

El esquema de colores empleado ha sido también desarrollado por Kodak y se llama PhotoYCC, divide la información en tres canales; uno para el brillo (Y), y dos para el color: uno corresponde al rojo menos el Y y el otro al azul menos el Y. (Larish, 1994).

Es posible imprimir un índice del contenido del disco, con versiones reducidas de cada imagen, para incluir una portada de éste y también imprimir con calidad casi fotográfica hasta un tamaño hasta 10x10 pulgadas. El disco puede ser leído con un lector de CD-ROM de computadora.

En la prueba realizada para el mural de la Biblioteca Central se observó lo siguiente:

1. Aun cuando el sistema tiene la capacidad de digitalizar diapositivas montadas, se recomienda el uso de tiras de negativos o positivos, ya que permiten la captura de todo el cuadro de 24 mm por 36 mm sin que aparezca el marco.

2. La nitidez ofrecida por el sistema de digitalización escogido (Kodak) es mayor que la obtenida con el digitalizador Nikon con el cual se contaba, a pesar que la resolución del primero (2048x3072) es menor que la resolución del segundo (2592x3888). La diferencia de calidad es particularmente notoria en las piedras oscuras que no tienen tanto contraste con el fondo (piedra azul, negra y verde oscuro) (Figura 49).

3. El color obtenido en la digitalización Kodak se encuentra menos saturado que el logrado con el digitalizador Nikon. Si en principio las imágenes parecen más tristes, o menos luminosas, en realidad se respetan las diferencias de tonalidades y se distinguen zonas que en la imagen Nikon quedaban saturadas.

4 - Al momento de abrir una imagen del CD, desde el paquete PhotoShop, es posible acceder al formato original de la digitalización guardado en el formato Photo YCC o de cada una de las imágenes calculadas en los distintos formatos, con su corrección de tonos y salvada en formato RGB. En el caso de abrir el formato original, se escoge el tamaño de la imagen deseada (uno de los cinco propuestos por Kodak), el tipo de película empleado (Kodachrome o Ektachrome) y el esquema de color al que se quiere convertir el formato de color YCC. Al comparar una imagen usando los dos tipos de archivos, se observó que se obtiene mayor nitidez y colores más exactos cuando se utiliza el formato original de la imagen. Por otra parte, cuando la imagen es llamada desde el programa PhotoShop, es posible convertirla al esquema de colores RGB o al CIELab. Las pruebas realizadas muestran que se obtiene mayor nitidez y mejores colores (en general la imagen es menos rojiza) y mejor contraste (se nota sobre todo en la piedra roja) con el segundo esquema (Andrews, 1995). En términos generales, esto indica que los convertidores de la imagen inicial desarrollados por las grandes compañías que elaboran programas profesionales para el trabajo de imágenes, son mejores que el propio de Kodak.

Para digitalizar todo el mural serían necesarios alrededor de 37 discos.

Organización de las imágenes

Finalmente, una vez que la fachada de la Biblioteca queda registrada en las 3712 imágenes, esta cantidad hace indispensable encontrar una forma lógica para su organización, facilitando así el acceso a la información.

La superficie cubierta por cada imagen corresponde a un poco más del área de una placa del mural y como cada fachada está reticulada, resulta lógico recurrir a un sistema de matriz para dar nombre a cada imagen. Los archivos correspondientes a una fachada específica pueden tomar como primera letra de su nombre, la inicial de su orientación, S, E, O y N. Se ubica el origen de la matriz en la esquina superior izquierda, mientras las columnas quedan registradas con letras y las hileras horizontales con números. De esta manera el archivo S_B5 corresponde a la placa de la segunda columna, quinto renglón de la fachada sur.

Un sistema más completo, con una interfaz gráfica, podría presentar un dibujo de las fachadas y al señalar una placa específica enseñar la imagen correspondiente. Después, con el cursor se podrían consultar las placas ubicadas alrededor sin tener que regresar a la imagen general.

PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES

Cada pixel de una imagen tiene como propiedades su ubicación y un valor que corresponde a la cantidad y el color de la luz que provienen del objeto. El procesamiento digital de la imagen consiste en aplicar cálculos para transformar los pixeles y extraer información.

Existen múltiples algoritmos para trabajar imágenes, los cuales se pueden dividir en:

- Algoritmos para mejorar el aspecto visual de una imagen, así como darle mayor nitidez o aumentar sus contrastes.
- Los algoritmos para corregir defectos de la imagen como es la reducción de ruido.
- Los algoritmos para segmentar una imagen en elementos o zonas de interés.

- Algoritmos para reconocimiento, interpretación y cuantificación.

Éstos pueden recurrir a diferentes tipos de cálculos: *i.e.*, cálculos aritméticos u operaciones booleanas aplicadas pixel por pixel donde se involucran una o varias imágenes como por ejemplo, promediar o restar imágenes; cálculos que se efectúan sobre la base del histograma e implican un nuevo mapeo de cada pixel; cálculos que en vez de ser efectuados en el dominio espacial de la imagen, requieren de su transformada a un dominio de frecuencia usando por ejemplo la transformada de Fourier; cálculos que recurren a convoluciones y operaciones morfológicas, basadas en la teoría de los conjuntos. La mayoría de ellos han sido principalmente desarrollados para imágenes en blanco y negro.

En esta parte del trabajo, se definen los algoritmos necesarios para cumplir con el doble objetivo de tener un registro preciso del mural y extraer la información buscada.

Recuperación de los problemas debidos a la toma de imagen (cálculos digitales)

Esquema general de los procesos

Existen varias fases para eliminar los errores debidos a la captura de la imagen, antes de poder realizar los cálculos y extraer la información.

1. *Transformación de la imagen al esquema de colores con el cual se desea trabajar.* Se escogió el esquema multispectral que proporciona mayor información. (Ver “Selección del esquema de color”, p. 225)
2. *Corrección de iluminación.* Esta corrección debe ser realizada antes de hacer correcciones geométricas de la imagen. En el caso contrario, se tendría que hacer un doble trabajo pues la corrección geométrica debería aplicarse tanto a la fotografía de la porción del mural como a la placa de gris que registra la dispersión de luz.

3. *Recuperación de la aberración.* Dado que es un problema intrínseco del equipo utilizado, debe ser realizada antes de la corrección de paralaje.

4. *Recuperación de distorsión perspectiva.* El algoritmo utilizado para esta recuperación crea directamente una subimagen de la zona interna del marco, eliminando todos los elementos periféricos. Además, alinea automáticamente la imagen corrigiendo así una posible rotación del marco de referencia; y lleva a escala la imagen a la resolución escogida inicialmente de 1 pixel = 1 mm.

Selección del esquema de color

Las imágenes pueden ser trabajadas utilizando la información relativa al color o regresándolas a tonos de grises, como si hubieran sido capturadas con película en blanco y negro. Sin embargo surgen varias preguntas ¿será suficiente la información proporcionada con una sola imagen de tonos de grises? En el caso de trabajar una imagen a color, dadas las distintas posibilidades ofrecidas por los sistemas de cómputo, ¿cuál es el formato de registro más conveniente?

La imagen monocromática contiene menor información que una imagen en color y por lo tanto, su procesamiento resulta más rápido. Sin embargo, el interés por utilizar esta última reside en el hecho que el color es para el ojo-cerebro humano una información adicional que no puede ser totalmente reemplazada por los tonos de grises. De hecho el ojo puede distinguir miles de colores, mientras que en tonos de grises está limitado a 256 tonalidades. Por lo tanto, al pasar de un sistema policromático a uno monocromático, puede resultar que el tono de gris correspondiente a dos colores distintos quede similar y se pierda así información relevante para el proceso de entendimiento y análisis de la imagen.

Los sistemas de cómputo, buscando ofrecer al ojo humano una gama de tonos que corresponda a sus capacidades de percepción, utilizan para la definición de los colores 256

valores para cada uno de los canales de rojo, verde, azul lo que representa varios millones de colores posibles. En cambio, los tonos de grises se manejan con 256 valores. Es evidente que la cantidad de información proporcionada en el primer caso es considerablemente más importante.

La imagen acromática

Una imagen definida con tonos de grises muestra la cantidad de luz reflejada por los diferentes materiales, en términos físicos esta definición corresponde a la luminancia, mientras que en forma común se usa el término de brillo. La percepción de la luminancia por el ojo no es uniforme, y existe más sensibilidad para distinguir diferentes tonos en las partes oscuras que en las zonas claras. Los diferentes grises quedan generalmente definidos en una escala del 0 al 255 o sea con 256 tonos de grises. Sería posible contar con más tonos de grises, sin embargo no tendría sentido dado que el ojo humano no podría distinguirlos. Cada pixel requiere de ocho bits para poder abarcar 256 valores, ya que un bit para la definición de una imagen acromática proporciona solamente dos posibilidades de tono, dos bits dan cuatro, tres dan ocho, cuatro dan 16, cinco dan 32, seis dan 64, siete dan 128.

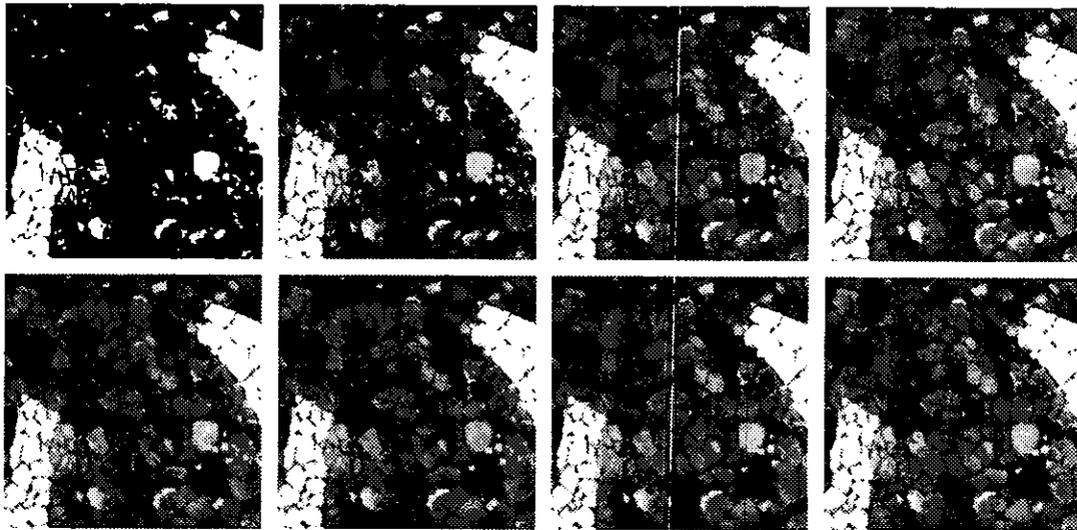


Figura 50. Imagen definida con 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 bits.

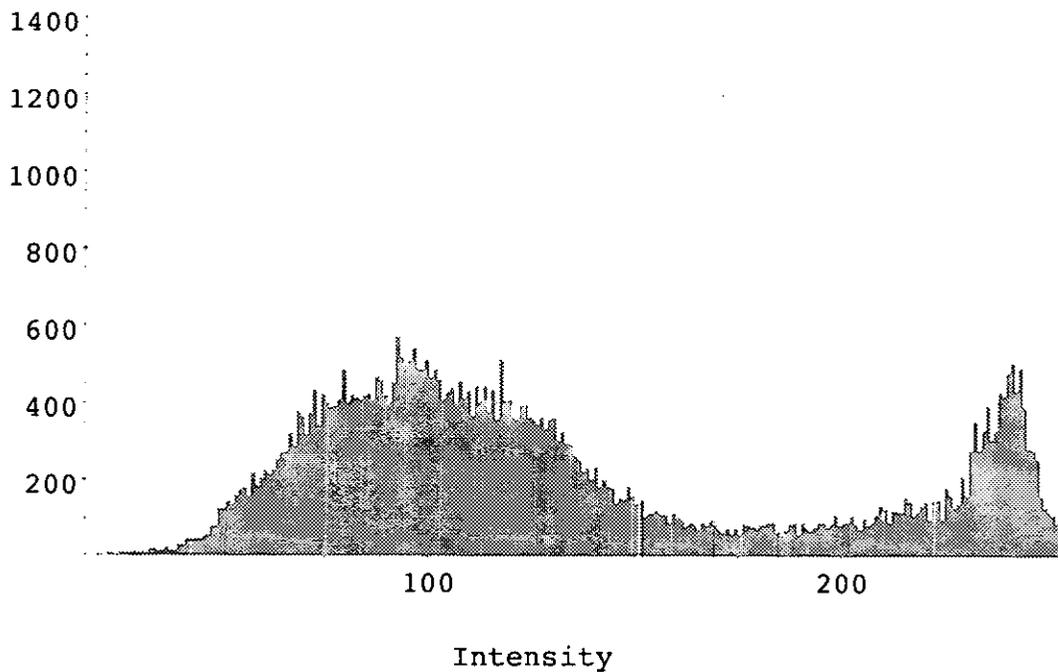
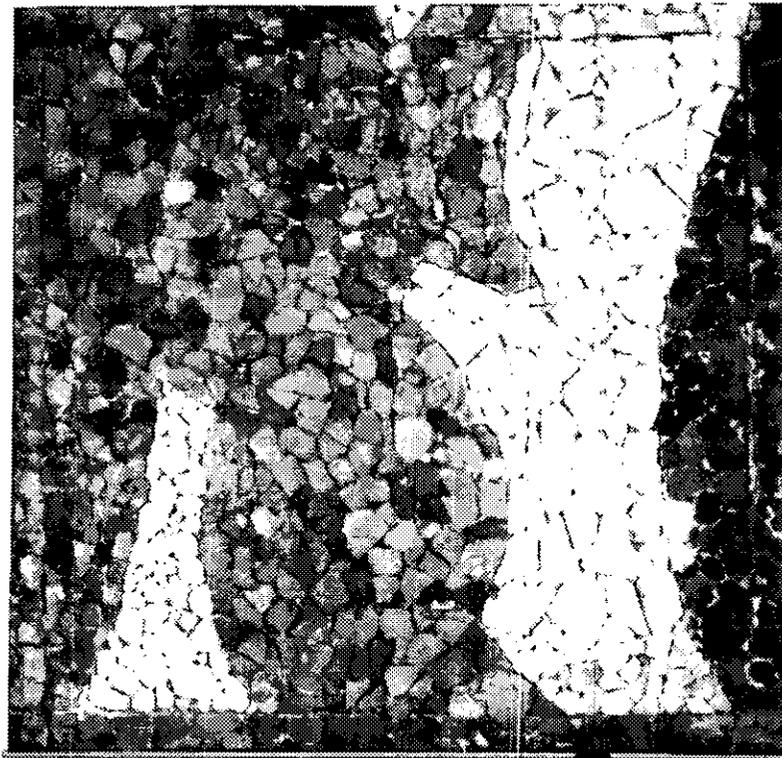
Como se puede notar en la Figura 50, a partir de 64 diferentes tonos de grises se observa una buena continuidad en los diferentes tonos. Para poder imprimir imágenes de tonos de grises con sistemas que trabajan solamente con tinta negra, como es el caso de la impresora láser, han sido desarrolladas técnicas de “medios tonos” que simulan los diferentes tonos mediante retículas.

La imagen de grises que corresponde más cercanamente a la percepción humana de la cantidad de luz correspondería a la luminancia definida por el sistema CIE como se analiza más adelante, en ésta se retoman en distintas proporciones la información de las componentes RGB en relación con la sensibilidad del ojo a estos componentes. Algunos programas como el KBV empleado para el desarrollo de este trabajo, asumen que una imagen de tonos de grises que resume una imagen a color puede ser calculada haciendo el promedio de los tres valores RGB en cada pixel así que:

$$I = (\text{red} + \text{green} + \text{blue} + 2) / 3$$

Un solo byte es necesario para definir estos pixeles que abarcan el rango 0-255.

Si se compara la fotografía en tonos de grises de la Figura 51 calculada a partir de la imagen a color de la Figura 41, es muy visible como existe una pérdida de información en la monocromática. Las piedras violeta-gris, rojas, verde oscuro y amarillas ya no se pueden distinguir unas de las otras. Por lo tanto este esquema no resulta adecuado para el análisis.



Clear Colors

Exact Map

Figura 51. Imagen en tonos de grises correspondiente al promedio de los canales RGB. En la parte inferior, el histograma correspondiente.

Los diferentes esquemas de manejo del color

Existen múltiples formas de describir y cuantificar el color. El físico, el artista, del impresor o la ciencia de la computación utilizan cada uno, distintos vocabularios y concepciones sobre el color, el cual les permite describirlo y trabajar adecuadamente con éste. En cómputo, existen varios esquemas y, según el objetivo del trabajo algunos resultan más adecuados que otros. Es importante entender su definición para seleccionarlos.

Para usar el color como elemento de información para la computación gráfica ha sido necesario definir modelos que permitan medir y realizar cálculos sobre éste, en forma precisa y codificada. Por ejemplo, cuando se genera una imagen a partir de una escena tridimensional, es importante poder definir el color resultante de una superficie amarilla iluminada por una luz verde de una intensidad específica.

Entre los más empleados, el sistema CIE tiene la ventaja de proporcionar una descripción completa del universo de colores; el matiz, saturación y brillo corresponde a una forma intuitiva y humana de describirlo; el CMYK es el sistema empleado en imprenta y los sistemas usados en cómputo son RGB, CMY, YIQ, HSV, HSI y derivados. Algunos de éstos corresponden a la propia forma de trabajo del equipo. El espacio de color RGB es el sistema de los monitores CRT mientras que YIQ se relaciona con los sistemas de color de la transmisión televisiva y el CMY a algunas impresoras a color. Estos esquemas son muy abstractos y para facilitar el trabajo de los usuarios, fueron desarrollados sistemas más intuitivos como HSV y HSI que permiten una manipulación del color en una forma más cercana al esquema mental humano, lo cual simplifica la selección de colores para dibujar. Para procesamiento y cálculos, se aplica generalmente RGB, YIQ, HSI y HSV por la información que proporcionan o la facilidad de cálculos.

Algunos sistemas como RGB, HSV y HSI presentan problemas en su falta de uniformidad. Los espacios de colores CIELAB y CIELUV, derivados del esquema CIE son mejores en cuanto a percepción uniforme del color, además permiten una representación de un espectro de colores más amplio que el RGB. Por otra parte, ningún esquema utilizado en cómputo

tiene la capacidad de representar la amplia gama de colores del universo. Se maneja el término *gamut* para referirse al subconjunto de colores de un monitor o de una impresora.

La diferencia entre el universo de colores y el subconjunto desplegado por los monitores es particularmente importante en la zona de los verdes, donde el ojo humano ha desarrollado una particular sensibilidad para distinguir los colores. Según la cantidad de bits dedicados al manejo del video por las tarjetas, los monitores tendrán capacidad de un manejo más o menos amplio de los colores. Además según el monitor, su marca, el desgaste que puede presentar con el tiempo, éste podrá presentar una variante en la luminosidad o tendencias en aumentar ciertos tonos. Es común por ejemplo, que los monitores muestren una imagen azulada. Para usos donde la exactitud del color en pantalla es muy importante, como por ejemplo cuando se desea mostrar fotografías de pinturas, se tiene que corregir sus características.

La colorimetría (rama de la física que estudia el color), recurre para la cuantificación del color a términos tales como longitud de onda dominante, pureza de excitación y luminancia. La longitud de onda dominante corresponde a la onda del color percibido, es decir al matiz. La pureza de excitación se relaciona con el grado de saturación del color (en que proporción está mezclado con negro, blanco o tonos de grises) y la luminancia corresponde a la intensidad de la luz (Foley, 1991).

El desarrollo de técnicas de procesamiento basado en imágenes a color es reciente (1980) y está ligado al desenvolvimiento mismo de la tecnología, cuando se desarrollaron equipos capaces de registrar las imágenes a color.

Los modelos de color, como por ejemplo el RGB, donde ocho bits son utilizados para cada una de las componentes de rojo, verde y azul, pueden ser vistos como la combinación de tres imágenes de 256 tonos donde cada pixel tiene un valor de rojo, uno de verde y uno de azul. Por lo tanto una imagen a color es una imagen multispectral es decir que está compuesta de una colección de varias imágenes monocromáticas de la misma escena. Esto permite aplicar la amplia gama de algoritmos definidos para imágenes grises, a cada una de las bandas espectrales. En las imágenes multispectrales, varios datos quedan asociados a un pixel y se habla de un vector de

información.³¹ El manejo de varios datos para cada elemento permite cruzar información seleccionando los pixeles que en un canal caen entre tal y tal valor, en otro canal entre dos valores distintos, y en un tercer canal, con otros valores. Así en el caso del mural piedras distintas que en un canal pueden presentar el mismo tono de grises podrían ser distinguidas unas de las otras, tomando sus valores en otro canal.

La visión humana y el color

El ojo percibe el color sobre la base de una respuesta a los estímulos de rojo, verde y azul con receptores oculares sensibles en forma selectiva a estas tonalidades. La suma de estos tres colores en diferentes proporciones da la gama de los colores. Este mismo sistema de separación de los colores ha sido retomado para la fotografía a color y muchos monitores de computadora.

El ojo humano no es sensible en la misma forma a la energía de las distintas longitudes de onda, y tiene una mejor respuesta a los verdes que a las longitudes superiores al rojo e inferiores a los violetas. Además, es menos sensible a los cambios de color en las luces menos saturadas que se acercan al blanco.

El lumen es la unidad de medida para cuantificar la intensidad luminosa percibida por el ojo es decir la luminancia, y para medir la intensidad de una luz emitida por una fuente, la radiación, se utiliza el watt.

El modelo CIE

Creado en 1931 por la *Commission Internationale d'Eclairage* para estandarizar la definición del color, el sistema llamado CIE, fijó el color azul en la frecuencia de onda 453.8 nm, el verde en 546.1 nm y el rojo en 700 nm. El sistema tiene la particularidad de representar el conjunto de colores perceptibles por el ojo humano. El blanco se encuentra en la coordenada 0.33, 0.33; el alejamiento a partir de este punto corresponde a la saturación, mientras que el ángulo al

³¹ Una imagen multispectral está compuesta por varios canales o capas. Ambas palabras se usan en forma indistinta según el programa.

matiz (Figura 52). Los colores ubicados en la periferia corresponden a los colores puros es decir a una sola longitud de onda, salvo la línea diagonal que va del azul al rojo, esta línea se llama la línea magenta. Se encuentra en este lugar porque los monitores mezclan el azul y el rojo para obtener el color magenta. Para un color (Siggraph, 1993) del interior, la línea más corta a la periferia proporciona la longitud de onda dominante, la línea que pasa por el punto blanco, proporciona el color complementario (los colores complementarios, corresponden a colores cuya mezcla producirá un color blanco). Otra característica: en la línea que une dos puntos se encuentran los diferentes colores resultantes de la mezcla de los dos tonos originales, en el triángulo que une tres puntos, se encuentran todas las posibilidades de colores diferentes obtenidos de la mezcla de éstos tres en proporciones diferentes. Se puede observar que no es factible encerrar el conjunto de colores en un triángulo, lo que explica porqué los modelos de cómputo que utilizan tres componentes para definir el color, no pueden representar el universo de colores.

La relación directa entre el modelo CIE y la longitud de onda, ha permitido fabricar instrumentos llamados espectrocolorímetros, para calcular el valor de un color dado.

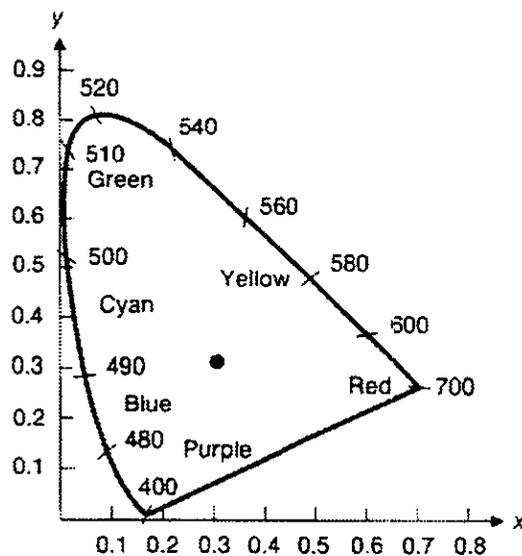


Figura 52. El diagrama cromático CIE.

En extensión a este sistema, para su manejo por computadora, se han desarrollado los espacios CIELAB y CIELUV, donde distancias iguales en sus gráficas representan cambios de percepción de color iguales para el humano. En el esquema CIELab, se obtienen tres canales, uno el *Lightness* muestra la cantidad de luz, mientras que los otros dos a y b corresponden a la definición del color. Esta definición presenta la desventaja de ser poco intuitiva y de dividir el color en dos canales.

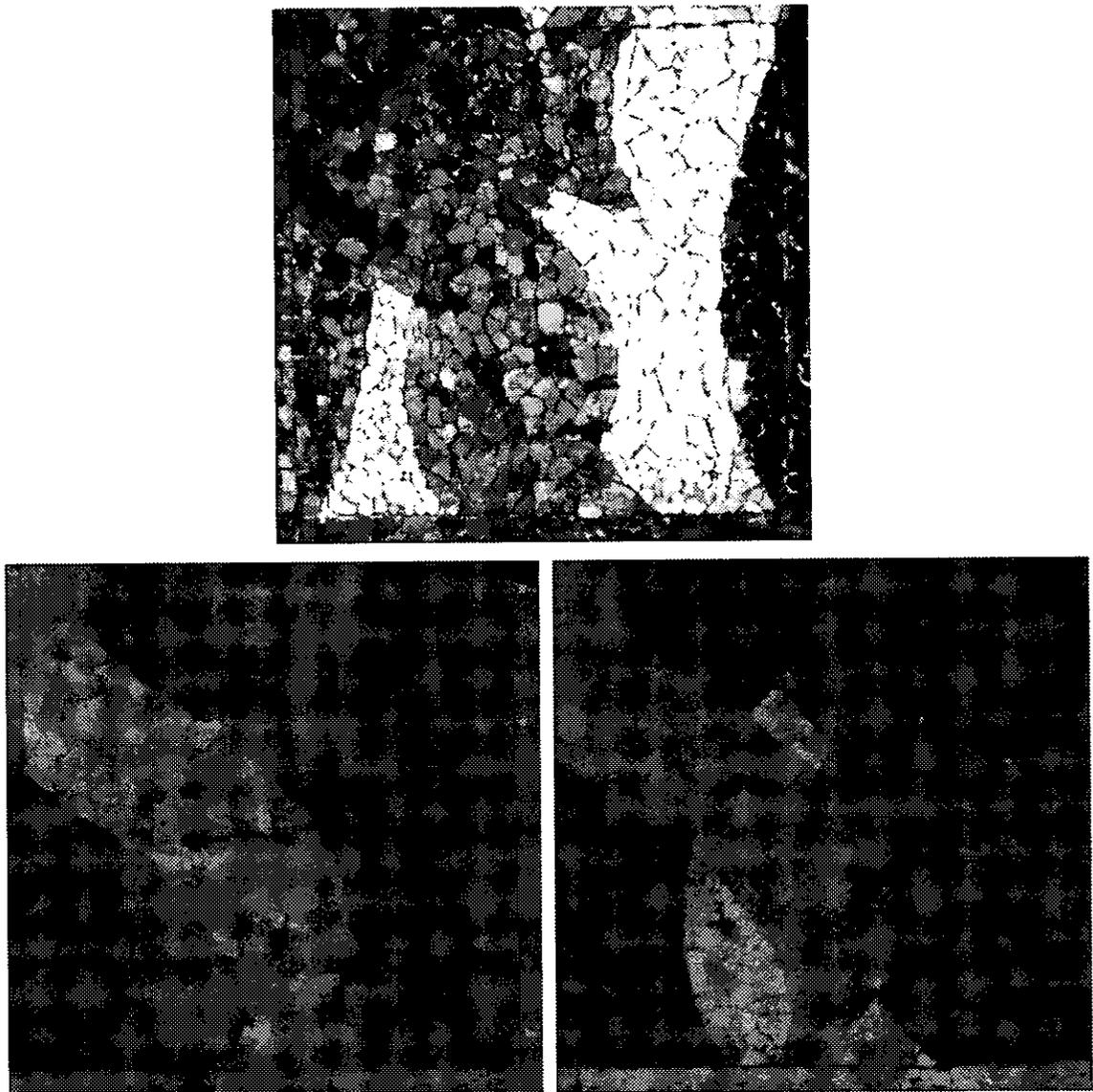


Figura 53. Descomposición de la imagen en los canales C, a y b del modelo CIELab.

La descomposición en tres imágenes de una imagen del color definida en el modelo CIELab permite observar valores de grises que agrupan distintos tipos de piedra (Figura 53), obteniendo los siguientes grupos:

Tabla 2. Grupos de piedras que se pueden distinguir en cada uno de los canales del modelo CIELab.

Light	a	b
gris	amarillo	verde
parte del verde	violeta	violeta
parte del rojo	gris	gris
parte del violeta	parte del rojo	blanco
blanco	parte del rojo	rojo
parte del rojo	verde	amarillo
amarillo	blanco	
parte del violeta		
parte del verde		

Estos grupos permiten aislar el blanco en el canal de Light; el rojo y el amarillo en “b”; y por deducción el verde en “a”. Sin embargo el violeta no logra ser separado del gris y tampoco el pequeño faltante ubicado entre la piedra blanca y la gris ya que tiene un comportamiento idéntico a ésta última.

El modelo RGB

El sistema de colores RGB es el más empleado en cómputo porque corresponde a la forma física con la cual un monitor genera un color y muchos digitalizadores capturan la imagen.

El conjunto de colores RGB queda definido en un sistema cartesiano (Figura 54) donde para cada color, es factible mostrar sus componentes de rojo, verde y azul, como si fueran tres coordenadas X, Y, Z. El valor negro se encuentra en la coordenada (0,0,0) y el blanco en (1,1,1), así que toda la gama de grises se obtiene en la diagonal, con las tres coordenadas del mismo valor.

RGB es considerado como un sistema aditivo de colores en la medida que la suma de dos colores proporciona el color complementario: rojo (1,0,0) más verde (0,1,0) dan amarillo (1,1,0), verde más el azul da el cian etcétera, y la suma de los tres da el blanco.

Este sistema de representación tiene el problema de ser muy abstracto para la mente humana, y no corresponde a nociones intuitivas de mezcla de componentes. Además, no presenta una percepción espacial uniforme (Siggraph, 1993); por ejemplo el verde (0,1,0) es más brillante que el azul (0,0,1). Tampoco tiene la capacidad de representar el universo de los colores.

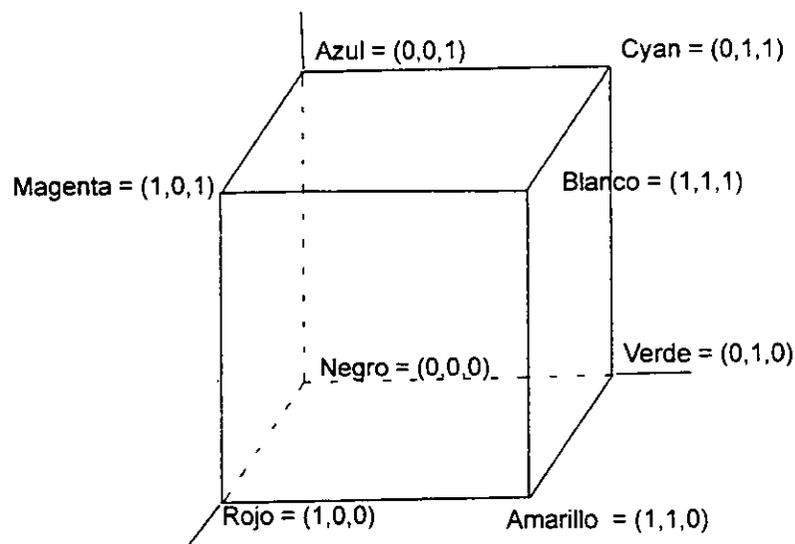


Figura 54. El modelo RGB.

En procesamiento de imágenes, si este esquema puede ser útil para segmentar una imagen, resulta pésimo cuando se busca mejorar sus contrastes ya que al modificar el histograma de cada uno de los canales, se corre el riesgo de modificar el color mismo.

En las imágenes digitales, el rango 0-1 está convertido al rango 0-255 para trabajar con valores enteros optimizando las formas de cálculo de las computadoras. La separación de los tres canales (Figura 55) muestra tonos de grises que agrupan distintos tipos de piedra.

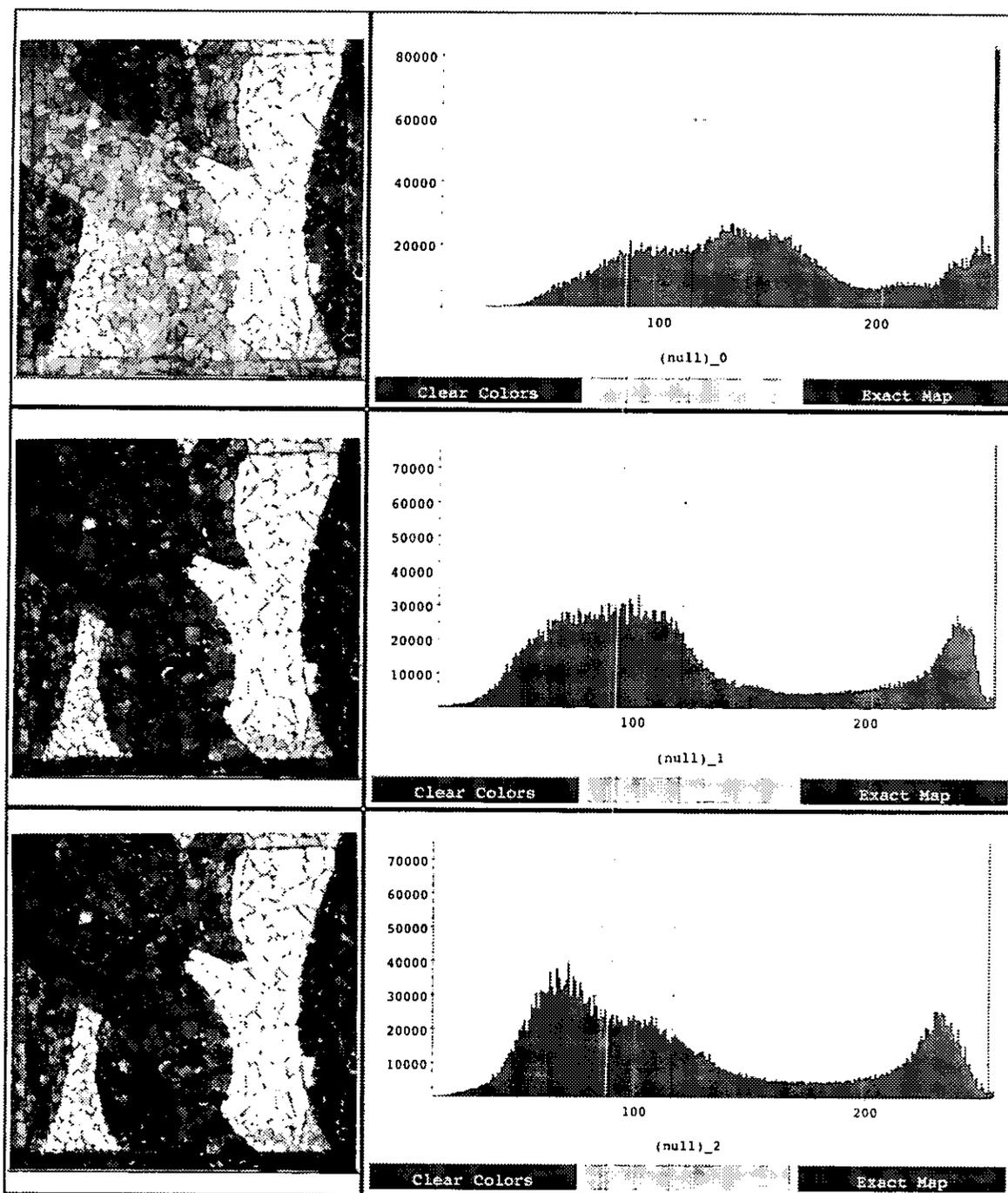


Figura 55. Las imágenes en tonos de grises correspondientes a los canales R, G y B.

Las piedras de color blanco se distinguen sin problema en los tres canales, sin embargo resulta difícil distinguir las verdes de las grises ya que tienen tonos de grises similares en las tres bandas, e igualmente las rojas, amarillas y violetas quedan confundidas.

Tabla 3. Grupos de piedras que se pueden distinguir en cada uno de los canales del modelo RGB.

R	G	B
rojo	amarillo	rojo
amarillo	rojo	amarillo
violeta	gris	violeta
	verde	verde
	violeta	gris
verde	blanco	blanco
gris		
blanco		

El modelo HSV

El modelo matiz (Hue), saturación (S) y valor (V) corresponde a una forma más intuitiva de trabajo. Se entiende por *matiz*, el color o lo que en forma diaria se califica como rojo, azul, etc.; por *saturación* la cantidad de blanco, gris o negro combinado con el color puro, o su pureza relativa; y el *valor* corresponde a la intensidad del gris mezclado con el matiz. Un rosa podría tener como matiz el rojo, como saturación un valor alto si es muy claro y como intensidad la correspondiente al blanco. Ha sido representado en una volumetría cónica (Figura 56) donde las coordenadas son dadas en forma circular (ángulo) para definir el matiz o color (H); en forma vertical, queda representado el tono de gris con el cual el color va a ser mezclado, con el negro abajo y el blanco en la parte superior (V); finalmente la distancia horizontal define la proporción de color en relación al tono de gris correspondiente (S). H corresponde a un ángulo, S y V a distancias en el sistema de coordenadas. KBV asigna cuatro bytes a cada pixel de las imágenes HSV, para cada uno de los canales.

Dado que un solo canal corresponde a la definición del color, este sistema además de intuitivo es bastante empleado en procesamiento de imágenes. Permite cambiar contrastes sin alterar el color.

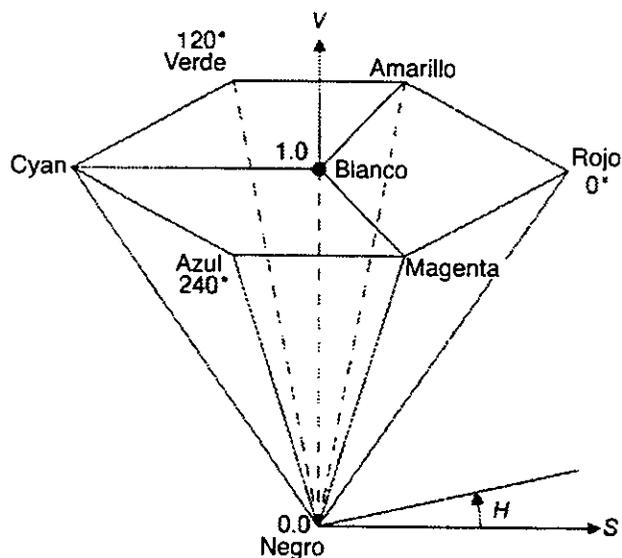


Figura 56. El modelo HSV.

La descomposición de los canales (Figura 57) muestra las siguientes agrupaciones de piedra en tonos de grises parecidos:

Tabla 4. Grupos de piedras que se pueden distinguir en cada uno de los canales del modelo HSV.

H	S	V
violeta	violeta	gris
rojo	verde	violeta
gris	gris	verde
verde	blanco	amarillo
parte del blanco		rojo
amarillo	amarillo	blanco
parte del blanco	parte del rojo	
	parte del rojo	

La piedra de color blanco puede ser aislada en el canal V o en S, por lo tanto mediante la información de H se pueden distinguir las piedra de color verde y amarillo; después, la roja en el V; sin embargo la gris y la violeta se confunden.

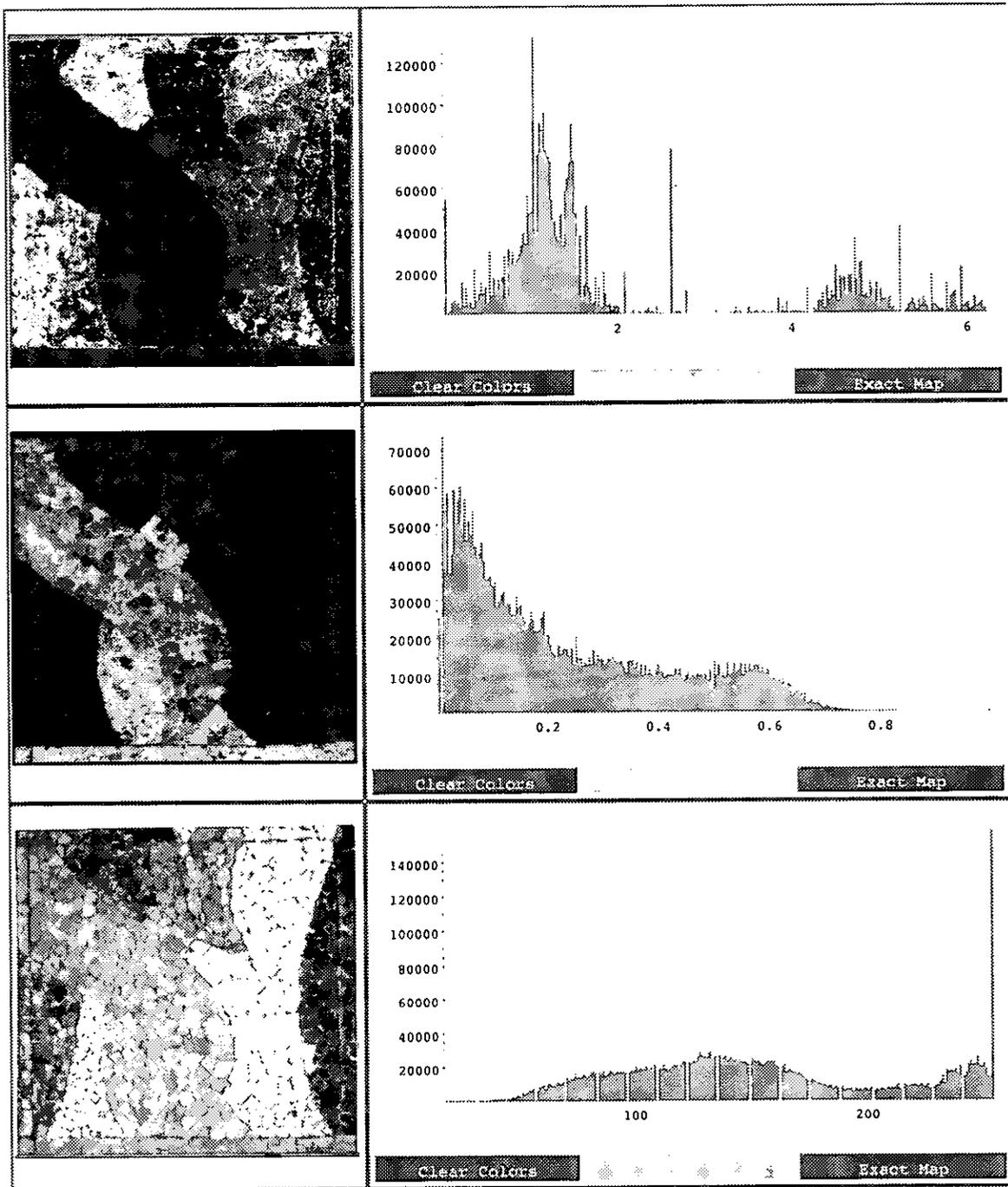


Figura 57. Las imágenes en tonos de grises correspondientes a los canales H, S y V.

CMY y CMYK

CMY es el complemento del sistema RGB. A diferencia de éste, tiene su origen en el blanco, y no en el negro, además los ejes representan las componentes cian, magenta y amarillo (Figura 54). No se acostumbra usarlo para procesamiento de imágenes ya que no aporta una información realmente diferente del RGB.

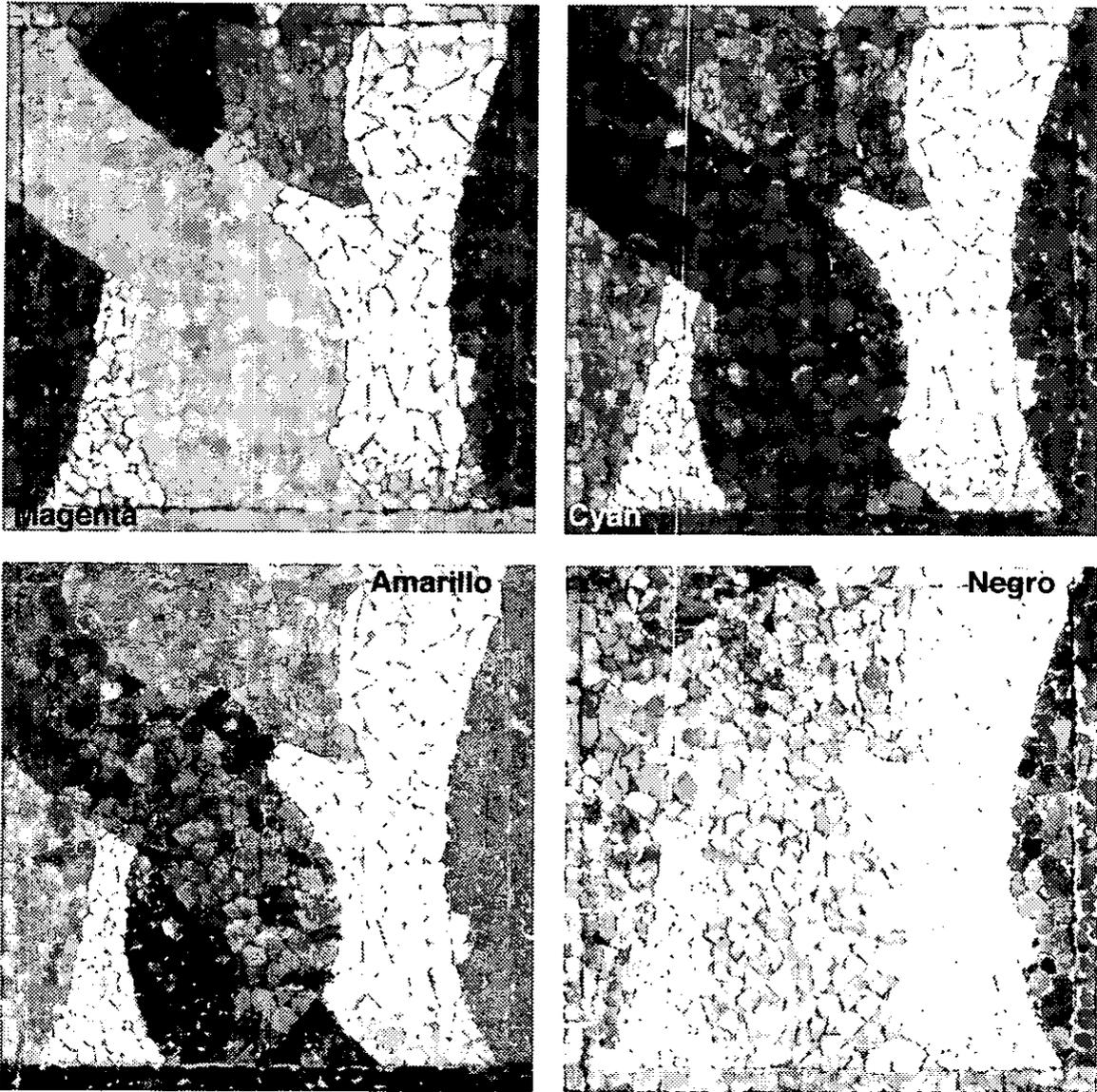


Figura 58. Imágenes en tonos de grises correspondientes a los canales C, M, Y y K.

En imprenta se utiliza un sistema muy parecido, el CMYK correspondiente a una separación por cian (C), magenta (M), amarillo (Y) y negro (K). El negro es empleado en el lugar de los tres colores cian, magenta y amarillo en la misma proporción. Así que $K=\min(C,M,Y)$; $C=C-K$; $M=M-K$ y $Y=Y-K$.

Al no encontrar este modelo en el programa de procesamiento de imágenes, se recurrió a PhotoShop para separar los diferentes canales (Figura 58).

Se observa que las distintas piedras quedan agrupadas de la siguiente forma:

Tabla 5. Grupos de piedras que se pueden distinguir en cada uno de los canales del modelo CMYK.

Cyan	Magenta	Amarillo	Negro
amarillo	amarillo	verde	parte del verde
rojo	rojo	violeta	violeta
	verde	gris	rojo
	violeta		amarillo
	gris		
	parte del rojo		
violeta	blanco	blanco	blanco
verde	rojo oscuro	amarillo	gris
gris			parte del verde
blanco		rojo	

Aun cuando este esquema permite separar las zonas de piedras blancas, violeta, amarillo y rojo; la gris se confunde con la verde.

El esquema Excess RGB (KBV)

Este esquema de colores manejados por el programa KBV no es común, sin embargo se analizaron las imágenes obtenidas para evaluar la conveniencia de trabajar con éste, en el caso de que facilitará distinguir más claramente la información buscada. Cada pixel requiere de dos bytes para su definición. Cada canal está calculado multiplicándolo por 2 su equivalente en RGB y restándole los valores de los demás canales. Así:

Excess Red= 2R-G-B; Excess Green= 2G-R-B y Excess Blue= 2B-R-G

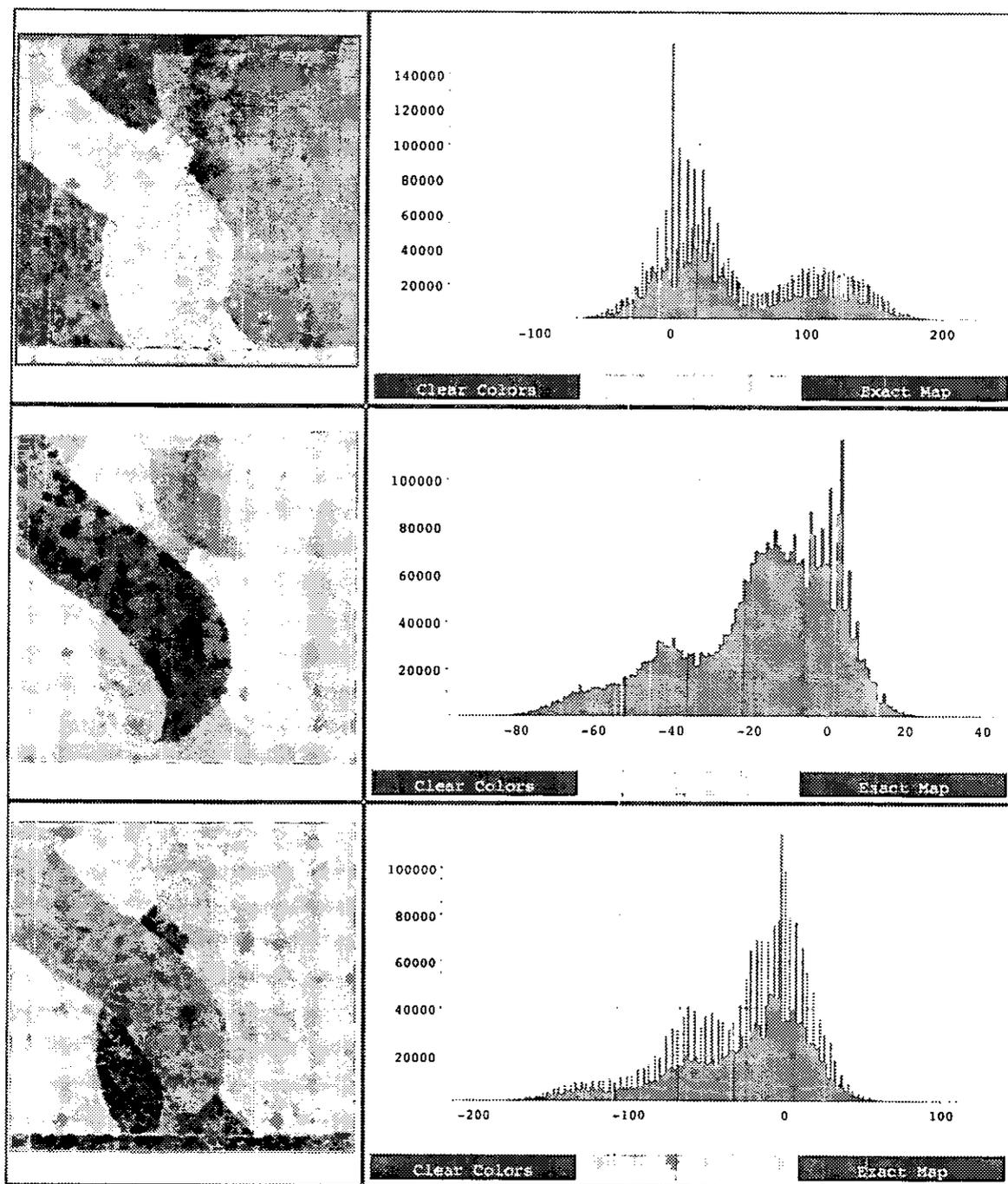


Figura 59. Imágenes en tonos de grises de los canales correspondientes a XR, XG y XB.

Si un pixel representa por ejemplo un rojo puro o sea (255,0,0) el valor obtenido es de (510,-255,-255); en el caso de que fuera atenuado con las demás componentes (255,50,50) logramos (410,-205,-205); y si es un gris (75,75,75) conseguimos (0,0,0). El color dominante presenta en su canal correspondiente un valor positivo, mientras que en los otros canales es negativo o igual a cero. Los grises son nulos.

La separación de los diferentes canales muestra como cada uno permite distinguir ciertas piedras (Figura 59).

Tabla 6. Grupos de piedras que se pueden distinguir en cada uno de los canales del modelo Excess RGB.

Xred	Xgreen	Xblue
amarillo	blanco	blanco
rojo	verde	violeta
		verde
		gris
verde	violeta	rojo
blanco		
violeta	rojo	amarillo
gris		
	amarillo	
	gris	

Solamente se pueden separar el rojo, el amarillo, el gris, el violeta y quedan mezclados el verde con el blanco.

El esquema RGB normalizado

De la misma forma se puede normalizar la información de un canal, dividiéndolo por la suma de los tres canales (Figura 60). Cada pixel requiere de cuatro bytes.

$$\text{Rojo normalizado} = R/\text{Max}(1,R+G+B)$$

$$\text{Verde normalizado} = G/\text{Max}(1,R+G+B)$$

$$\text{Azul normalizado} = B/\text{Max}(1,R+G+B)$$

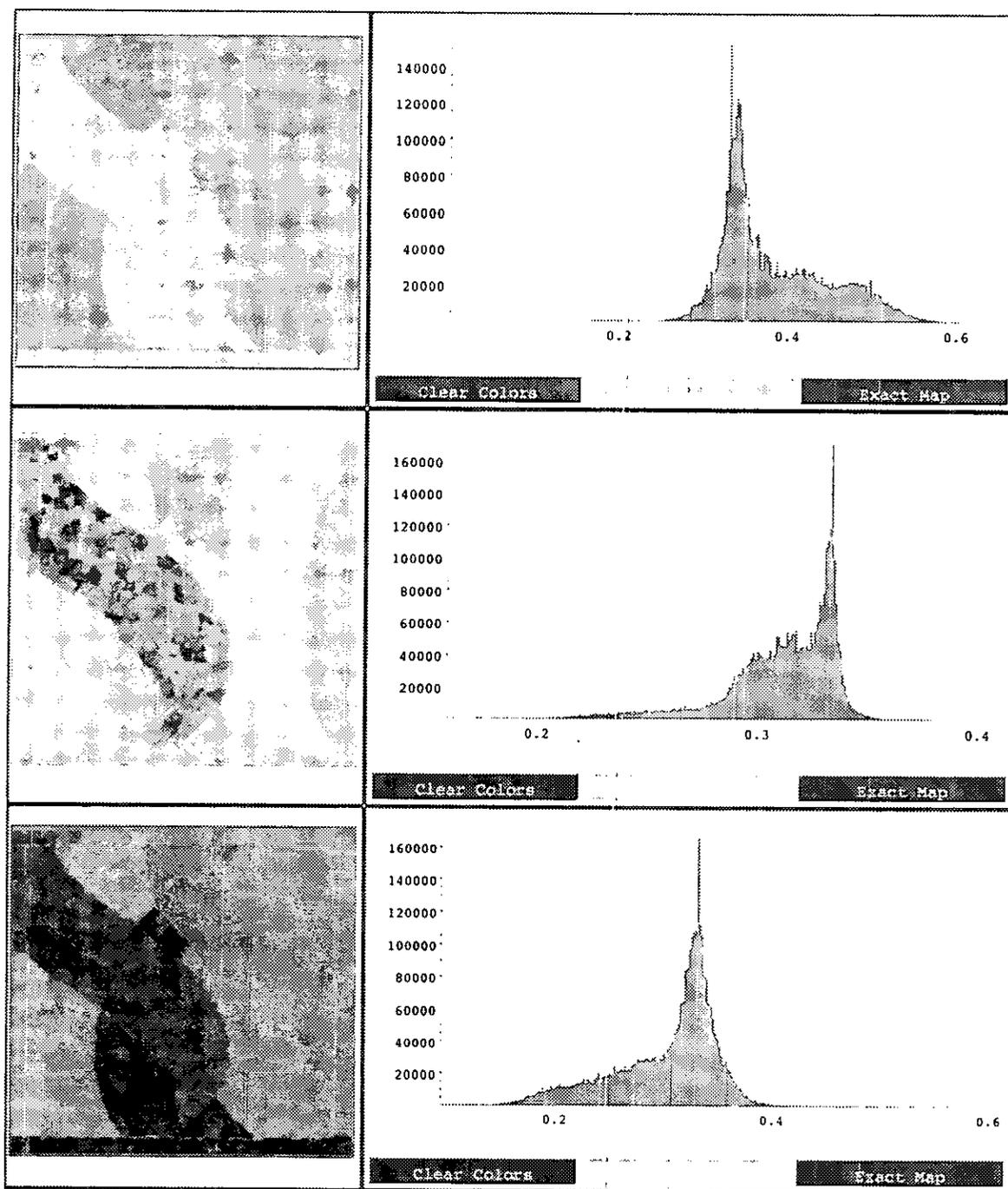


Figura 60. Imágenes en tonos de grises de los canales correspondientes al modelo RGB normalizado.

Tabla 7. Grupos de piedras que se pueden distinguir en cada uno de los canales del modelo RGB normalizado.

NRed	NGreen	NBlue
violeta	parte del rojo	blanco
gris	gris	gris
	violeta	violeta verde
amarillo	amarillo	amarillo
rojo	verde	
verde	blanco	rojo
blanco		
	parte del rojo	

En el esquema de normalización de colores se pueden aislar el rojo y el amarillo a partir del canal NBlue, el blanco desde el canal Ngreen y por deducción el verde, sin embargo las piedras violeta y gris tienen grises similares en los tres canales y no podrán ser distinguidas una de la otra.

El esquema YIQ

Es el esquema empleado por la televisión para una retransmisión más eficiente, cumple a la vez con las necesidades de las televisiones monocromáticas y las de color. En el programa KBV, utilizado para el desarrollo de este proyecto, se requieren de dos bytes para representar cada pixel en los diferentes canales YIQ.

El modelo fue diseñado retomando principios de la visión humana, resulta más sensible a los cambios de luminancia, que de matiz o de saturación (González et al, 1992). La luminancia(Y), que corresponde a la luminancia definida por el sistema CIE, se calcula de la siguiente forma en relación al sistema RGB:

$$Y = (R * 0.299) + (G * 0.587) + (B * 0.114)$$

Esta ecuación permite saber si dos colores podrán tener un grado de contraste suficiente, por ejemplo el verde (0,1,0) tiene un grado de luminancia de 0.59 mientras que el naranja

(1,0.5,0) lo tiene de 0.60, por lo tanto no hay casi contraste entre estos dos colores. De la misma forma el azul (0,0,1) y el negro (0,0,0) tienen una diferencia de luminancia de 11%, así como el verde y el cyan.

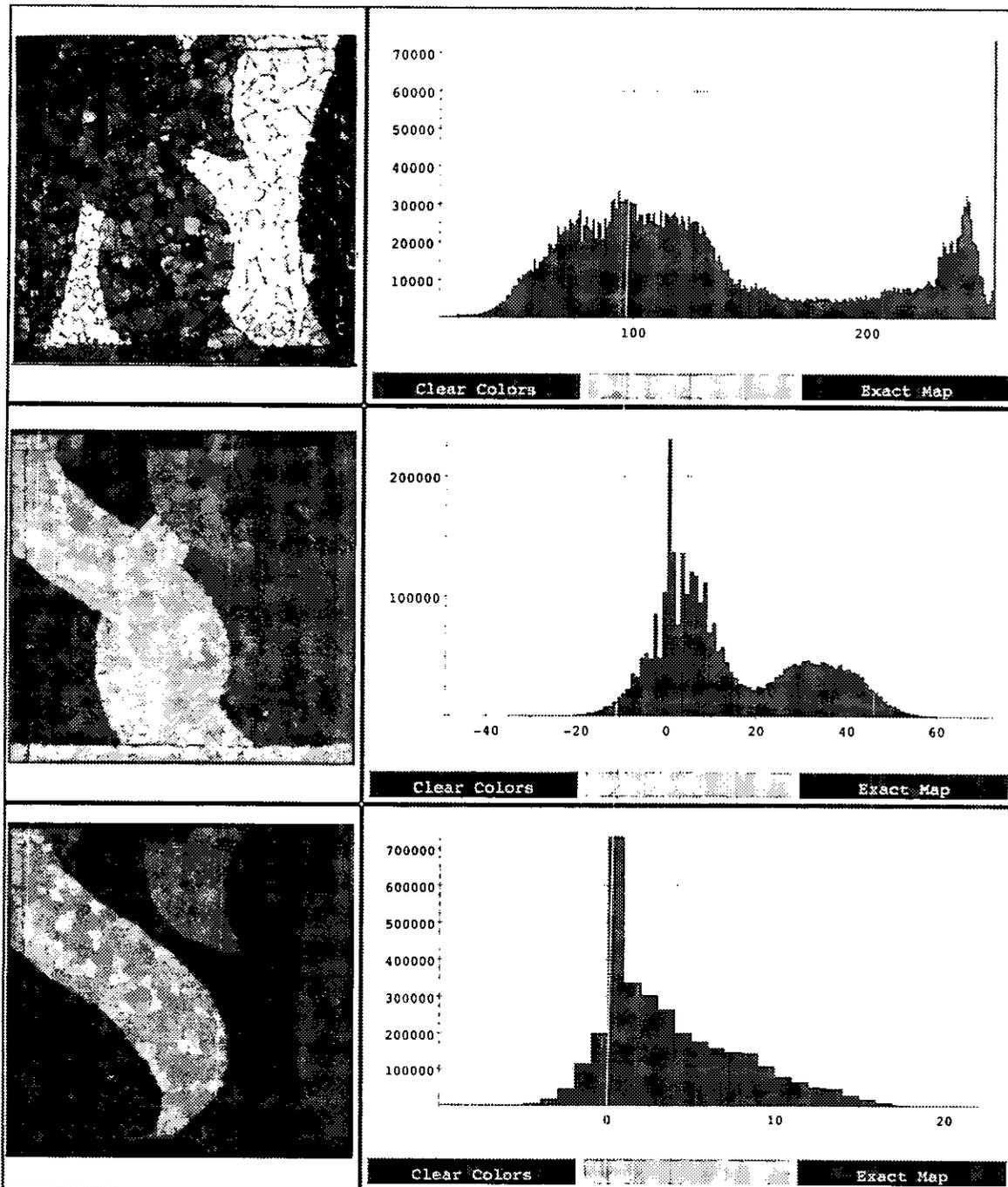


Figura 61. Imágenes en tonos de grises de los canales del modelo YIQ.

Los demás canales se calculan de la siguiente manera:

$$I = (R * 0.596) - (G * 0.275) - (B * 0.321)$$

$$Q = (R * 0.212) - (G * 0.528) + (B * 0.311)$$

Para el procesamiento de imágenes, la división YIQ, presenta la ventaja de dividir lo que corresponde a la luminosidad general de la información (Y) (o la cantidad de luz percibida por el ojo) de lo que se relaciona con la definición del color (I y Q). Así, es factible modificar contrastes, hacer más o menos oscura una imagen, sin afectar su color.

La observación de las tres imágenes correspondientes a los tres canales Y, I y Q, (Figura 61) permite ver que las piedras, según sus características quedan agrupadas de la siguiente forma:

Tabla 8. Grupos de piedras que se pueden distinguir en cada uno de los canales del modelo YIQ

Y	I	Q
amarillo	rojo	amarillo
violeta	amarillo	blanco
parte del rojo		verde
blanco	violeta	violeta
	gris	gris
verde	blanco	rojo
gris	verde	
parte del rojo		

A partir de la información del canal Y, es posible aislar las zonas de piedras de color blanco; en el Q, las de color rojo; la intersección de I y Y proporcionan las zonas de verde; y la intersección de I y Q la zona de piedra amarilla; finalmente en el Y, después de quitar las piedras previamente aisladas, se pueden separar las zonas violeta y gris. De esta forma se comprueba que se llegan a distinguir cada una de las piedras.

Por otra parte, es en las imágenes RGB, V de HSV, y Y de YIQ que se perciben con más definición las aristas de las piedras y sus intersticios; finalmente si se observa el faltante ubicado entre la piedra blanca y la gris, en la mayoría de los esquemas se asimila a la piedra blanca y solamente en el XGreen y el Q de YIQ esta parte tiene un comportamiento distinto.

El análisis muestra que YIQ es el esquema más adecuado para aislar las piedras por tipo combinando los tres canales, ya que cada uno permite aislar distintas zonas; con el solo canal Y se tiene la información relativa a los contornos de piedra y además, la zona de faltante tiene un comportamiento que permite distinguirla de la piedra blanco o negra.

Estudio comparativo entre los esquemas de representación del color

Para corroborar lo anterior, se efectuó un estudio comparativo de cómo quedarían representados en los esquemas RGB, Intensidad, HSV, Excess RGB, Normalized RGB y YIQ los colores primarios rojo, verde, azul, amarillo, cyan y magenta y una gama de grises del blanco al negro.

Tabla 9. Tabla comparativa de los valores de colores primarios en distintos esquemas.

Color	R	G	B	I	H	S	V	XR	XG	XB	Y	I	Q	NR	NG	NB
rojo	255	0	0	85	1.0472	1	255	510	-255	-255	76	153	53	1	0	0
verde	0	255	0	85	3.1415	1	255	-255	510	-255	150	-70	-132	0	1	0
azul	0	0	255	85	5.2359	1	255	-255	-255	510	28	-81	79	0	0	1
amarillo	255	255	0	170	2.0943	1	255	255	255	-510	226	81	-79	0.5	0.5	0
cyan	0	255	255	170	4.1887	1	255	-510	255	255	178	-153	-53	0	0.5	0.5
magenta	255	0	255	170	0	1	255	255	-510	255	104	71	132	0.5	0	0.5
blanco	255	255	255	255	0	0	255	0	0	0	255	0	0	0.333	0.333	0.333
gris claro	155	155	155	155	0	0	155	0	0	0	155	0	0	0.333	0.333	0.333
gris medio	55	55	55	55	0	0	55	0	0	0	54	0	0	0.333	0.333	0.333
negro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Se puede notar que los esquemas *Excess* y *Normalized* son muy deficientes para mostrar diferencias de tonos de grises.

Si se decidiera escoger un solo canal para obtener información sobre el color, sin duda, el Y es el más indicado, pues ningún otro es capaz de hacer una distinción completa de los diferentes colores y tonos de grises. De esta forma, para trabajar imágenes a color, el esquema YIQ parece ser el más adecuado.

Corrección de la iluminación

Como se ha mencionado al decidir las características de la toma de las imágenes, para poder llevar a cabo la corrección de iluminación de una imagen es necesario fotografiar una hoja de color uniforme ubicada sobre el mural, con objeto de “mapear” la iluminación. Existen otros métodos que no requieren de esta imagen adicional. Por ejemplo en el caso de la fotografía de una hoja de texto, la falta de uniformidad de la iluminación podría ser compensada porque existe un color de fondo de referencia. Sin embargo, en el caso del mural, es un requisito indispensable.



Figura 62. Imagen después de la corrección de iluminación.

Sabemos que la imagen de grises debería presentar el mismo valor en cada uno de sus píxeles si la iluminación fuera pareja, así, la diferencia en el valor de grises indica en qué

proporción un pixel recibe demasiado o insuficiente luz. Al sumar a la imagen del mural, la inversa de la imagen de los tonos de grises, se recuperan los errores debidos a la falta de iluminación uniforme.

La dos imágenes recibieron un tratamiento previo con un filtro gaussiano para suavizar las diferencias entre pixeles vecinos, obteniendo así desvanecidos de grises más uniformes. Dado que el esquema YIQ seleccionado para el trabajo separa la información relativa a los colores (canales I y Q) de los datos generales de iluminación (Y), el algoritmo fue aplicado solamente sobre el canal Y.

La comparación entre la imagen sin corrección (Figura 41) y la resultante después del proceso (Figura 62), hace particularmente visible un cambio en las tonalidades de grises de la piedra blanca que aparece con mayor uniformidad. Aunque el proceso fue aplicado en toda la imagen, por el gris oscuro que presentan las demás zonas, el efecto es menos notable.

Corrección de la distorsión debida a la lente

Para corregir la aberración de la lente, se dibujó y fotografió una retícula regular (Figura 44). Se calculó la coordenada de cada una de las intersecciones de la retícula y la distancia en X y en Y de los puntos. En un caso de no distorsión, estas distancias deberían ser siempre idénticas.

Las distancias entre las intersecciones varían en el conjunto de la imagen de 202 a 214 pixeles, lo cual corresponde a una variación de 5%. Si se observa la distribución de la variación, aparece que aumenta en forma lineal de la izquierda hacia la derecha, y que este fenómeno corresponde más a una falta de paralelismo entre el plano fotografiado y el plano de la película fotográfica. Por otra parte, pequeñas variaciones de uno ó dos pixeles pueden resultar de ambigüedades al momento de la lectura de las coordenadas.

De este modo, con el equipo utilizado, el proceso toma "fotográfica-digitalización" no genera una distorsión significativa y por lo tanto, no requiere de corrección. En general se sabe que las lentes de 50 mm, sobre todo de marcas reconocidas por la calidad de su óptica, no causan

mucha aberración, mientras que los gran angulares sí distorsionan mucho. Comprobarlo era importante, dado que es parte de la secuencia de los posibles factores que intervienen en todo el proceso.

Corrección de la distorsión perspectiva, rotación y cambio de escala

Aun cuando la toma se efectúa con extremo cuidado, es imposible asegurar un paralelismo perfecto entre la cámara y el mural, sobre todo por las condiciones incómodas en las cuales se realiza, en ese sentido, es importante corregir este error.

La información disponible detalla una imagen con distorsión (la imagen inicial), y se desea corregirla para obtener una imagen que corresponda a una proyección exacta de la información del mural (la imagen final). Para ello, se calcula el modelo de la transformación utilizando coordenadas conocidas en ambas imágenes y se aplica la transformación inversa para calcular cada uno de los pixeles de la imagen final. “La transformación geométrica consiste en dos operaciones básicas: (1) una transformación espacial que define el “reordenamiento” de los pixeles en el plano de la imagen; y (2) una interpolación de niveles de grises que consiste en la asignación de niveles de grises a los pixeles de la imagen transformada espacialmente.” (González, 1992).

El principio general de recuperación de distorsión implica conocer cuatro coordenadas iniciales (en la imagen digitalizada que presenta deformación) y las coordenadas de estos cuatro puntos en la imagen corregida. Los pasos del proceso son:

- Definir las coordenadas iniciales y las finales. En este caso se utiliza el marco que fue aplicado sobre la fachada al momento de la toma de las imágenes. Se registra la coordenada de cada una de sus esquinas y se especifica que las coordenadas finales son (0,0), (1100,0), (0,1100) y (1100,1100) para las esquinas inferior-izquierda, inferior-derecha, superior-izquierda y superior-derecha respectivamente pues se escogió una escala de 1 pixel = 1mm.

- Con estos datos se puede resolver la ecuación que corresponde a la numerización del efecto de distorsión buscando los valores a, b, c, y d para el desplazamiento en X y para el desplazamiento en Y, los valores e, f, g, h. Se sabe entonces que un pixel de la imagen final ubicado en la coordenada (x,y) corresponde al pixel colocado en la coordenada (ax+by+cxy+d, ex+fy+gxy+h) de la imagen inicial (George Wolberg, 1964).
- Generalmente el valor encontrado para las coordenadas del pixel en la imagen inicial, no es un entero; lo cual significa que se encuentra entre varios pixeles por lo que es necesario extrapolar los valores de los pixeles más cercanos en la imagen inicial para encontrar el valor del pixel en la imagen corregida. Las formas más usuales de extrapolación son:
 - Tomar el **valor del pixel más cercano**, es decir para el eje X, el de la izquierda si su valor decimal es inferior a 0.5, sino el valor del pixel ubicado a la derecha; para el eje Y, el de abajo si su valor decimal es inferior a 0.5 y el de arriba en el caso contrario.
 - Realizar una **interpolación bilineal**, que consiste en tomar el peso relativo de los cuatro pixeles que rodean la coordenada encontrada.
 - Efectuar una **interpolación cúbica**, donde se toman en cuenta el peso relativo de los 16 pixeles que rodean la coordenada encontrada.

La primera solución es la más rápida ya que implica pocos cálculos, sin embargo no es tan precisa como las dos últimas.

La imagen obtenida no presenta las partes periféricas del marco debido a que se definió que la imagen creada midiera 1100 x 1100 pixeles; se dió a la esquina inferior derecha del marco la coordenada (0,0) en la nueva imagen y a la superior derecha la coordenada (1100,1100). Adicionalmente, los bordes del marco sirvieron de referencia para definir los ejes verticales y horizontales del alineamiento de la imagen dándole un efecto de rotación. Finalmente, se aplicó un escalamiento de 1 pixel = 1 mm, al decidir que el borde del marco de 1.10 m quede representado por 1100 pixeles.

El algoritmo empleado para la recuperación de la distorsión de una lente es el mismo que para la recuperación del efecto de perspectiva salvo que en vez de ser definido con cuatro puntos, debe ser aplicado para cada uno de las esquinas de referencia de la retícula.

Rotación y translación de imágenes

Después de los métodos de escalamiento y recuperación de distorsión por la lente y la perspectiva, se cuenta con representaciones fieles y a escala de una porción del mural. Sin embargo, si se desea comparar dos imágenes tomadas en tiempos diferentes es imposible que coincidan. En la práctica no se puede asegurar que las tomas sean perfectamente horizontales y que la cámara esté siempre en la misma ubicación en relación con la placa del mural. Esto resulta en dos imágenes que no se puedan superponer por tener un doble efecto de traslación vertical y/o horizontal y un efecto de rotación en relación al eje cámara-mural. Esta falta de correlación puede ser corregida con una transformación afine la cual, aplicada a la imagen, puede realizar las transformaciones de traslación, rotación y cambio de escala. Para calcular la matriz afine, se requiere conocer las coordenadas de un mínimo de tres puntos en una imagen y de los mismos puntos en la otra imagen. Al tener más puntos el cálculo de la transformada es más preciso. De la misma forma que para el "mapeo" de corrección de distorsión, se puede calcular el pixel resultante al usar el pixel más cercano de la imagen inicial o mediante una interpolación lineal o cúbica.

Extracción de información

Una vez que se cuenta con un registro preciso del mural en forma digital, es factible extraer información y realizar cálculos. En algunos casos se obtiene una información que no se podría conseguir sin los sistemas de cómputo, por ejemplo la superficie cubierta por cada tipo de piedra. En otros casos, por la amplitud del mural, hacerlo manualmente representaría un tedioso trabajo, eso sería por ejemplo el caso si se quisiera saber cuántas placas tienen varillas expuestas y a qué fachada corresponden.

La búsqueda de un tipo de información específica implica el desarrollo de una serie de algoritmos *ad hoc*. Por ejemplo, pueden existir preguntas en torno al nivel de las superficies de color, sin que importe el contorno de las piedras. El enfoque sería muy distinto para encontrar las varillas desnudas; o solamente para conocer la superficie de piedras faltantes.

A continuación se desarrolla un ejemplo de uso de las imágenes digitales. Se trata de conocer la superficie cubierta por cada tipo de piedras, en una placa del mural. El interés en este tipo de información puede residir en la necesidad de cuantificar el impacto de la aplicación de un producto químico a un cierto tipo de piedra, o conocer la cantidad de piedra a conseguir cuando se trata de reemplazarla, como fue el caso de la piedra verde.

Se trata entonces, primero de distinguir una de la otra, las zonas cubiertas por las piedras azul, ocre, gris oscuro, verde oscuro y claro, rosa, roja, rosa violeta, gris violáceo, negra o blanca para posteriormente, calcular la superficie que cada una cubre.

La dificultad de esta separación se encuentra en el hecho que:

- Las zonas no están claramente definidas en los distintos canales (Figura 61. Imágenes en tonos de grises de los canales del modelo YIQ)
- En una misma zona existe una importante variación de colores, como se puede notar en la piedra roja.
- Existen una serie de elementos visuales, como las aristas entre piedras, que no son de interés para esta fragmentación, y por lo tanto deben ser eliminados durante el proceso.

Tratamiento previo

Antes de aplicar algoritmos para la separación de la imagen en zonas, se afectuaron varios procesos.

- El primero consistió en convertir la escala de valores de los tres canales al rango 0-255 para eliminar los valores negativos de los canales I y Q que abarcan respectivamente el rango -28,61 y -12,18. Cada imagen queda definida con un solo byte en vez de dos, y

corresponde a un archivo más pequeño situación que conlleva cálculos más rápidos. Algunas rutinas tienen además la característica de ser aplicables solamente a imágenes definidas con valores positivos en el rango 0-255.

- El segundo paso consistió en una reducción de la imagen a su cuarta parte, es decir que de 1100 x 1100 pixeles, las imágenes fueron convertidas a 550 x 550 pixeles. Al trabajar con una imagen más pequeña, los cálculos son más rápidos y dado que las zonas buscadas son anchas, la pérdida de información no es significativa. Adicionalmente, existen casos como éste, donde demasiada información resulta un inconveniente pues aporta detalles que estorban y generan basura difícil de eliminar.
- Finalmente, se hizo más lisa la imagen al eliminar ruidos o pixeles que en forma aislada presentan valores muy distintos de los valores de los pixeles que los rodean. Para este objetivo, cuando no se quiere perder nitidez, las rutinas más empleadas son las de:
 - *Median*, consiste en clasificar por orden ascendente el valor de los pixeles de una zona cuadrada, buscar el valor central de la serie de números encontrados y atribuir este valor al pixel central. El cálculo se repite para cada pixel. Esta técnica tiene la característica de que el valor final del pixel no queda influenciado por los pixeles extremos. La imagen no pierde tampoco contrastes.
 - *Mode*, para cada pixel se busca en su vecindad el valor de pixel más común.

Se escogió el primer método por razones de velocidad y porque mientras que éste solamente elimina el ruido, el otro reduce la cantidad de información.

Segmentación

La segmentación de una imagen, consiste en dividirla en las zonas de interés que corresponden a los objetos que conforman la información deseada para conservar solamente ésta. Si se desea trabajar información sobre las piedras del mural, segmentar la imagen consiste en reconocer cada piedra, por su contorno o por su superficie. Si la información buscada es en

relación con zonas de piedras, se realizará una segmentación para obtener el contorno de las zonas que se relacionan con un cierto tipo de piedras. Si se quiere conocer la deformación de las placas, se buscará conservar el contorno de las placas. Esta fase es indispensable para el desarrollo de análisis.

Existen múltiples técnicas para segmentar una imagen, es decir extraer de ésta los distintos objetos que la componen para poder efectuar operaciones que proporcionan información.

Uno de los principales problemas en la segmentación es llegar a una representación exacta, utilizando algoritmos que no proporcionan sobre o subsegmentación, ajustando las variables involucradas en el cálculo. En la sobresegmentación, se obtiene una imagen dividida en más partes que la deseada, mientras que en la subsegmentación se logran menos divisiones de la imagen generalmente perdiendo datos. En ambos casos, es posible aplicar procesos hasta llegar a una adecuada separación de la información.

Las dos grandes técnicas de segmentación están basadas en la detección de aristas y contornos o en la detección de zonas.

Una arista es un límite entre dos zonas y se define como un cambio en las tonalidades de grises, en ese sentido, es una discontinuidad. A pesar de su sencillez, la información que se puede detectar así, es en muchos casos perturbada por sombras, ruidos y falta de uniformidad en el color de fondo. Todos estos elementos añaden información innecesaria o esconden otra que podría ser valiosa. Adicionalmente se obtienen contornos que generalmente no son cerrados, por lo que es necesario, en una segunda fase, aplicar algoritmos para cerrar las zonas si es necesario realizar cálculos sobre cada superficie. Esta fase es compleja y no siempre posible.

La segmentación por zonas está basada en la similitud de los valores de los píxeles y recurre al uso del umbral, crecimiento de zonas, división de zonas y agrupación de zonas.

Para ir conformando las zonas que corresponden a los distintos tipos de piedras del mural, se decidió aplicar la técnica del umbral. Consiste en separar los objetos basándose sobre su tonalidad de gris. En un caso extremo, si los objetos son negros y el fondo blanco, la separación en dos zonas no presenta problemas. En términos generales, si cada objeto tiene un rango

característico de grises, esto se refleja en el histograma. Éste mostraría picos bien separados con profundos valles entre estos. Así, la segmentación podría ser realizada al utilizar los rangos visibles en el histograma. Sin embargo, en la mayoría de los casos, los tonos de grises que componen un objeto se extienden sobre una amplia franja del histograma y se mezclan con los tonos de varios objetos. Es lo que pasa cuando el histograma tiene ondulaciones, sin llegar a poseer valles marcados entre los picos.

El histograma de los canales Y e I muestra dos zonas cada uno y el del Q una sola (Figura 61). En el caso de este último es sorprendente, ya que se distinguen claramente varias zonas en la imagen.

La técnica de segmentación por umbral puede ser mejorada incorporando elementos estadísticos para, en caso de ambigüedad, poder escoger a cual de los grupos bien definidos pertenece un píxel. En vez de calcular el umbral general de la imagen, se valora en forma local incorporando la información de la media y de la desviación estandar. (Garza-Jinich M. *et al*, 1996)

Se recurrió a cálculos locales para distinguir varios valores de umbrales. La rutina empleada busca los valores de umbral que proporcionan un máximo de contraste. Es una rutina que puede ser aplicada en forma recursiva, en su primer paso define un valor de umbral, en un segundo dos valores, en un tercero hasta cuatro y así sucesivamente. El usuario puede especificar cuántas veces se correrá el proceso y cuál es el valor mínimo de contraste.

Sobre la base de los valores encontrados en cada uno de los tres canales, se aplicaron operaciones lógicas para separar las diferentes zonas de color, para ello se usaron intersecciones entre las tres imágenes.

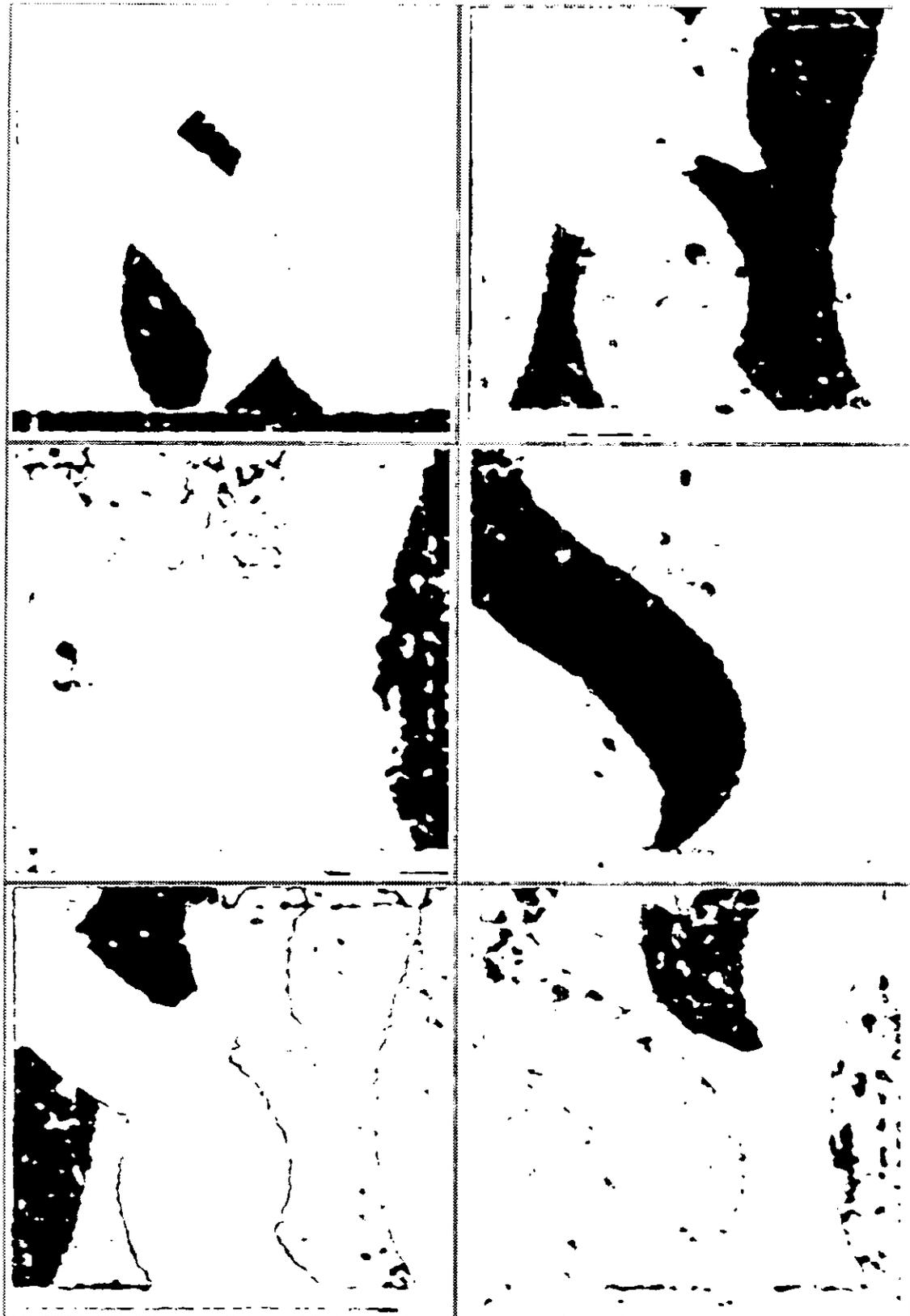


Figura 63. Separación por zonas utilizando intersecciones de imágenes.

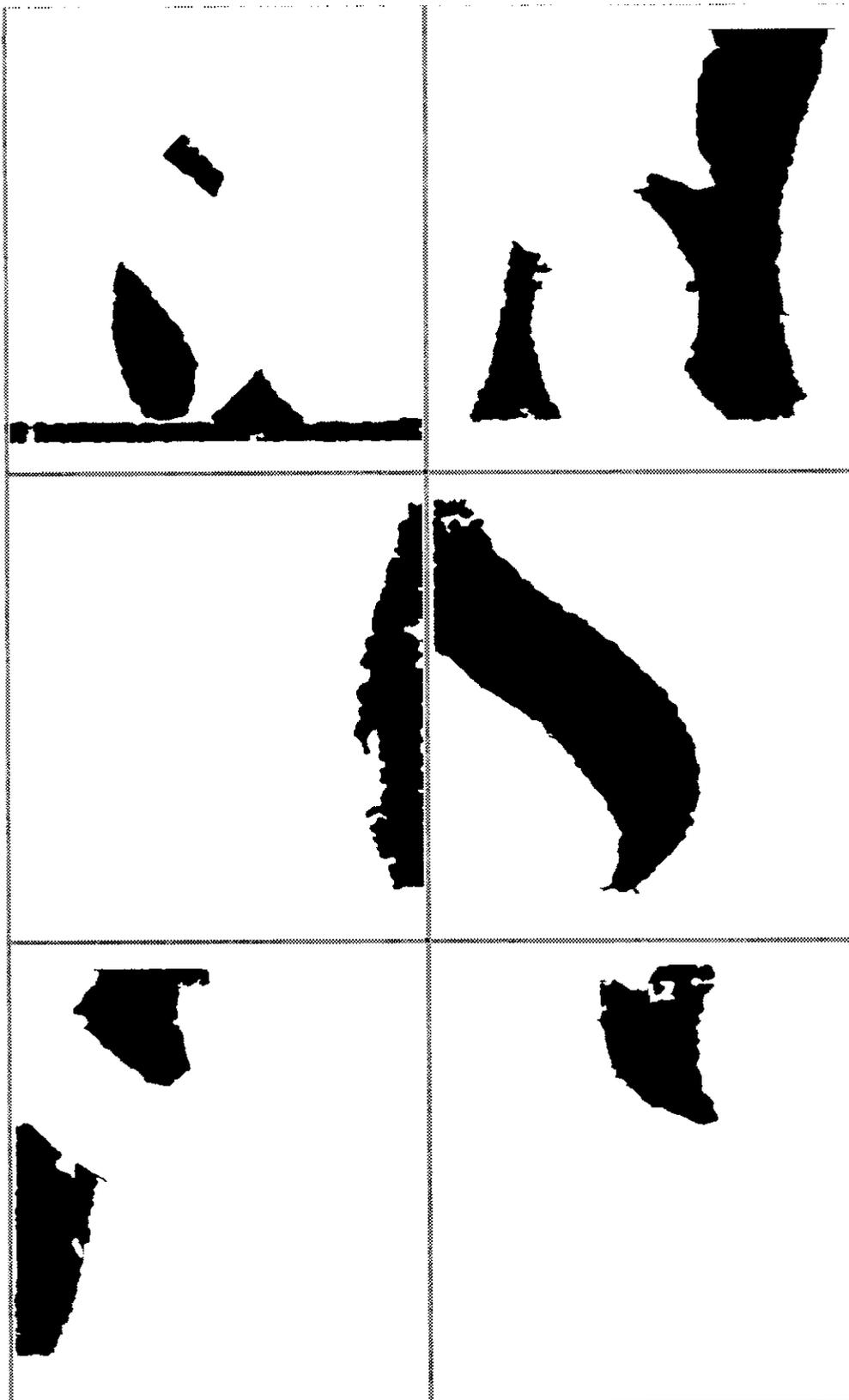


Figura 64. Eliminación de pequeñas zonas.

Tabla 10. Características de las piedras.

Piedra	Característica
blanca	$Y \geq 139$ and $Q < 2$
amarilla	$I \geq 101$ and $Q < 2$
roja	$Q \geq 2$ and $I \geq 115$
verde	$I < 80$ and $Y < 123$
negra	$80 < I < 101$ and $Y < 66$
violeta	$Y > 66$ and $35 < I < 127$ and $Q \geq 2$

La separación obtenida, no es perfecta, se pueden observar agujeros en zonas de color, y manchas en las regiones complementarias (Figura 63). Es un caso de sobresegmentación y se requiere limpiar esta basura.

Para rellenar los primeros y eliminar los segundos, se escogió pasar a un nivel de trabajo distinto del pixel. De hecho, ya que se tienen las primeras zonas, conviene por razones de facilidad y tiempo, trabajar a un nivel más abstracto utilizando las ventajas del manejo de la información de la imagen mediante una base de datos. El descriptor de una zona entra como un registro de la base de datos, a la que se puede añadir una serie de campos que representan el cálculo de características de estas zonas como su promedio de tonos de grises. Esta representación facilita el paso de comparar zonas para procesos ulteriores.

Las zonas con una superficie inferior a 3x3 cm fueron eliminadas y los agujeros fueron rellenados (Figura 64).

Finalmente las zonas correspondientes a cada color fueron agrupadas en un solo archivo (Figura 65, Figura 66 Figura 67).

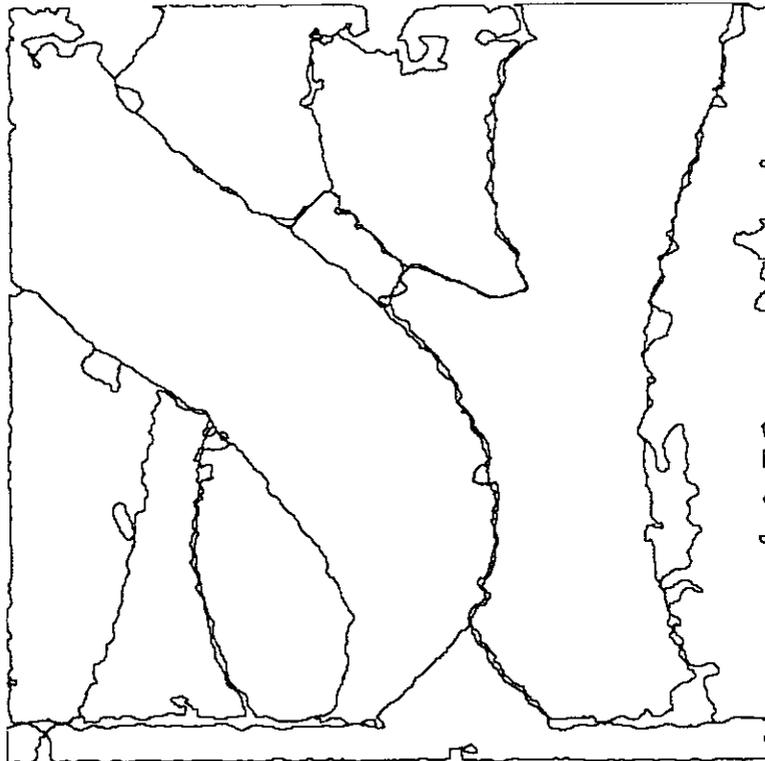


Figura 65. Contornos de las distintas zonas encontradas.

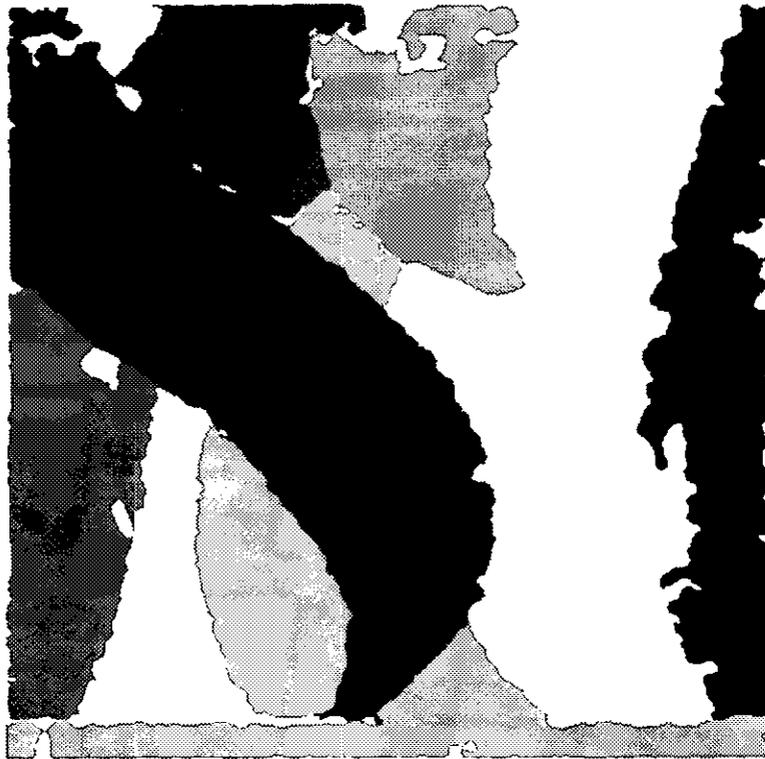


Figura 66. Relleno con tonos de grises de las distintas zonas.



Figura 67. Superposición de la imagen original con los contornos detectados.

Se observa que entre las zonas, existen espacios no definidos. Esto se debe en parte al fenómeno de *aliasing*, es decir a la aproximación del color que tienen los píxeles para no mostrar aristas demasiado bruscas, y por otro lado a que en los criterios de separación, estas partes no pertenecían claramente a un tipo de piedra. Cuando este fenómeno ocurre dentro de una zona claramente definida, al momento de quitar agujeros estas partes quedan rellenas, sin embargo cuando el fenómeno sucede en las orillas de las zonas, se requeriría de la implementación de algoritmos más complejos para eliminar el problema. Se puede ver también que la zona de faltantes ubicada entre la piedra blanca y la gris tampoco fue incluida en las zonas de piedras de color.

Superficie de cada zona

Una vez realizada la segmentación, es factible conocer la superficie de cada una de las áreas. Ésta se calcula en píxeles y conociendo la correspondencia pixel-superficie, se hace la

multiplicación para conocer la superficie real de las zonas. Se encontraron los siguientes resultados:

Tipo de piedra	Superficie (píxeles)	Superficie (cm ²)
roja	286800	2868.00
blanca	328432	3284.32
verde	161608	1616.08
amarilla	143708	842.36
gris	121788	1217.88
violeta	84236	1437.08
superficie no definida	83428	834.28
TOTAL	1210000	12100.00

La superficie no definida corresponde al 6.8% de la superficie total.

De la misma forma es posible extraer estadísticas sobre cada una de las zonas. Por ejemplo se pueden conocer los promedios mínimos y máximos de los tonos de grises de cada una de las componentes Y, I y Q.

Color	Y-MAX	Y-MEAN	Y-MIN	I-MAX	I-MEAN	I-MIN	Q-MAX	Q-MEAN	Q-MIN
Rojo	228	87.760506	8	205	146.680893	60	14	6.751660	0
Gris	211	55.851940	2	105	86.564949	58	7	3.219628	0
Verde	223	86.555992	18	156	66.049843	21	8	1.187707	0
Verde	249	68.748810	12	113	66.618080	28	7	1.726349	0
Blanca	250	183.938568	51	189	72.383507	29	5	0.229818	0
Blanca	253	199.912766	42	228	70.684464	42	10	0.107262	0
Violeta	190	90.310173	23	139	96.405006	63	8	4.214920	0
Amarilla	197	88.743546	26	201	152.869949	65	7	0.293088	0
Amarilla	181	101.753281	27	223	171.292801	75	11	0.357458	0
Amarilla	160	95.503754	28	228	154.998642	73	6	0.238745	0

Nota: Se conservaron en forma independiente cada una de las zonas detectadas, aun cuando tienen el mismo color

Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo fue posible comprobar hasta qué grado el cómputo actual ofrece formas novedosas de trabajo para estudiar y conocer el patrimonio arquitectónico.

En algunos casos, permite la reproducción optimizada de la forma tradicional de trabajar, reemplazando, por ejemplo, el restirador. Aún en esta modalidad, se encuentran una serie de ventajas como velocidad en la ejecución de los dibujos, facilidad de actualización y precisión de éstos, que le dan una superioridad sobre los métodos tradicionales. Cuando se dibujó el levantamiento del sitio de Cacaxtla, se aprovechó simultáneamente la posibilidad de organizar la información, y así ver partes del total en forma selectiva. Esto fue particularmente útil para desarrollar hipótesis de reconstrucción conservando solamente la información que correspondía a una fase constructiva. Las posibilidades gráficas para reproducir elementos, como es la extrapolación al continuar una serie de columnas; utilizar las herramientas para duplicar las estructuras en forma simétrica; ver las implicaciones de la existencia de un eje constructivo o de simetría; buscar y descubrir relaciones geométricas; etc. todas éstas fueron de uso constante para formular hipótesis de configuración y presentar posibles soluciones. En algunos casos, éstas pudieron ser corroboradas encontrando coincidencias con otros elementos; en otros casos obligó regresar al sitio mismo en búsqueda de nuevas "evidencias". Aun en este empleo tan básico del cómputo, se encontró en el CAD una herramienta que, al permitir examinar múltiples posibilidades, demostró ser una extensión de la imaginación y un importante estímulo para lograrlo. Esto se debe al hecho de que el manejo de la herramienta se volvió transparente, es decir, la atención se centró más en el papel que jugaban los elementos geométricos en la construcción, más que en el trazado mismo de por ejemplo, una línea.

Si bien la digitalización de la información del mural no es en principio algo novedoso en relación al registro tradicional, representa un importante cambio por las características del medio. La información queda almacenada en forma segura, su reproducción es económica y puede ser consultada en forma local o remota aprovechando las redes de computadora actuales. Donde existe una enorme aportación gracias a la definición digital, es en el hecho de que la imagen puede ser modificada. Mediante este proceso es factible mejorar la precisión del registro y, como se vió detenidamente en el desarrollo del trabajo, existe una serie de deformaciones que pueden ser corregidas *i.e.*, la iluminación y la distorsión perspectiva y óptica.

En otros casos, el uso de las herramientas de cómputo permite realizar actividades totalmente nuevas. Éste sería el caso de la parte analítica de los daños del mural gracias al uso de las técnicas de procesamiento digital de imágenes. De esta manera, se abre un espectro de posibilidades aprovechando la superioridad de las computadoras para procesar información en cuanto a velocidad, realizar cálculos y extraer información que no era evidente por encontrarse originalmente mezclada con muchos otros elementos.

En el caso de las alternativas de visualización a partir de modelos tridimensionales, los alcances de la metodología empleada realmente no tienen precedentes. La imagen misma tiene una génesis distinta respecto a la imagen dibujada, ya que es el resultado de un cálculo en el cual se pueden hacer intervenir numerosos factores que influyen en el logro del realismo. Adicionalmente al hecho de ubicar un ojo virtual para percibir la volumetría, es posible añadir elementos como materiales, iluminación y parámetros ambientales. Se obtienen así imágenes con un alto grado de realismo. Sin embargo, este proceso debe ser aplicado cuidadosamente para no incurrir en un un “simulacro” de la realidad, lo cual se vuelve muy peligroso. Por ejemplo, es muy fácil cambiar la percepción de un ambiente arquitectónico inventando una iluminación “teatral” en vez de simular su iluminación real. A su vez, aplicando las técnicas de iluminación apropiadamente, es posible lograr imágenes realistas de una arquitectura ya desaparecida.

Cabe preguntar: ¿qué tan interesante es la búsqueda del “realismo absoluto”, *i.e.*, llegar a perder la capacidad de distinguir lo real de lo virtual? ¿Pretende acaso esta búsqueda que lo falso

se considere como verdadero, corriendo el riesgo de que lo real se considere aburrido y demasiado lleno de defectos? ¿Podría considerarse que se incurre en una “espectacularización” del monumento?

El objeto antiguo tal como lo vemos, es una versión del objeto original, y de éste percibimos su metamorfosis a través del tiempo. Lejos está de ser lo que fue originalmente y no por ello puede decirse que constituye una falsedad, sino que es justamente la transformación real del objeto original. Es totalmente equivocado pensar que la restitución parcial, con una mínima intervención permite conservar lo auténtico de un edificio, o que la iglesia gótica sin sus acabados de pintura sea representativa de lo que fue originalmente. Las grandes polémicas sobre lo apropiado de conservar o no la patina de una pintura de caballete encuentran argumentos tan válidos en su favor como en su contra. Qué es más falso o más verdadero (si fuera factible medir estos conceptos) ¿regresar la obra a un estado remoto ignorando los efectos del tiempo transcurrido? o ¿tener un cuadro que muestre en éste los efectos del tiempo?

En este sentido, la reconstrucción virtual y su visualización deben ser consideradas como un complemento para la restitución del sitio a su estado actual y es allí donde adquieren un valor excepcional, pues su aporte se ubica como una alternativa al conflicto entre las dos posturas anteriores. Permiten “ver” el sitio en su estado original sin intervenirlo. Por ello, al plasmar los resultados de las investigaciones en una forma visual que resulta fácilmente entendible y por consecuencia didáctica, hacen que la historia se vuelva más accesible. Se permite así que el visitante de los sitios pueda tener una visión del espacio arquitectónico, compare lo que ve con la imagen de la reconstrucción, la critique, y comprenda mejor la información arqueológica.

Adicionalmente, la visualización de la arquitectura retroalimenta su estudio en su forma subjetiva. Existe una serie de componentes de la arquitectura que no son medibles cuantitativa o racionalmente y que pertenecen al orden sensorial, donde la visión juega un papel importante. En este sentido, la visualización se vuelve una herramienta fundamental para entender el valor de la arquitectura.

No hay duda que la forma más completa para experimentar el espacio arquitectónico es mediante la realidad virtual, cuando el usuario no es solamente espectador sino que pasa a una fase dinámica generando su propia experimentación, dentro del modelo tridimensional. La inmersión en la realidad virtual mediante implementos tecnológicos como el casco elimina el intermediarismo de la pantalla y ubica al observador en la realidad digital, aislado del exterior, posibilitando así la percepción sensorial del espacio.

Hubo varias aportaciones que merecen una mención especial durante el desarrollo del proyecto. En relación con la historia de Cacaxtla, se pudieron reubicar en el tiempo las estructuras visibles y proponer reconstrucciones de las cinco etapas constructivas previas a su abandono. Se encontraron algunas de las reglas de composición del sitio. Para ello, se estableció una metodología de trabajo donde se buscó restablecer el ideal constructivo del sitio, basándose en un cuidadoso estudio de las huellas arqueológicas. Parafraseando a Viollet-le-Duc, se puede afirmar que: "Restituir virtualmente a un edificio, no es describirlo, no es inventarlo, es restablecerlo a un estado de perfección que puede no haber existido en un momento dado, basándose en el estudio cuidadoso de las huellas arqueológicas". Las imágenes obtenidas dieron una visión sorprendente del sitio, con una percepción de un espacio muy distinto de lo que se podía imaginar. Esto se debe al avanzado estado de destrucción de las estructuras, a la mezcla de elementos de diferentes épocas y también al hecho de que la iluminación de Cacaxtla y sus espacios están drásticamente modificados por la presencia de un techo.

Varios trabajos fueron publicados a nivel nacional e internacional sobre la integración del cómputo al estudio de un sitio arqueológico, en relación con su aspecto metodológico, los problemas encontrados, las limitantes de los sistemas de cómputo actuales, el problema de la iluminación en la síntesis de imágenes y la importancia que tiene el hacer una simulación de la iluminación basándose en las propiedades físicas de la luz.

En el caso del mural, se logró proponer una solución realista de digitalización, desglosando cada uno de los factores que intervienen en las decisiones de tal forma que la

metodología se pueda repetir para murales en condiciones distintas. Dicho trabajo también fue materia de publicación. Se desarrollaron los algoritmos de corrección de las imágenes y se mostró una posibilidad concreta de aprovechamiento de la información. Es un tema donde la componente arquitectónica es menos predominante y puede ser considerado como de naturaleza esencialmente técnica. Sin embargo, se trata de un tema importante ya que la conservación de la información relativa al patrimonio es parte de la memoria de la humanidad.

Resultó importante mostrar las capacidades de dos grandes áreas del cómputo gráfico, *i.e.*, el procesamiento digital y la síntesis de imágenes, si se considera que éstas son complementarias y que en los últimos años se han ido integrando con mayor medida. Una consecuencia de sus aplicaciones consiste en ofrecer soluciones a los sistemas de realidad virtual para abordar los problemas de cálculo en tiempo real así, como plantear alternativas en los problemas de navegación en ambientes virtuales.

Finalmente, esta tesis abre el espacio para diferentes líneas de trabajo que consisten en la explotación de los modelos virtuales de Cacaxtla. Se están desarrollando varios proyectos y tesis como continuidad del trabajo de reconstrucción para llevar a Cacaxtla a un sistema completo de realidad virtual reuniendo a su alrededor los distintos investigadores que han trabajado estos temas. En éste se incluye la inmersión, visión estereoscópica e interacción con el medio virtual para visitarlo no sólo en el espacio sino también en el tiempo, saltando de una época de construcción a otra. Los problemas a resolver son múltiples, desembocan en distintos temas de investigación para resolver los problemas de interfases, calidad y velocidad, por tanto, requieren de conocimientos más de orden del cómputo que de arquitectura.

En la medida en que se mejoren las herramientas de visualización será factible obtener mayor realismo y por consecuencia una percepción más exacta del espacio mesoamericano. La falta de calidad visual de los sistemas genera todavía cierto rechazo de estas tecnologías por parte de los arquitectos, pero es necesario reubicarlas dentro del marco de la evolución de las herramientas, donde las exigencias por parte de los arquitectos permiten la retroalimentación de

los desarrollos de cómputo. Éstos habían sido generalmente impulsados por la industria armamentista, sin embargo por primera vez en su historia es la arquitectura el campo que resulta más beneficiado por un desarrollo tecnológico porque es en éste donde la realidad virtual encuentra su aplicación más completa.

Puede preverse que en el futuro cercano, la incorporación de la herramienta del cómputo moderno a la arquitectura le significará un campo novedoso desde el cual se podrán hacer contribuciones importantes en la tarea del estudio y del rescate del patrimonio cultural.

Bibliografía

HERRAMIENTAS DE CÓMPUTO

- Bertin J., 1988, *La gráfica y el tratamiento gráfico de la información*, Taurus Comunicación, colección "Noesis de comunicación", Taurus ediciones, Madrid.
- Bertol D., Foell D., 1997, *Designing Digital Space, an architect's guide to virtual reality*, John Wiley.
- Chirrollet J.-Cl., 1994, *Esthétique et technoscience pour la culture techno-esthétique*, Philosophie et langage, Mardaga, Lieja.
- Couwenbergh J.-P., 1998, *La synthèse d'images du réel au virtuel*, Marabout, Alleur, Belgique.
- Drap P., 1997, *Photogrammétrie et modèles architecturaux*, Thèse d'informatique, gamsau, Université Aix-Marseille III.
- Feldgoise J., Dorsey J., Agrawala M., Beers A., Fröhlich B., Hanrahan P., 1997, "Architectural Applications and the Responsive Workbench", en *Designing Digital Space*, Bertol D., John Wiley.
- Foley D. J., vanDam A., Feiner K. St., Hughes F. J., 1990, *Computer Graphics, principles and practice*, Addison-Wesley Publishing Company.
- Lucet G., 1998a, "Comparación de resultados en simulación de iluminación natural", memorias de *Computación Visual 98*, DGSCA-Fac. De Ciencias, UNAM, México.
- Lucet G., 1998b, "Illumination and the virtual reconstruction of archaeological sites", *Computer Applications in Archaeology*, Barcelona.
- Quéau P., 1993, *Le virtual, vertus et vertiges*, Col. Milieux, ed. Champ Vallon, INA, Francia.

- Vince J., 1995, *Virtual reality systems*, Addison-Wesley Publishing Company.
- Watt A., Policarpo F., 1998, *The Computer Image*, Addison-Wesley Longman Limited.
- Zevi B., 1959, *Apprendre à voir l'architecture*, Les éditions de Minuit, Paris.

RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL DE CACAXTLA

- Aveni A. F., Gibbs S. L., 1976, "The orientation of precolumbian buildings in central Mexico", *American Antiquity*, vol. 41, 4, 510-517.
- Aveni A., 1986, "The Real Venus-Kukulcan in the Maya inscriptions and Alignments", *Sixth Palenque Round Table, 1986*, Merle Greene Robertson, Gal. editor, Virginia M. Fields, Vol. editor, University of Oklahoma Press: Norman and London.
- Baird T. E., 1989, "Stars and War at Cacaxtla", en *Mesoamerica after the Decline of Teotihuacan a. d. 700-900*, R. A. Diehl y J. C. Berlo (ed.), Dumbarton Oaks Research Library and Collection, Washington.
- Carlson B. J., 1993, "Rise and Fall of the City of the Gods", *Archaeology*, nov-dic, 58-69.
- Carter H., 1993, *La tumba de Tutankhamón*, Ediciones Destino, México.
- Chanfón C., 1978, *La geometría y la piedra del sol*, ed. Churubusco, México.
- Collins F., Williams D., Haak R., Trux M., Herz H., Genevriez L., Nicot P., Brault P., Coyere X., Krause B., Kluckow J., Paffenholz A., 1995, "The Dresden Frauenkirche, rebuilding the past", *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, 1993*, Wilcock J. y Lockyear K. (ed.), Staffordshire University, U.K..
- Delgadillo Torres R. y Santana Sandoval A., 1984, *Los enterramientos humanos de Cacaxtla, Tlaxcala*, Homenaje a Ignacio Marquina, UDLA, México.
- Eco U., 1985, *La guerre du faux*, Le livre de poche, Éditions Grasset & Fasquelle, Paris.
- Foncerrada de Molina M., 1976, "La pintura mural de Cacaxtla, Tlaxcala", *Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas*, UNAM, núm. 46, México, 5-19.

- Foncerrada de Molina M., 1976, "La pintura mural de Cacaxtla, Tlaxcala", *Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas*, UNAM, núm. 46, México, 5-19.
- Foncerrada de Molina M., 1980, "La pintura mural de Cacaxtla", *XVII Congreso Internacional de Americanistas*, Vol. VIII, París, 321-335.
- Foncerrada de Molina M., 1982, "Signos glíficos relacionados con Tláloc en los murales de La Batalla en Cacaxtla", *Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas*, núm. 50-1, UNAM.
- Foncerrada de Molina M., 1983, "Los murales de Cacaxtla: muerte en la guerra", *Jahrbuch für Geschichte von Staat, Wirtschaft und Gesellschaft lateinamerikas*, tomo 20, 537-562. traducción en *Antología de Cacaxtla*, García Cook A. y Merino Carrión B. L. (eds.).
- Foncerrada de Molina M., 1993, *Cacaxtla la iconografía de los olmeca-xicalanca*, Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.
- García Cook A., 1991, *Guía Oficial Cacaxtla-Tizatlán*, INAH-SALVAT.
- García Cook A., Merino Carrión B.L, 1995, *Antología de Cacaxtla*, vol. I y II, Serie Arqueología, INAH.
- Gendrop P., Heyden D., 1973, *Architecture Mésoaméricaine*, reimpresión 1994, Histoire de l'architecture, Gallimard/Electa, Electa Milán.
- Hammond N., 1991, "Matrices and Maya Archaeology", *Journal of Field Archaeology*, vol. 18, 1991.
- Hartung H., 1986, "Puntos y líneas de referencia en la arquitectura maya", *Cuadernos de arquitectura mesoamericana*, Facultad de Arquitectura, UNAM, 8.
- Kubler G., 1978, "Eclecticism at Cacaxtla", *Third Palenque Round Table*, Merle Greene Robertson, University of Texas, Austin, vol. 2.
- Lombardo de Ruiz S., 1978, "Contribución del estudio de la forma a la iconografía de los murales de Cacaxtla", *Comunicaciones*, FAIC, Puebla, 149-160, en *Antología de Cacaxtla*, García Cook A., Merino Carrión B. L. (eds.).

- Lombardo de Ruiz S., 1986, *Las pinturas de Cacaxtla*, Historias, INAH, núm. 12.
- López de Molina D., Molina D., 1976, "Los murales de Cacaxtla", *Boletín del Instituto Nacional de Antropología e Historia*, INAH, México, época 2, núm. 16.
- López de Molina D., 1977, "Cacaxtla y su relación con otras áreas mesoamericanas", *XV Mesa redonda de la sociedad mexicana de antropología*, SMA, México.
- López de Molina D., 1979, "Excavaciones en Cacaxtla, tercera temporada", *Comunicaciones*, 16.
- López de Molina D., 1980, "Relación entre Cacaxtla y el Golfo de México", *XVI Mesa Redonda de la Sociedad Mexicana de Antropología*, tomo 1, SMA, México.
- López de Molina D., 1981, "Un informe preliminar sobre la cronología de Cacaxtla", en *Interacción cultural en México Central* (E. Rattray, J. Litvak, y C. Díaz (eds.)), UNAM.
- Lucet G., 1997, "The virtual restitution of the mesoamerican site of Cacaxtla: a methodological point of view", *Archeologia e Calcolatoria*, 8.
- Lucet G., en proceso, "Study of column and intercolumn spaces in Cacaxtla".
- Lucet G., Casas A., Lupone Cl., 1994, "Studies on the finish of structures at the mesoamerican site of Cacaxtla, and its representation by computerized rendering", *Materials issues in art and archaeology IV*.
- Lucet G., Lupone Cl., 1994, "A computerised register of pre-hispanic architecture", *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, 1993*, Wilcock J. y Lockyear K. (ed.), Staffordshire University, U.K..
- Lucet G., 1995, *La restauración razonada, teoría de Viollet-le-Duc en el siglo XIX*, tesis de maestría, Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lucet G., Casas A., Godoy V., 1998a, "Comparación de resultados en simulación de iluminación natural", en memorias de *Computación Visual 98*, DGSCA-Fac. De Ciencias, UNAM.
- Lucet G., 1998b, "Illumination and the virtual reconstruction of archaeological sites", *Computer Applications in Archaeology*, Barcelona.
- Lupone Cl., *Documentación por computadora para fines de restauración de sitios arqueológicos*, Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía, INAH, tesis en proceso.

- Machado A., 1992, "El imaginario numérico: simulación y síntesis", *Acta Poetica*, núm. 13, primavera 1992, traducción del portugués de César González Ochoa.
- Marquina I., 1951, *Arquitectura prehispánica*, INAH, versión facsimilar, 1990.
- Millon R., 1967, "Teotihuacan", reprinted en *Scientific American*, ed. especial vol. 5-1. 1994.
- Molina Feal D., 1977, "Consideraciones sobre la cronología de Cacaxtla", *XV mesa redonda de la sociedad mexicana de antropología*, tomo 2, SMA, México, 1977.
- Molina Feal D., 1978, La investigación arqueológica en Cacaxtla, Tlaxcala, *Boletín del Museo del hombre dominicano*, Edit. Cultural Dominicana S.A, Año 7, núm 9.
- Muñoz Camargo D., 1995, "Historia de Tlaxcala, capítulo III", en *Antología de Cacaxtla*, compiladores: Ángel García Cook y Beatriz Leonor Merino Carrión, INAH.
- Nagao D., 1989, "Proclamación pública en el arte de Cacaxtla y Xochicalco", *Mesoamerica after the Decline of Teotihuacan A.d. 700-900*, R. A. Diehl y D. C. Berlo (eds.), Dumbarton Oaks Research Library and Collection, Washington.
- Paice P., 1991, "Extensions to the Harris Matrix System to Illustrate Stratigraphic Discussion of an Archaeological Site", *Journal of Field Archaeology*, vol. 18.
- Peterson D. A., 1984, "Relaciones prehistóricas entre el valle de Puebla-Tlaxcala y la región maya", *XVII Mesa redonda de la Sociedad Mexicana de Antropología*, SMA, México.
- Proskouriakoff T., 1950, *An album of Maya Architecture*, Carnegie Institution, Washington.
- Salas S., *Análisis del contenido gráfico de la pintura mural del sitio arqueológico de Cacaxtla y su restitución por computadora*, Escuela Nacional de Artes Plásticas, UNAM, tesis en proceso.
- Santana Sandoval A., 1990, "Ubicación cronológica del Gran Basamento y sus pinturas en Cacaxtla", en *Proyecto de investigación y conservación*, Gobierno del Estado de Tlaxcala-INAH.
- Santana Sandoval A., Delgadillo Torres R., "Cacaxtla durante la transición del periodo Clásico al Postclásico", *Mesoamérica y el norte de México siglos LX-XII*, Federica Sodi Miranda (coord.), MNA-INAH, México.

- Santana Sandoval A., Vergara Verdejo S., 1990, "Cacaxtla, su arquitectura y pintura mural: nuevos elementos para su análisis", *La época clásica: nuevos hallazgos, nuevas ideas*, Amalia Cardós de Méndez (coord), MNA-INAH.
- Sugiyama Saburo, 1993, "Worldview materialized in Teotihuacan, Mexico", *Latin American Antiquity*, vol. 4, No. 2.
- Tavernor R., 1995, "Architectural history and computing: developing a new discipline", *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, 1993*, Wilcock J. y Lockyear K. (ed.), Staffordshire University, U.K..
- Viollet-le-Duc E., 1854, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI au XVI siècle*, A. Morel. Paris.
- Zevi B., 1959, *Apprendre à voir l'architecture*, Les éditions de Minuit, Paris.

DIGITALIZACIÓN DEL MURAL O'GORMAN

- Andrews C., May/June 1995, "Color management put PhotoCD images in the big leagues", *Color Publishing*.
- Applbaum N., Horowitz W. y H. Applbaum Y. H., 1994, "Computed tomography imaging of sealed clay cuneiform tables", *Imaging the past, Electronic Imaging and Computer Graphics in Museum and Archaeology*, British Museum.
- Awcock G. J., Thomas R., 1996, *Applied Image Processing*, McGraw-Hill.
- Billinge R., Cupitt J., Dessipris N., Saunders D., 1992, "A note on an improved procedure for the rapid assembly of infrared reflectogram mosaics", *Studies in Conservation*, 38.
- Burmester A., Bayerer F., 1993, "Towards improved infrared reflectograms", *Studies in Conservation*, 38.
- Canny, J.F., 1983, "Finding edges and lines in images", *M.I.T. Artif. Intell. Lab*, Cambridge, MA, TR-720.

- Chahine H., Cupitt J., Saunders D. y Martinez K., 1994, "Analysis of colour change during the cleaning of paintings and the development of a model for predicting appearance", *Imaging the past, Electronic Imaging and Computer Graphics in Museum and Archaeology*, British Museum.
- Chanfón O. C., 1985, *Fundamentos teóricos de la restauración*, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Arquitectura, UNAM.
- Foley D. J., Van Dam A., Feiner K. S., Hugues F. J. ,1991, *Computer Graphics, principles and practice*, Addison-Wesley, 2nd. ed.
- Forte M.,1995, "Archaeology and computer image processing: applications in the aerial photographs analysis and the perspectives in the landscape navigation", *Aplicaciones Informáticas en Arqueología: Teorías y sistemas*, Saint-Germain-en-Laye, 1991, ed. L. Valdés, I. Arenal e I. Pujana, editorial Denboraren Argia, Bilbao.
- Fraser Bruce, 1995, "Seven Steps to Superior Scans", *MacUser*, Enero.
- Garza-Jinich M., Meer P., Medina V., 1996, "Robust retrieval of 3D structures from magnetic resonance images", *Reportes de investigación*, IIMAS, UNAM.
- González C. R. y Woods E. R., 1992, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing Company.
- Guglielmo C., 1993, "Photo CD: The big Picture", *MacUser*, Mayo.
- Horaud R., Monga O., *Vision par ordinateur, outils fondamentaux*, Traité des Nouvelles Technologies, Hermés, París, 1993.
- Hughes S., 1994, "3D reconstruction of an ancient egyptian mummy", *Imaging the past, Electronic Imaging and Computer Graphics in Museum and Archaeology*, British Museum, Nov.
- Jeffery D., 1989, "A Renaissance", *National Geographic*, Diciembre.
- Jones R., 1995, *Report on research at Pompeii, 1994*, correo electrónico AIA List Digest, 17-01-1995.

- Kiernan S.K., 1994, "Digital Preservation, Restoration, and Dissemination of Medieval Manuscripts", *Scholarly Publishing on the Electronic Networks*, Proceedings of the Third Symposium, ARL Publications.
- Lange E., 1994, "Development of an On-Site Digital Imaging System for Site Documentation", *Imaging the past, Electronic Imaging and Computer Graphics in Museum and Archaeology*, British Museum, Noviembre.
- Larish J., 1994, *Photo CD: Quality photos at your Fingertips*, Micro Publishing Press, Torrance, California.
- Lucet G., 1995, *La restauración razonada, teoría de Viollet-le-Duc en el siglo XIX*, tesis de maestría, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Arquitectura, UNAM.
- Lucet G., Casas A., Chanfón C., 1996, "Digitization of the O'Gorman's mural at the Central Library of the National University of Mexico", *Archeologia e Calcolatori*, 7.
- Lupone Cl., en proceso, *Documentación por computadora para fines de restauración de sitios arqueológicos*, Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía, INAH, Tesis.
- Necci M., 1992, *La fotografía archeologica*, La Nuova Italia Scientifica, Roma.
- Robinson P., 1993, *The digitization of Primary Textual Sources*, "Office for Humanities Communication Publications", 4, Oxford University, Oxford.
- Roth S., 1993, "Halftone demystified", *Macworld*, febrero.
- Roth S., 1994, "Make great scans", *Macworld*, febrero.
- Russ C. J., *The image processing handbook*, 1992, CRC Press.
- SIGGRAPH, 1993, "Introduction to Scientific visualization, tools and techniques", Course notes 02, Siggraph 93, Anaheim, USA.
- Torices A. L., 1993a, "México prehispánico como base de la monumental obra", *Gaceta Universitaria*, 15 de nov.
- Torices A. L., 1993b, "Los murales de la Biblioteca Central hablan de México y su historia", *Gaceta Universitaria*, 29 de nov.

- Torres M. L., 1990, *Informe del examen preliminar de la condición material del mural de Juan O'Gorman en la Biblioteca Central de Ciudad Universitaria.*
- Torres M. L., 1991, *The Juan O'Gorman's Murals at the Central Library of the University of Mexico: preliminary examination of its deterioration and conservation problems.*
- Torres M. L., 1992, *Propuesta para la consolidación y fijado de los fragmentos de piedra del mural de Juan O'Gorman en la Biblioteca Central de Ciudad Universitaria.*
- Torres M.L., Reyes G.M., Bravo H., Gómez-Urquiza M., 1993, "The Influence of the Materials of Juan O'Gorman's Murals on the Central Library of the University of Mexico", 86th. *Annual Meeting of Air & Waste Management*, Denver, Col.
- Wolberg G., 1964, *Digital Image Warping*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CS, ed. 1990.

Tabla de figuras

Figura 1.	Castillo de Pierrefonds, Francia.	14
Figura 2.	Toma fotográfica inicial y la imagen obtenida después de su procesamiento para resaltar contrastes.	16
Figura 3.	Esquema de los procesos para obtener una imagen con fotorrealismo.	27
Figura 4.	Modelado de volúmenes con la extrusión de un cuadrado.	32
Figura 5.	Modelado de volúmenes a partir de la revolución de un cuadrado.	32
Figura 6.	Modelado con malla.	33
Figura 7.	Modelado con operaciones booleanas de intersección y de unión de un cubo con un cilindro.	34
Figura 8.	Figuras vistas como estructura de alambre.	36
Figura 9.	Figuras con el cálculo de las aristas visibles.	36
Figura 10.	Mapeo de textura y textura tridimensional.	38
Figura 11.	Modelado de un bajorrelieve "restituido" de Cacaxtla con la técnica de displacement mapping.	39
Figura 12.	Esferas con acabados mate, semimate (plástico) y brillante (metal).	40
Figura 13.	Tipos básicos de luces, luz global, dirigida, de tipo foco y de tipo spot.	41
Figura 14.	Cacaxtla, Templo Rojo. Cálculo con iluminación local.	43
Figura 15.	Cacaxtla, Templo Rojo. Cálculo con ray tracing.	45
Figura 16.	Cacaxtla, Templo Rojo. Cálculo con radiosidad.	46
Figura 17.	Iluminación escenográfica de una escena.	48
Figura 18.	Integración de varios elementos en un sistema de realidad virtual.	56
Figura 19.	Ubicación del sitio arqueológico de Cacaxtla.	81
Figura 20.	Plano general de la zona arqueológica.	84
Figura 21.	Digitalización del plano general del "Gran Basamento"	86
Figura 22.	Talud-tablero característico de Cacaxtla. Edificio F.	97
Figura 23.	Talud-tablero del edificio E.	98
Figura 24.	Del lado izquierdo: pintura de La Batalla sobre talud. De frente: retorno de la escalera central.	126
Figura 25.	En primer plano: el edificio D; en el fondo: el edificio de las columnas.	128
Figura 26.	Patio de los Rombos, estado actual.	135
Figura 27.	La celosía.	144
Figura 28.	Copán. (1) El juego de pelota. (Marquina)	147
Figura 29.	El material inicial combinado con funciones aleatorias para obtener el estuco liso agregando polvo y el estuco rugoso agregando polvo y turbulencia de la superficie.	158
Figura 30.	Conjunto F y Celosía. Reconstrucción digital. Imágenes obtenidas con RenderMan.	163
Figura 31.	El edificio A. Reconstrucción digital. Vista desde el interior del pórtico y desde el aposento. Cálculo con radiosidad y ray tracing utilizando Lightscape.	163
Figura 32.	El cuarto de Venus. Reconstrucción digital. Diferencias de resultados en iluminación con a) iluminación local, RenderMan; b) ray tracing, Alias; c) radiosidad, BlueMoon; d) radiosidad para simulación de iluminación real, Lightscape.	163
Figura 33.	Secuencia de imágenes mostrando la evolución del Templo Rojo.	164
Figura 34.	Fotografía de las fachadas sur y oriente.	175
Figura 35.	Muestra de las piedras que fueron utilizadas para la realización del mural.	175
Figura 36.	Ejemplo de daños del mural, caída de piedras.	179
Figura 37.	Ejemplo de daños del mural, enfermedad de piedras.	180
Figura 38.	Ejemplo de daños del mural, estallamiento de placas.	181

Figura 39.	El espectro electromagnético.	200
Figura 40.	Toma con película de infrarrojo.	202
Figura 41.	Placa del mural utilizada para los estudios.	203
Figura 42.	Digitalización donde aparece el grano de la película.	208
Figura 43.	Esquema del efecto acumulado de la perspectiva y de la distorsión en la captura de la imagen.	211
Figura 44.	Damero digitalizado para estudiar la distorsión del sistema óptico.	212
Figura 45.	Esquema de iluminación directa.	213
Figura 46.	Esquema de iluminación indirecta.	214
Figura 47.	Fotografía de una placa gris para modelar la iluminación.	215
Figura 48.	Estructura para la toma fotográfica.	216
Figura 49.	Comparación de nitidez entre dos equipos.	220
Figura 50.	Imagen definida con 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 bits.	226
Figura 51.	Imagen en tonos de grises correspondiente al promedio de los canales RGB. En la parte inferior, el histograma correspondiente.	228
Figura 52.	El diagrama cromático CIE.	232
Figura 53.	Descomposición de la imagen en los canales C, a y b del modelo CIELab.	233
Figura 54.	El modelo RGB.	235
Figura 55.	Las imágenes en tonos de grises correspondientes a los canales R, G y B.	236
Figura 56.	El modelo HSV.	238
Figura 57.	Las imágenes en tonos de grises correspondientes a los canales H, S y V.	239
Figura 58.	Imágenes en tonos de grises correspondientes a los canales C, M, Y y K.	240
Figura 59.	Imágenes en tonos de grises de los canales correspondientes a XR, XG y XB.	242
Figura 60.	Imágenes en tonos de grises de los canales correspondientes al modelo RGB normalizado.	244
Figura 61.	Imágenes en tonos de grises de los canales del modelo YIQ.	246
Figura 62.	Imagen después de la corrección de iluminación.	249
Figura 63.	Separación por zonas utilizando intersecciones de imágenes.	258
Figura 64.	Eliminación de pequeñas zonas.	259
Figura 65.	Contornos de las distintas zonas encontradas.	261
Figura 66.	Relleno con tonos de grises de las distintas zonas.	261
Figura 67.	Superposición de la imagen original con los contornos detectados.	262

Lista de láminas

- lámina 1. Plano general de Cacaxtla. Levantamiento simplificado.
- lámina 2. Perspectiva general del estado actual del sitio. Modelo 3D. (Lucet, Lupone)
- lámina 3. Definición de los conjuntos de estructuras.
- lámina 4. Ubicación de la pintura mural.
- lámina 5. Vista actual del interior del edificio A.
- lámina 6. Jambas norte y sur de la puerta interior del edificio A. Murales de los danzantes. Estado actual y restitución.
- lámina 7. Murales restituidos del pórtico del edificio A. Hombre jaguar, bajorelieve y hombre águila.
- lámina 8. Calca del mural del aposento del edificio A. Mural de las serpientes entrelazadas.
- lámina 9. Mural de la batalla. (restitución Selene Salas, según Francisco Villaseñor Bello)
- lámina 10. Bajo relieve del edificio E y pintura de los hombres caminando (edificio F).
- lámina 11. Templo rojo, estado actual.
- lámina 12. Murales restituidos del templo rojo. Cenefa del pasillo, rana jaguar y viejo con cacaxtli.
- lámina 13. Piso pintado del templo rojo. Los esqueletos y los íconos.
- lámina 14. Murales de la mujer y del hombre Alacrán.
- lámina 15. Ubicación de los guardapolvos.
- lámina 16. Ubicación de los taludes-tableros.
- lámina 17. Ejes centrales de edificios marcados por las puertas y los entrecolumnas.
- lámina 18. Ejes de simetría de espacios exteriores y ejes secundarios.
- lámina 19. Geometría de las plazas.
- lámina 20. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 1.
- láminas 21. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 2 y 3.
- lámina 22. Fases 2 y 3, perspectiva de la reconstrucción hipotética.
- láminas 23 y 24. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 4. Planta alta y planta baja.
- lámina 25. Fase 4, perspectiva de la reconstrucción hipotética.
- lámina 26. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 5.
- lámina 27. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 6.
- lámina 28. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 7.
- lámina 29. Tabla cronológica.

Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo fue posible comprobar hasta qué grado el cómputo actual ofrece formas novedosas de trabajo para estudiar y conocer el patrimonio arquitectónico.

En algunos casos, permite la reproducción optimizada de la forma tradicional de trabajar, reemplazando, por ejemplo, el restirador. Aún en esta modalidad, se encuentran una serie de ventajas como velocidad en la ejecución de los dibujos, facilidad de actualización y precisión de éstos, que le dan una superioridad sobre los métodos tradicionales. Cuando se dibujó el levantamiento del sitio de Cacaxtla, se aprovechó simultáneamente la posibilidad de organizar la información, y así ver partes del total en forma selectiva. Esto fue particularmente útil para desarrollar hipótesis de reconstrucción conservando solamente la información que correspondía a una fase constructiva. Las posibilidades gráficas para reproducir elementos, como es la extrapolación al continuar una serie de columnas; utilizar las herramientas para duplicar las estructuras en forma simétrica; ver las implicaciones de la existencia de un eje constructivo o de simetría; buscar y descubrir relaciones geométricas; etc. todas éstas fueron de uso constante para formular hipótesis de configuración y presentar posibles soluciones. En algunos casos, éstas pudieron ser corroboradas encontrando coincidencias con otros elementos; en otros casos obligó regresar al sitio mismo en búsqueda de nuevas “evidencias”. Aun en este empleo tan básico del cómputo, se encontró en el CAD una herramienta que, al permitir examinar múltiples posibilidades, demostró ser una extensión de la imaginación y un importante estímulo para lograrlo. Esto se debe al hecho de que el manejo de la herramienta se volvió transparente, es decir, la atención se centró más en el papel que jugaban los elementos geométricos en la construcción, más que en el trazado mismo de por ejemplo, una línea.

Si bien la digitalización de la información del mural no es en principio algo novedoso en relación al registro tradicional, representa un importante cambio por las características del medio. La información queda almacenada en forma segura, su reproducción es económica y puede ser consultada en forma local o remota aprovechando las redes de computadora actuales. Donde existe una enorme aportación gracias a la definición digital, es en el hecho de que la imagen puede ser modificada. Mediante este proceso es factible mejorar la precisión del registro y, como se vió detenidamente en el desarrollo del trabajo, existe una serie de deformaciones que pueden ser corregidas *i.e.*, la iluminación y la distorsión perspectiva y óptica.

En otros casos, el uso de las herramientas de cómputo permite realizar actividades totalmente nuevas. Éste sería el caso de la parte analítica de los daños del mural gracias al uso de las técnicas de procesamiento digital de imágenes. De esta manera, se abre un espectro de posibilidades aprovechando la superioridad de las computadoras para procesar información en cuanto a velocidad, realizar cálculos y extraer información que no era evidente por encontrarse originalmente mezclada con muchos otros elementos.

En el caso de las alternativas de visualización a partir de modelos tridimensionales, los alcances de la metodología empleada realmente no tienen precedentes. La imagen misma tiene una génesis distinta respecto a la imagen dibujada, ya que es el resultado de un cálculo en el cual se pueden hacer intervenir numerosos factores que influyen en el logro del realismo. Adicionalmente al hecho de ubicar un ojo virtual para percibir la volumetría, es posible añadir elementos como materiales, iluminación y parámetros ambientales. Se obtienen así imágenes con un alto grado de realismo. Sin embargo, este proceso debe ser aplicado cuidadosamente para no incurrir en un un “simulacro” de la realidad, lo cual se vuelve muy peligroso. Por ejemplo, es muy fácil cambiar la percepción de un ambiente arquitectónico inventando una iluminación “teatral” en vez de simular su iluminación real. A su vez, aplicando las técnicas de iluminación apropiadamente, es posible lograr imágenes realistas de una arquitectura ya desaparecida.

Cabe preguntar: ¿qué tan interesante es la búsqueda del “realismo absoluto”, *i.e.*, llegar a perder la capacidad de distinguir lo real de lo virtual? ¿Pretende acaso esta búsqueda que lo falso

se considere como verdadero, corriendo el riesgo de que lo real se considere aburrido y demasiado lleno de defectos? ¿Podría considerarse que se incurre en una “espectacularización” del monumento?

El objeto antiguo tal como lo vemos, es una versión del objeto original, y de éste percibimos su metamorfosis a través del tiempo. Lejos está de ser lo que fue originalmente y no por ello puede decirse que constituye una falsedad, sino que es justamente la transformación real del objeto original. Es totalmente equivocado pensar que la restitución parcial, con una mínima intervención permite conservar lo auténtico de un edificio, o que la iglesia gótica sin sus acabados de pintura sea representativa de lo que fue originalmente. Las grandes polémicas sobre lo apropiado de conservar o no la patina de una pintura de caballete encuentran argumentos tan válidos en su favor como en su contra. Qué es más falso o más verdadero (si fuera factible medir estos conceptos) ¿regresar la obra a un estado remoto ignorando los efectos del tiempo transcurrido? o ¿tener un cuadro que muestre en éste los efectos del tiempo?

En este sentido, la reconstrucción virtual y su visualización deben ser consideradas como un complemento para la restitución del sitio a su estado actual y es allí donde adquieren un valor excepcional, pues su aporte se ubica como una alternativa al conflicto entre las dos posturas anteriores. Permiten “ver” el sitio en su estado original sin intervenirlo. Por ello, al plasmar los resultados de las investigaciones en una forma visual que resulta fácilmente entendible y por consecuencia didáctica, hacen que la historia se vuelva más accesible. Se permite así que el visitante de los sitios pueda tener una visión del espacio arquitectónico, compare lo que ve con la imagen de la reconstrucción, la critique, y comprenda mejor la información arqueológica.

Adicionalmente, la visualización de la arquitectura retroalimenta su estudio en su forma subjetiva. Existe una serie de componentes de la arquitectura que no son medibles cuantitativa o racionalmente y que pertenecen al orden sensorial, donde la visión juega un papel importante. En este sentido, la visualización se vuelve una herramienta fundamental para entender el valor de la arquitectura.

No hay duda que la forma más completa para experimentar el espacio arquitectónico es mediante la realidad virtual, cuando el usuario no es solamente espectador sino que pasa a una fase dinámica generando su propia experimentación, dentro del modelo tridimensional. La inmersión en la realidad virtual mediante implementos tecnológicos como el casco elimina el intermediarismo de la pantalla y ubica al observador en la realidad digital, aislado del exterior, posibilitando así la percepción sensorial del espacio.

Hubo varias aportaciones que merecen una mención especial durante el desarrollo del proyecto. En relación con la historia de Cacaxtla, se pudieron reubicar en el tiempo las estructuras visibles y proponer reconstrucciones de las cinco etapas constructivas previas a su abandono. Se encontraron algunas de las reglas de composición del sitio. Para ello, se estableció una metodología de trabajo donde se buscó restablecer el ideal constructivo del sitio, basándose en un cuidadoso estudio de las huellas arqueológicas. Parafraseando a Viollet-le-Duc, se puede afirmar que: “Restituir virtualmente a un edificio, no es describirlo, no es inventarlo, es restablecerlo a un estado de perfección que puede no haber existido en un momento dado, basándose en el estudio cuidadoso de las huellas arqueológicas”. Las imágenes obtenidas dieron una visión sorprendente del sitio, con una percepción de un espacio muy distinto de lo que se podía imaginar. Esto se debe al avanzado estado de destrucción de las estructuras, a la mezcla de elementos de diferentes épocas y también al hecho de que la iluminación de Cacaxtla y sus espacios están drásticamente modificados por la presencia de un techo.

Varios trabajos fueron publicados a nivel nacional e internacional sobre la integración del cómputo al estudio de un sitio arqueológico, en relación con su aspecto metodológico, los problemas encontrados, las limitantes de los sistemas de cómputo actuales, el problema de la iluminación en la síntesis de imágenes y la importancia que tiene el hacer una simulación de la iluminación basándose en las propiedades físicas de la luz.

En el caso del mural, se logró proponer una solución realista de digitalización, desglosando cada uno de los factores que intervienen en las decisiones de tal forma que la

metodología se pueda repetir para murales en condiciones distintas. Dicho trabajo también fue materia de publicación. Se desarrollaron los algoritmos de corrección de las imágenes y se mostró una posibilidad concreta de aprovechamiento de la información. Es un tema donde la componente arquitectónica es menos predominante y puede ser considerado como de naturaleza esencialmente técnica. Sin embargo, se trata de un tema importante ya que la conservación de la información relativa al patrimonio es parte de la memoria de la humanidad.

Resultó importante mostrar las capacidades de dos grandes áreas del cómputo gráfico, *i.e.*, el procesamiento digital y la síntesis de imágenes, si se considera que éstas son complementarias y que en los últimos años se han ido integrando con mayor medida. Una consecuencia de sus aplicaciones consiste en ofrecer soluciones a los sistemas de realidad virtual para abordar los problemas de cálculo en tiempo real así, como plantear alternativas en los problemas de navegación en ambientes virtuales.

Finalmente, esta tesis abre el espacio para diferentes líneas de trabajo que consisten en la explotación de los modelos virtuales de Cacaxtla. Se están desarrollando varios proyectos y tesis como continuidad del trabajo de reconstrucción para llevar a Cacaxtla a un sistema completo de realidad virtual reuniendo a su alrededor los distintos investigadores que han trabajado estos temas. En éste se incluye la inmersión, visión estereoscópica e interacción con el medio virtual para visitarlo no sólo en el espacio sino también en el tiempo, saltando de una época de construcción a otra. Los problemas a resolver son múltiples, desembocan en distintos temas de investigación para resolver los problemas de interfases, calidad y velocidad, por tanto, requieren de conocimientos más de orden del cómputo que de arquitectura.

En la medida en que se mejoren las herramientas de visualización será factible obtener mayor realismo y por consecuencia una percepción más exacta del espacio mesoamericano. La falta de calidad visual de los sistemas genera todavía cierto rechazo de estas tecnologías por parte de los arquitectos, pero es necesario reubicarlas dentro del marco de la evolución de las herramientas, donde las exigencias por parte de los arquitectos permiten la retroalimentación de

los desarrollos de cómputo. Éstos habían sido generalmente impulsados por la industria armamentista, sin embargo por primera vez en su historia es la arquitectura el campo que resulta más beneficiado por un desarrollo tecnológico porque es en éste donde la realidad virtual encuentra su aplicación más completa.

Puede preverse que en el futuro cercano, la incorporación de la herramienta del cómputo moderno a la arquitectura le significará un campo novedoso desde el cual se podrán hacer contribuciones importantes en la tarea del estudio y del rescate del patrimonio cultural.

Bibliografía

HERRAMIENTAS DE CÓMPUTO

- Bertin J., 1988, *La gráfica y el tratamiento gráfico de la información*, Taurus Comunicación, colección "Noesis de comunicación", Taurus ediciones, Madrid.
- Bertol D., Foell D., 1997, *Designing Digital Space, an architect's guide to virtual reality*, John Wiley.
- Chirrollet J.-Cl., 1994, *Esthétique et technoscience pour la culture techno-esthétique*, Philosophie et langage, Mardaga, Lieja.
- Couwenbergh J.-P., 1998, *La synthèse d'images du réel au virtuel*, Marabout, Allier, Belgique.
- Drap P., 1997, *Photogrammétrie et modèles architecturaux*, Thèse d'informatique, gamsau, Université Aix-Marseille III.
- Feldgoise J., Dorsey J., Agrawala M., Beers A., Fröhlich B., Hanrahan P., 1997, "Architectural Applications and the Responsive Workbench", en *Designing Digital Space*, Bertol D., John Wiley.
- Foley D. J., vanDam A., Feiner K. St., Hughes F. J., 1990, *Computer Graphics, principles and practice*, Addison-Wesley Publishing Company.
- Lucet G., 1998a, "Comparación de resultados en simulación de iluminación natural", memorias de *Computación Visual 98*, DGSCA-Fac. De Ciencias, UNAM, México.
- Lucet G., 1998b, "Illumination and the virtual reconstruction of archaeological sites", *Computer Applications in Archaeology*, Barcelona.
- Quéau P., 1993, *Le virtual, vertus et vertiges*, Col. Milieux, ed. Champ Vallon, INA, Francia.

Vince J., 1995, *Virtual reality systems*, Addison-Wesley Publishing Company.

Watt A., Policarpo F., 1998, *The Computer Image*, Addison-Wesley Longman Limited.

Zevi B., 1959, *Apprendre à voir l'architecture*, Les éditions de Minuit, Paris.

RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL DE CACAXTLA

Aveni A. F., Gibbs S. L., 1976, "The orientation of precolumbian buildings in central Mexico", *American Antiquity*, vol. 41, 4, 510-517.

Aveni A., 1986, "The Real Venus-Kukulcan in the Maya inscriptions and Alignments", *Sixth Palenque Round Table, 1986*, Merle Greene Robertson, Gal. editor, Virginia M. Fields, Vol. editor, University of Oklahoma Press: Norman and London.

Baird T. E., 1989, "Stars and War at Cacaxtla", en *Mesoamerica after the Decline of Teotihuacan a. d. 700-900*, R. A. Diehl y J. C. Berlo (ed.), Dumbarton Oaks Research Library and Collection, Washington.

Carlson B. J., 1993, "Rise and Fall of the City of the Gods", *Archaeology*, nov-dic, 58-69.

Carter H., 1993, *La tumba de Tutankhamón*, Ediciones Destino, México.

Chanfón C., 1978, *La geometría y la piedra del sol*, ed. Churubusco, México.

Collins F., Williams D., Haak R., Trux M., Herz H., Genevriez L., Nicot P., Brault P., Coyere X., Krause B., Kluckow J., Paffenholz A., 1995, "The Dresden Frauenkirche, rebuilding the past", *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, 1993*, Wilcock J. y Lockyear K. (ed.), Staffordshire University, U.K..

Delgadillo Torres R. y Santana Sandoval A., 1984, *Los enterramientos humanos de Cacaxtla, Tlaxcala*, Homenaje a Ignacio Marquina, UDLA, México.

Eco U., 1985, *La guerre du faux*, Le livre de poche, Éditions Grasset & Fasquelle, Paris.

Foncerrada de Molina M., 1976, "La pintura mural de Cacaxtla, Tlaxcala", *Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas*, UNAM, núm. 46, México, 5-19.

- Foncerrada de Molina M., 1976, "La pintura mural de Cacaxtla, Tlaxcala", *Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas*, UNAM, núm. 46, México, 5-19.
- Foncerrada de Molina M., 1980, "La pintura mural de Cacaxtla", *XVII Congreso Internacional de Americanistas*, Vol. VIII, París, 321-335.
- Foncerrada de Molina M., 1982, "Signos glíficos relacionados con Tláloc en los murales de La Batalla en Cacaxtla", *Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas*, núm. 50-1, UNAM.
- Foncerrada de Molina M., 1983, "Los murales de Cacaxtla: muerte en la guerra", *Jahrbuch für Geschichte von Staat, Wirtschaft und Gesellschaft lateinamerikas*, tomo 20, 537-562. traducción en *Antología de Cacaxtla*, García Cook A. y Merino Carrión B. L. (eds.).
- Foncerrada de Molina M., 1993, *Cacaxtla la iconografía de los olmeca-xicalanca*, Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM.
- García Cook A., 1991, *Guía Oficial Cacaxtla-Tizatlán*, INAH-SALVAT.
- García Cook A., Merino Carrión B.L., 1995, *Antología de Cacaxtla*, vol. I y II, Serie Arqueología, INAH.
- Gendrop P., Heyden D., 1973, *Architecture Mésoaméricaine*, reimpresión 1994, Histoire de l'architecture, Gallimard/Electa, Electa Milán.
- Hammond N., 1991, "Matrices and Maya Archaeology", *Journal of Field Archaeology*, vol. 18, 1991.
- Hartung H., 1986, "Puntos y líneas de referencia en la arquitectura maya", *Cuadernos de arquitectura mesoamericana*, Facultad de Arquitectura, UNAM, 8.
- Kubler G., 1978, "Eclecticism at Cacaxtla", *Third Palenque Round Table*, Merle Greene Robertson, University of Texas, Austin, vol. 2.
- Lombardo de Ruiz S., 1978, "Contribución del estudio de la forma a la iconografía de los murales de Cacaxtla", *Comunicaciones*, FAIC, Puebla, 149-160, en *Antología de Cacaxtla*, García Cook A., Merino Carrión B. L. (eds.).

- Lombardo de Ruiz S., 1986, *Las pinturas de Cacaxtla*, Historias, INAH, núm. 12.
- López de Molina D., Molina D., 1976, "Los murales de Cacaxtla", *Boletín del Instituto Nacional de Antropología e Historia*, INAH, México, época 2, núm. 16.
- López de Molina D., 1977, "Cacaxtla y su relación con otras áreas mesoamericanas", *XV Mesa Redonda de la sociedad mexicana de antropología*, SMA, México.
- López de Molina D., 1979, "Excavaciones en Cacaxtla, tercera temporada", *Comunicaciones*, 16.
- López de Molina D., 1980, "Relación entre Cacaxtla y el Golfo de México", *XVI Mesa Redonda de la Sociedad Mexicana de Antropología*, tomo 1, SMA, México.
- López de Molina D., 1981, "Un informe preliminar sobre la cronología de Cacaxtla", en *Interacción cultural en México Central* (E. Rattray, J. Litvak, y C. Díaz (eds.)), UNAM.
- Lucet G., 1997, "The virtual restitution of the mesoamerican site of Cacaxtla: a methodological point of view", *Archeologia e Calcolatoria*, 8.
- Lucet G., en proceso, "Study of column and intercolumn spaces in Cacaxtla".
- Lucet G., Casas A., Lupone Cl., 1994, "Studies on the finish of structures at the mesoamerican site of Cacaxtla, and its representation by computerized rendering", *Materials issues in art and archaeology IV*.
- Lucet G., Lupone Cl., 1994, "A computerised register of pre-hispanic architecture", *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, 1993*, Wilcock J. y Lockyear K. (ed.), Staffordshire University, U.K..
- Lucet G., 1995, *La restauración razonada, teoría de Viollet-le-Duc en el siglo XIX*, tesis de maestría, Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lucet G., Casas A., Godoy V., 1998a, "Comparación de resultados en simulación de iluminación natural", en memorias de *Computación Visual 98*, DGSCA-Fac. De Ciencias, UNAM.
- Lucet G., 1998b, "Illumination and the virtual reconstruction of archaeological sites", *Computer Applications in Archaeology*, Barcelona.
- Lupone Cl., *Documentación por computadora para fines de restauración de sitios arqueológicos*, Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía, INAH, tesis en proceso.

- Machado A., 1992, "El imaginario numérico: simulación y síntesis", *Acta Poetica*, núm. 13, primavera 1992, traducción del portugués de César González Ochoa.
- Marquina I., 1951, *Arquitectura prehispánica*, INAH, versión facsimilar, 1990.
- Millon R., 1967, "Teotihuacan", reprinted en *Scientific American*, ed. especial vol. 5-1. 1994.
- Molina Feal D., 1977, "Consideraciones sobre la cronología de Cacaxtla", *XV mesa redonda de la sociedad mexicana de antropología*, tomo 2, SMA, México, 1977.
- Molina Feal D., 1978, La investigación arqueológica en Cacaxtla, Tlaxcala, *Boletín del Museo del hombre dominicano*, Edit. Cultural Dominicana S.A, Año 7, núm 9.
- Muñoz Camargo D., 1995, "Historia de Tlaxcala, capítulo III", en *Antología de Cacaxtla*, compiladores: Ángel García Cook y Beatriz Leonor Merino Carrión, INAH.
- Nagao D., 1989, "Proclamación pública en el arte de Cacaxtla y Xochicalco", *Mesoamerica after the Decline of Teotihuacan A.d. 700-900*, R. A. Diehl y D. C. Berlo (eds.), Dumbarton Oaks Research Library and Collection, Washington.
- Paice P., 1991, "Extensions to the Harris Matrix System to Illustrate Stratigraphic Discussion of an Archaeological Site", *Journal of Field Archaeology*, vol. 18.
- Peterson D. A., 1984, "Relaciones prehistóricas entre el valle de Puebla-Tlaxcala y la región maya", *XVII Mesa redonda de la Sociedad Mexicana de Antropología*, SMA, México.
- Proskouriakoff T., 1950, *An album of Maya Architecture*, Carnegie Institution, Washington.
- Salas S., *Análisis del contenido gráfico de la pintura mural del sitio arqueológico de Cacaxtla y su restitución por computadora*, Escuela Nacional de Artes Plásticas, UNAM, tesis en proceso.
- Santana Sandoval A., 1990, "Ubicación cronológica del Gran Basamento y sus pinturas en Cacaxtla", en *Proyecto de investigación y conservación*, Gobierno del Estado de Tlaxcala-INAH.
- Santana Sandoval A., Delgadillo Torres R., "Cacaxtla durante la transición del periodo Clásico al Postclásico", *Mesoamérica y el norte de México siglos IX-XII*, Federica Sodi Miranda (coord.), MNA-INAH, México.

- Santana Sandoval A., Vergara Verdejo S., 1990, "Cacaxtla, su arquitectura y pintura mural: nuevos elementos para su análisis", *La época clásica: nuevos hallazgos, nuevas ideas*, Amalia Cardós de Méndez (coord), MNA-INAH.
- Sugiyama Saburo, 1993, "Worldview materialized in Teotihuacan, Mexico", *Latin American Antiquity*, vol. 4, No. 2.
- Tavernor R., 1995, "Architectural history and computing: developing a new discipline", *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, 1993*, Wilcock J. y Lockyear K. (ed.), Staffordshire University, U.K..
- Viollet-le-Duc E., 1854, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI au XVI siècle*, A. Morel. Paris.
- Zevi B., 1959, *Apprendre à voir l'architecture*, Les éditions de Minuit, Paris.

DIGITALIZACIÓN DEL MURAL O'GORMAN

- Andrews C., May/June 1995, "Color management put PhotoCD images in the big leagues", *Color Publishing*.
- Applbaum N., Horowitz W. y H. Applbaum Y. H., 1994, "Computed tomography imaging of sealed clay cuneiform tables", *Imaging the past, Electronic Imaging and Computer Graphics in Museum and Archaeology*, British Museum.
- Awcock G. J., Thomas R., 1996, *Applied Image Processing*, McGraw-Hill.
- Billinge R., Cupitt J., Dessipris N., Saunders D., 1992, "A note on an improved procedure for the rapid assembly of infrared reflectogram mosaics", *Studies in Conservation*, 38.
- Burmester A., Bayerer F., 1993, "Towards improved infrared reflectograms", *Studies in Conservation*, 38.
- Canny, J.F., 1983, "Finding edges and lines in images", *M.I.T. Artif. Intell. Lab*, Cambridge, MA, TR-720.

- Chahine H., Cupitt J., Saunders D. y Martinez K., 1994, "Analysis of colour change during the cleaning of paintings and the development of a model for predicting appearance", *Imaging the past, Electronic Imaging and Computer Graphics in Museum and Archaeology*, British Museum.
- Chanfón O. C., 1985, *Fundamentos teóricos de la restauración*, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Arquitectura, UNAM.
- Foley D. J., Van Dam A., Feiner K. S., Hugues F. J. ,1991, *Computer Graphics, principles and practice*, Addison-Wesley, 2nd. ed.
- Forte M.,1995, "Archaeology and computer image processing: applications in the aerial photographs analysis and the perspectives in the landscape navigation", *Aplicaciones Informáticas en Arqueología: Teorías y sistemas*, Saint-Germain-en-Laye, 1991, ed. L. Valdés, I. Arenal e I. Pujana, editorial Denboraren Argia, Bilbao.
- Fraser Bruce, 1995, "Seven Steps to Superior Scans", *MacUser*, Enero.
- Garza-Jinich M., Meer P., Medina V., 1996, "Robust retrieval of 3D structures from magnetic resonance images", *Reportes de investigación*, IIMAS, UNAM.
- González C. R. y Woods E. R., 1992, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing Company.
- Guglielmo C., 1993, "Photo CD: The big Picture", *MacUser*, Mayo.
- Horaud R., Monga O., *Vision par ordinateur, outils fondamentaux*, Traité des Nouvelles Technologies, Hermès, París, 1993.
- Hughes S., 1994, "3D reconstruction of an ancient egyptian mummy", *Imaging the past, Electronic Imaging and Computer Graphics in Museum and Archaeology*, British Museum, Nov.
- Jeffery D., 1989, "A Renaissance", *National Geographic*, Diciembre.
- Jones R., 1995, *Report on research at Pompeii, 1994*, correo electrónico AIA List Digest, 17-01-1995.

- Kiernan S.K., 1994, "Digital Preservation, Restoration, and Dissemination of Medieval Manuscripts", *Scholarly Publishing on the Electronic Networks*, Proceedings of the Third Symposium, ARL Publications.
- Lange E., 1994, "Development of an On-Site Digital Imaging System for Site Documentation", *Imaging the past, Electronic Imaging and Computer Graphics in Museum and Archaeology*, British Museum, Noviembre.
- Larish J., 1994, *Photo CD: Quality photos at your Fingertips*, Micro Publishing Press, Torrance, California.
- Lucet G., 1995, *La restauración razonada, teoría de Viollet-le-Duc en el siglo XIX*, tesis de maestría, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Arquitectura, UNAM.
- Lucet G., Casas A., Chanfón C., 1996, "Digitization of the O'Gorman's mural at the Central Library of the National University of Mexico", *Archeologia e Calcolatori*, 7.
- Lupone Cl., en proceso, *Documentación por computadora para fines de restauración de sitios arqueológicos*, Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía, INAH, Tesis.
- Necci M., 1992, *La fotografía archeologica*, La Nuova Italia Scientifica, Roma.
- Robinson P., 1993, *The digitization of Primary Textual Sources*, "Office for Humanities Communication Publications", 4, Oxford University, Oxford.
- Roth S., 1993, "Halftone demystified", *Macworld*, febrero.
- Roth S., 1994, "Make great scans", *Macworld*, febrero.
- Russ C. J., *The image processing handbook*, 1992, CRC Press.
- SIGGRAPH, 1993, "Introduction to Scientific visualization, tools and techniques", Course notes 02, Siggraph 93, Anaheim, USA.
- Torices A. L., 1993a, "México prehispánico como base de la monumental obra", *Gaceta Universitaria*, 15 de nov.
- Torices A. L., 1993b, "Los murales de la Biblioteca Central hablan de México y su historia", *Gaceta Universitaria*, 29 de nov.

- Torres M. L., 1990, *Informe del examen preliminar de la condición material del mural de Juan O'Gorman en la Biblioteca Central de Ciudad Universitaria.*
- Torres M. L., 1991, *The Juan O'Gorman's Murals at the Central Library of the University of Mexico: preliminary examination of its deterioration and conservation problems.*
- Torres M. L., 1992, *Propuesta para la consolidación y fijado de los fragmentos de piedra del mural de Juan O'Gorman en la Biblioteca Central de Ciudad Universitaria.*
- Torres M.L., Reyes G.M., Bravo H., Gómez-Urquiza M., 1993, "The Influence of the Materials of Juan O'Gorman's Murals on the Central Library of the University of Mexico", 86th. *Annual Meeting of Air & Waste Management*, Denver, Col.
- Wolberg G., 1964, *Digital Image Warping*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CS, ed. 1990.

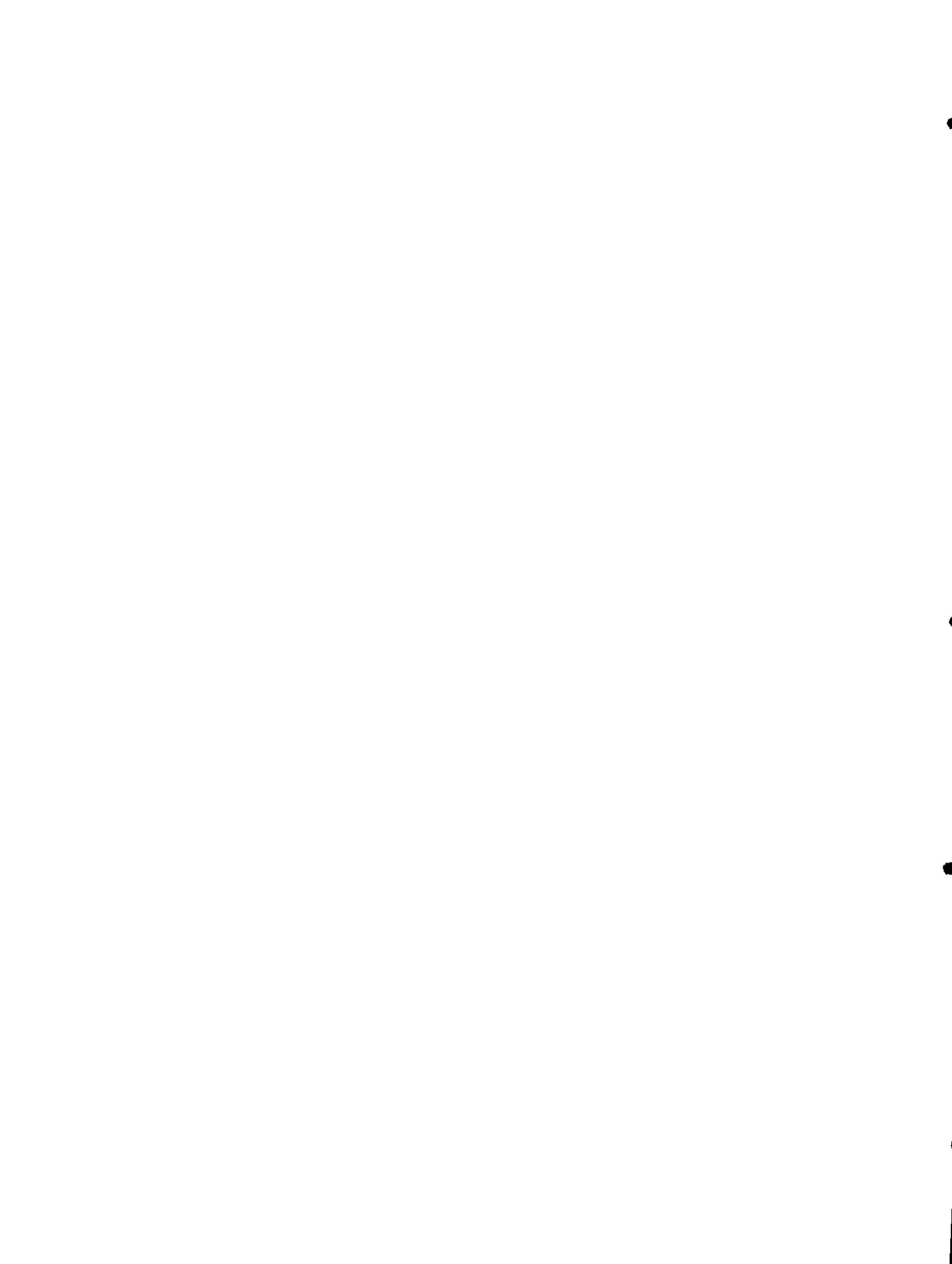
Tabla de figuras

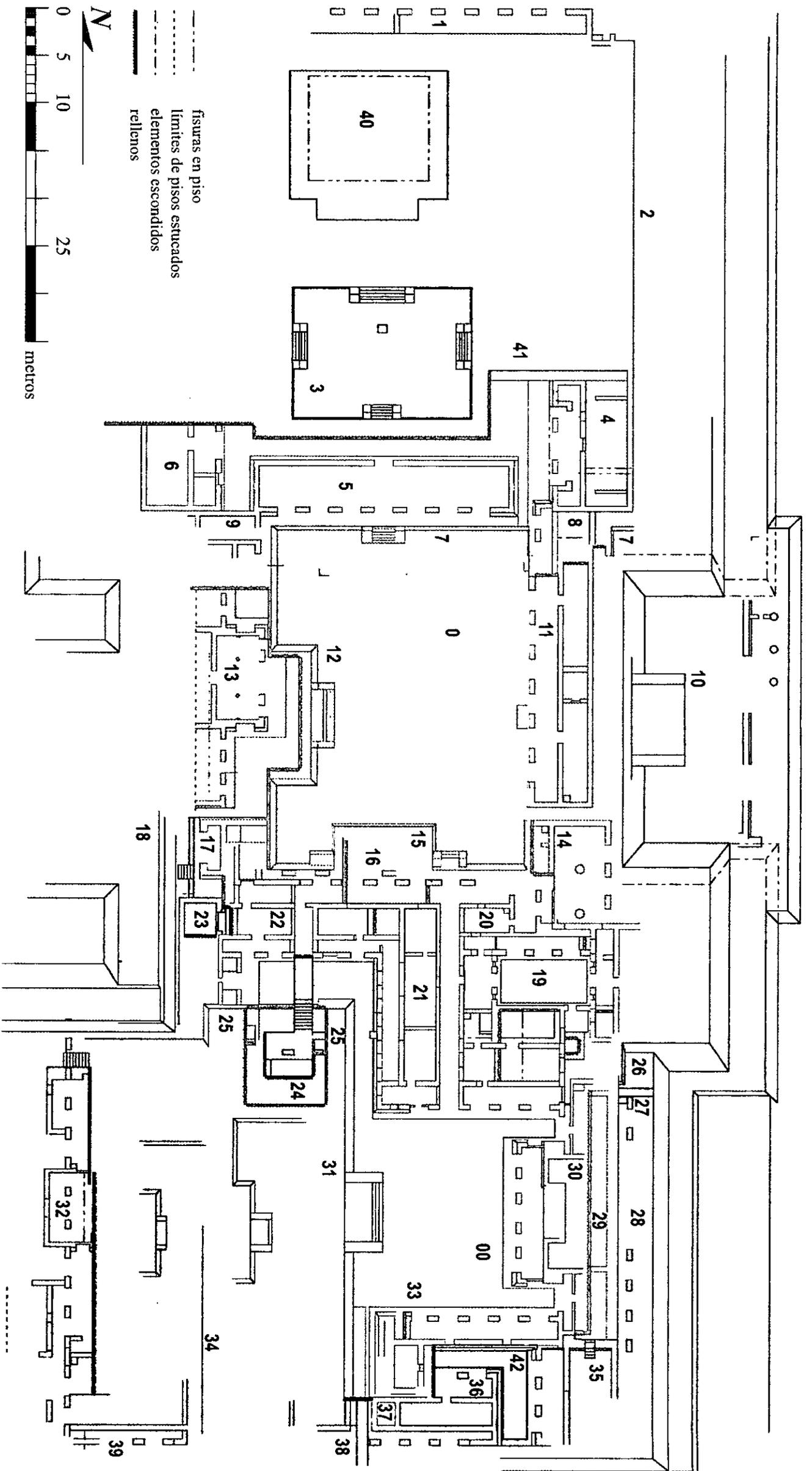
Figura 1.	Castillo de Pierrefonds, Francia.	14
Figura 2.	Toma fotográfica inicial y la imagen obtenida después de su procesamiento para resaltar contrastes.	16
Figura 3.	Esquema de los procesos para obtener una imagen con fotorrealismo.	27
Figura 4.	Modelado de volúmenes con la extrusión de un cuadrado.	32
Figura 5.	Modelado de volúmenes a partir de la revolución de un cuadrado.	32
Figura 6.	Modelado con malla.	33
Figura 7.	Modelado con operaciones booleanas de intersección y de unión de un cubo con un cilindro.	34
Figura 8.	Figuras vistas como estructura de alambre.	36
Figura 9.	Figuras con el cálculo de las aristas visibles.	36
Figura 10.	Mapeo de textura y textura tridimensional.	38
Figura 11.	Modelado de un bajorrelieve "restituido" de Cacaxtla con la técnica de displacement mapping.	39
Figura 12.	Esferas con acabados mate, semimate (plástico) y brillante (metal).	40
Figura 13.	Tipos básicos de luces, luz global, dirigida, de tipo foco y de tipo spot.	41
Figura 14.	Cacaxtla, Templo Rojo. Cálculo con iluminación local.	43
Figura 15.	Cacaxtla, Templo Rojo. Cálculo con ray tracing.	45
Figura 16.	Cacaxtla, Templo Rojo. Cálculo con radiosidad.	46
Figura 17.	Iluminación escenográfica de una escena.	48
Figura 18.	Integración de varios elementos en un sistema de realidad virtual.	56
Figura 19.	Ubicación del sitio arqueológico de Cacaxtla.	81
Figura 20.	Plano general de la zona arqueológica.	84
Figura 21.	Digitalización del plano general del "Gran Basamento"	86
Figura 22.	Talud-tablero característico de Cacaxtla. Edificio F.	97
Figura 23.	Talud-tablero del edificio E.	98
Figura 24.	Del lado izquierdo: pintura de La Batalla sobre talud. De frente: retorno de la escalera central.	126
Figura 25.	En primer plano: el edificio D; en el fondo: el edificio de las columnas.	128
Figura 26.	Patio de los Rombos, estado actual.	135
Figura 27.	La celosía.	144
Figura 28.	Copán. (1) El juego de pelota. (Marquina)	147
Figura 29.	El material inicial combinado con funciones aleatorias para obtener el estuco liso agregando polvo y el estuco rugoso agregando polvo y turbulencia de la superficie.	158
Figura 30.	Conjunto F y Celosía. Reconstrucción digital. Imágenes obtenidas con RenderMan.	163
Figura 31.	El edificio A. Reconstrucción digital. Vista desde el interior del pórtico y desde el aposento. Cálculo con radiosidad y ray tracing utilizando Lightscape.	163
Figura 32.	El cuarto de Venus. Reconstrucción digital. Diferencias de resultados en iluminación con a) iluminación local, RenderMan; b) ray tracing, Alias; c) radiosidad, BlueMoon; d) radiosidad para simulación de iluminación real, Lightscape.	163
Figura 33.	Secuencia de imágenes mostrando la evolución del Templo Rojo.	164
Figura 34.	Fotografía de las fachadas sur y oriente.	175
Figura 35.	Muestra de las piedras que fueron utilizadas para la realización del mural.	175
Figura 36.	Ejemplo de daños del mural, caída de piedras.	179
Figura 37.	Ejemplo de daños del mural, enfermedad de piedras.	180
Figura 38.	Ejemplo de daños del mural, estallamiento de placas.	181

Figura 39.	El espectro electromagnético.	200
Figura 40.	Toma con película de infrarrojo.	202
Figura 41.	Placa del mural utilizada para los estudios.	203
Figura 42.	Digitalización donde aparece el grano de la película.	208
Figura 43.	Esquema del efecto acumulado de la perspectiva y de la distorsión en la captura de la imagen.	211
Figura 44.	Damero digitalizado para estudiar la distorsión del sistema óptico.	212
Figura 45.	Esquema de iluminación directa.	213
Figura 46.	Esquema de iluminación indirecta.	214
Figura 47.	Fotografía de una placa gris para modelar la iluminación.	215
Figura 48.	Estructura para la toma fotográfica.	216
Figura 49.	Comparación de nitidez entre dos equipos.	220
Figura 50.	Imagen definida con 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 bits.	226
Figura 51.	Imagen en tonos de grises correspondiente al promedio de los canales RGB. En la parte inferior, el histograma correspondiente.	228
Figura 52.	El diagrama cromático CIE.	232
Figura 53.	Descomposición de la imagen en los canales C, a y b del modelo CIELab.	233
Figura 54.	El modelo RGB.	235
Figura 55.	Las imágenes en tonos de grises correspondientes a los canales R, G y B.	236
Figura 56.	El modelo HSV.	238
Figura 57.	Las imágenes en tonos de grises correspondientes a los canales H, S y V.	239
Figura 58.	Imágenes en tonos de grises correspondientes a los canales C, M, Y y K.	240
Figura 59.	Imágenes en tonos de grises de los canales correspondientes a XR, XG y XB.	242
Figura 60.	Imágenes en tonos de grises de los canales correspondientes al modelo RGB normalizado.	244
Figura 61.	Imágenes en tonos de grises de los canales del modelo YIQ.	246
Figura 62.	Imagen después de la corrección de iluminación.	249
Figura 63.	Separación por zonas utilizando intersecciones de imágenes.	258
Figura 64.	Eliminación de pequeñas zonas.	259
Figura 65.	Contornos de las distintas zonas encontradas.	261
Figura 66.	Relleno con tonos de grises de las distintas zonas.	261
Figura 67.	Superposición de la imagen original con los contornos detectados.	262

Lista de láminas

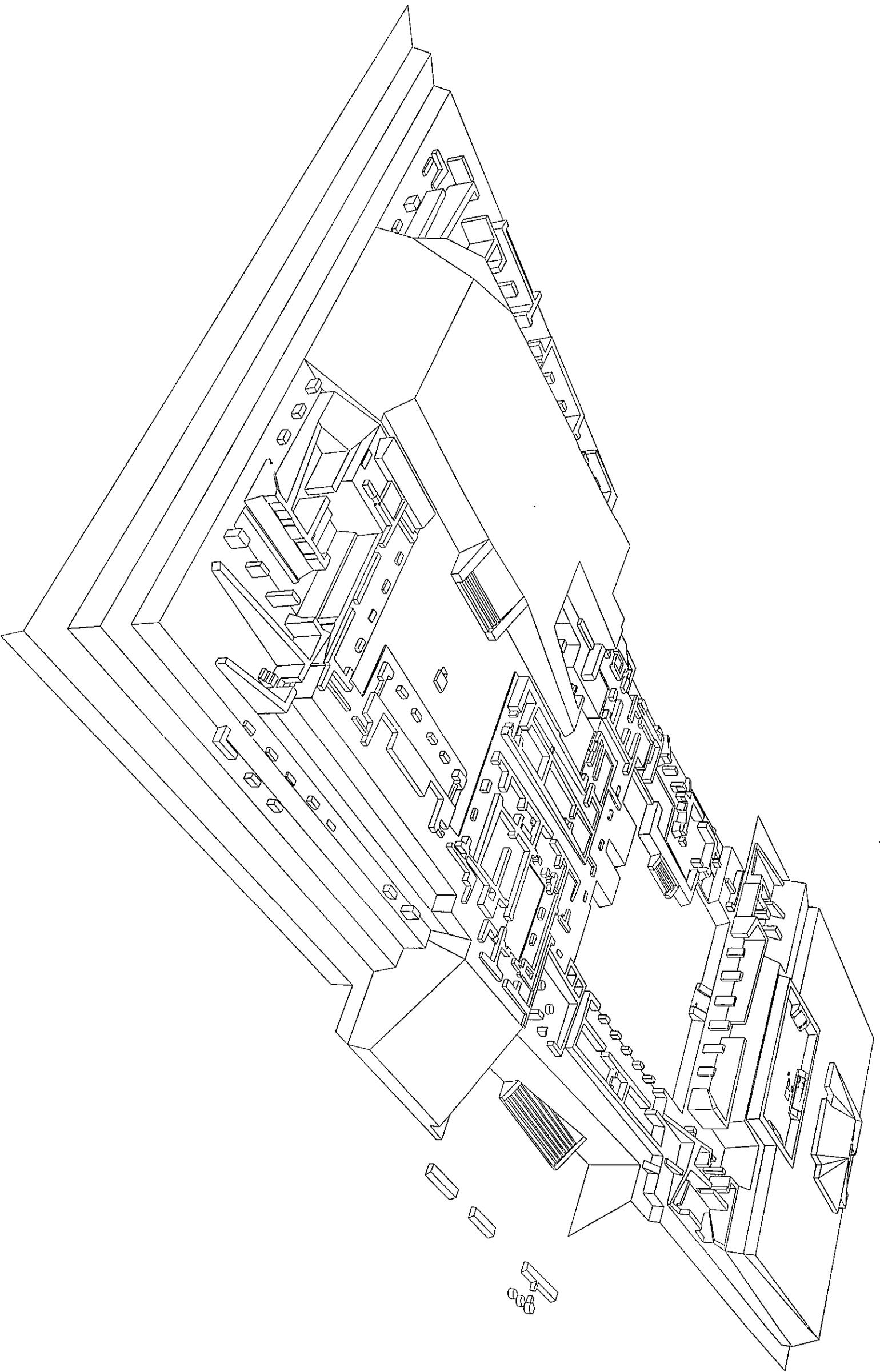
- lámina 1. Plano general de Cacaxtla. Levantamiento simplificado.
- lámina 2. Perspectiva general del estado actual del sitio. Modelo 3D. (Lucet, Lupone)
- lámina 3. Definición de los conjuntos de estructuras.
- lámina 4. Ubicación de la pintura mural.
- lámina 5. Vista actual del interior del edificio A.
- lámina 6. Jambas norte y sur de la puerta interior del edificio A. Murales de los danzantes. Estado actual y restitución.
- lámina 7. Murales restituidos del pórtico del edificio A. Hombre jaguar, bajorelieve y hombre águila.
- lámina 8. Calca del mural del aposento del edificio A. Mural de las serpientes entrelazadas.
- lámina 9. Mural de la batalla. (restitución Selene Salas, según Francisco Villaseñor Bello)
- lámina 10. Bajo relieve del edificio E y pintura de los hombres caminando (edificio F).
- lámina 11. Templo rojo, estado actual.
- lámina 12. Murales restituidos del templo rojo. Cenefa del pasillo, rana jaguar y viejo con cacaxtli.
- lámina 13. Piso pintado del templo rojo. Los esqueletos y los íconos.
- lámina 14. Murales de la mujer y del hombre Alacrán.
- lámina 15. Ubicación de los guardapolvos.
- lámina 16. Ubicación de los taludes-tableros.
- lámina 17. Ejes centrales de edificios marcados por las puertas y los entrecolumnas.
- lámina 18. Ejes de simetría de espacios exteriores y ejes secundarios.
- lámina 19. Geometría de las plazas.
- lámina 20. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 1.
- láminas 21. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 2 y 3.
- lámina 22. Fases 2 y 3, perspectiva de la reconstrucción hipotética.
- láminas 23 y 24. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 4. Planta alta y planta baja.
- lámina 25. Fase 4, perspectiva de la reconstrucción hipotética.
- lámina 26. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 5.
- lámina 27. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 6.
- lámina 28. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 7.
- lámina 29. Tabla cronológica.



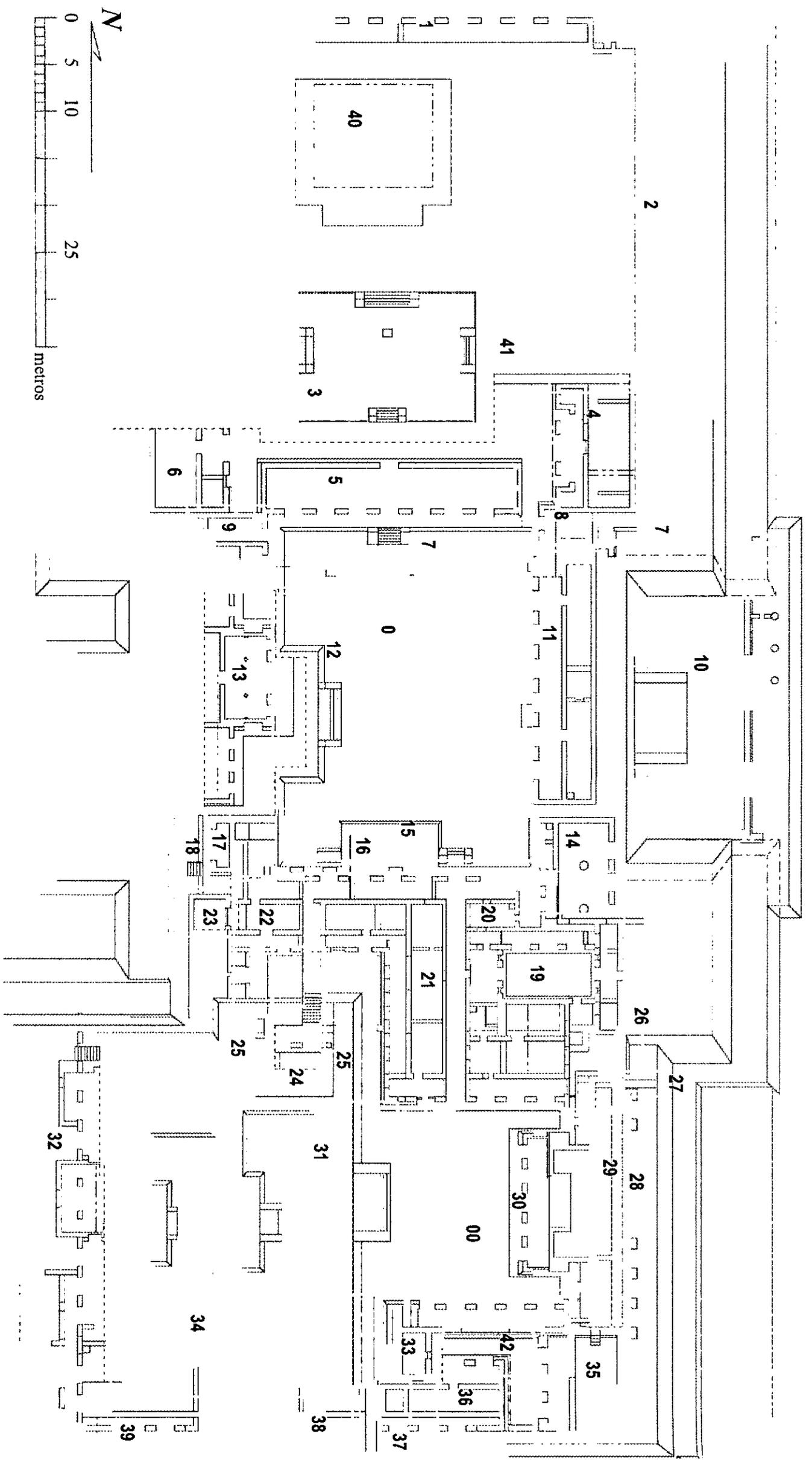


- | | | | | | | | | | |
|----|----------------------|----|-------------------------------|----|----------------------------|----|------------------------|----|----------------|
| 0 | plaza norte | 8 | superestructura del D | 17 | cuarto poniente | 26 | esquina de basamento | 35 | pórtico F |
| 00 | plaza de los altares | 9 | superestructura del E | 18 | escalera poniente | 27 | pequeño talud | 36 | edificio F |
| 1 | pórtico norte | 10 | escalera oriente | 19 | patio de los rombos | 28 | pórtico oriente | 37 | palacio VI |
| 2 | muro poniente | 11 | edificio D | 20 | palacio I | 29 | atrás del cuarto | 38 | talud |
| 3 | patio hundido | 12 | basamento piramidal | 21 | palacio II | 30 | palacio IV o pórtico A | 39 | pórtico sur |
| 4 | edificio A | 13 | edificio E | 22 | palacio III | 31 | basamento piramidal | 40 | montículo Y |
| 5 | edificio B | 14 | estruct. de las col. redondas | 23 | edificio de la celosía | 32 | conjunto de venus | 41 | talud |
| 6 | edificio C | 15 | desnivel | 24 | templo rojo | 33 | palacio V | 42 | muro con talud |
| 7 | talud de la batalla | 16 | columnas enterradas | 25 | superestr. del templo rojo | 34 | talud enterrado | | |

Lámina I. Plano general de Cacaxtla. Levantamiento simplificado.

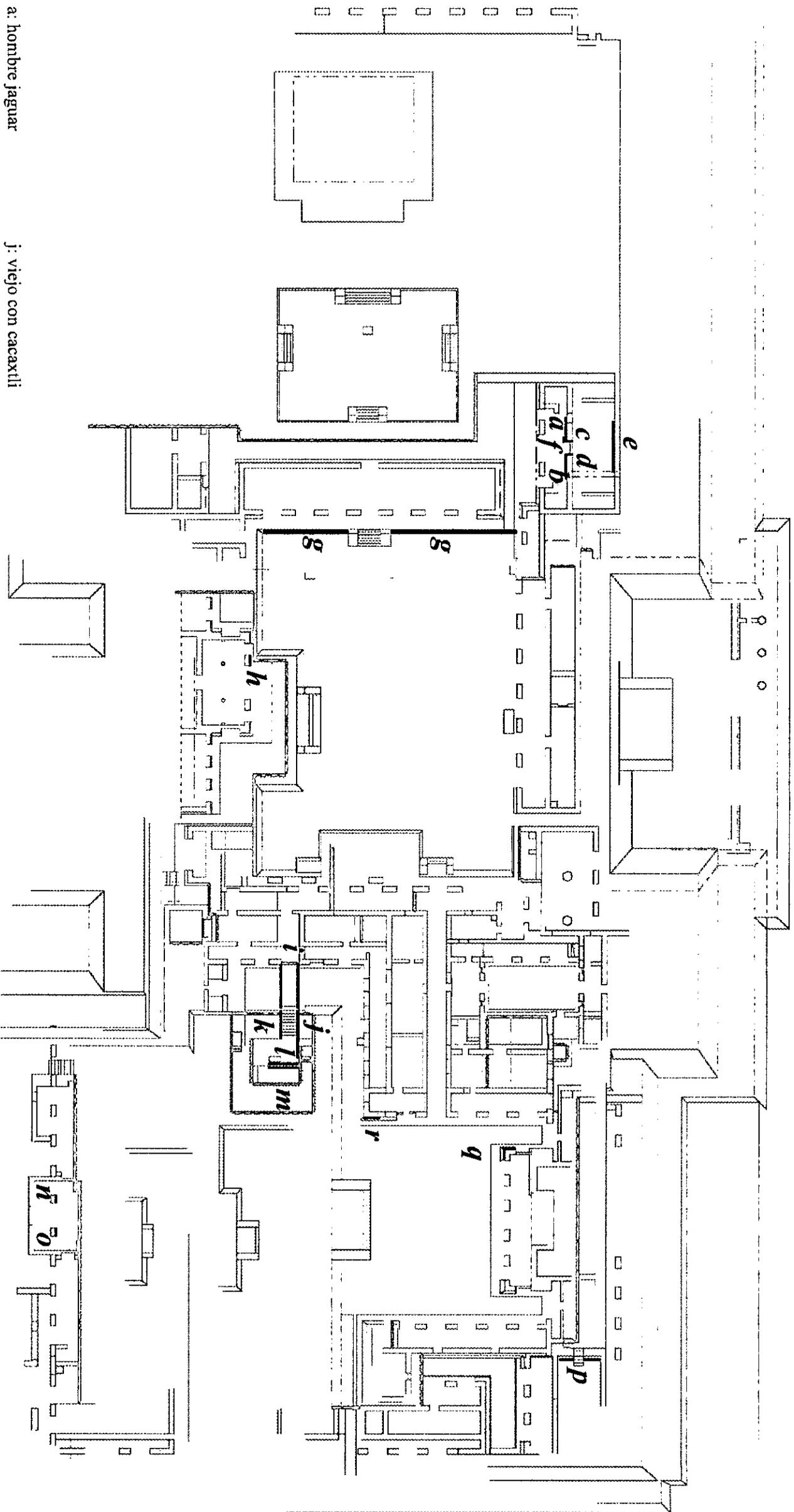


Lamina 2. Perspectiva general del estado actual del sitio. Modelo 3D. (Lucet, Lupone)



- 0 plaza norte
- 00 plaza de los altares
- 1 pórtico norte
- 2 muro poniente
- 3 patio hundido
- 4 edificio A
- 5 edificio B
- 6 edificio C
- 7 talud de la batalla
- 8 superestructura del D
- 9 superestructura del E
- 10 escalera oriente
- 11 edificio D
- 12 basamento piramidal
- 13 edificio E
- 14 estruct. de las col. redondas
- 15 desnivel
- 16 columnas enterradas
- 17 cuarto poniente
- 18 escalera poniente
- 19 patio de los rombos
- 20 palacio I
- 21 palacio II
- 22 palacio III
- 23 edificio de la celosía
- 24 templo rojo
- 25 superestr. del templo rojo
- 26 esquina de basamento
- 27 pequeño talud
- 28 pórtico oriente
- 29 atrás del cuarto
- 30 palacio IV o pórtico A
- 31 basamento piramidal
- 32 conjunto de venus
- 33 palacio V
- 34 talud enterrado
- 35 pórtico F
- 36 edificio F
- 37 palacio VI
- 38 talud
- 39 pórtico sur
- 40 montículo Y
- 41 talud
- 42 muro con talud

Lámina 3. Definición de los conjuntos de estructuras.

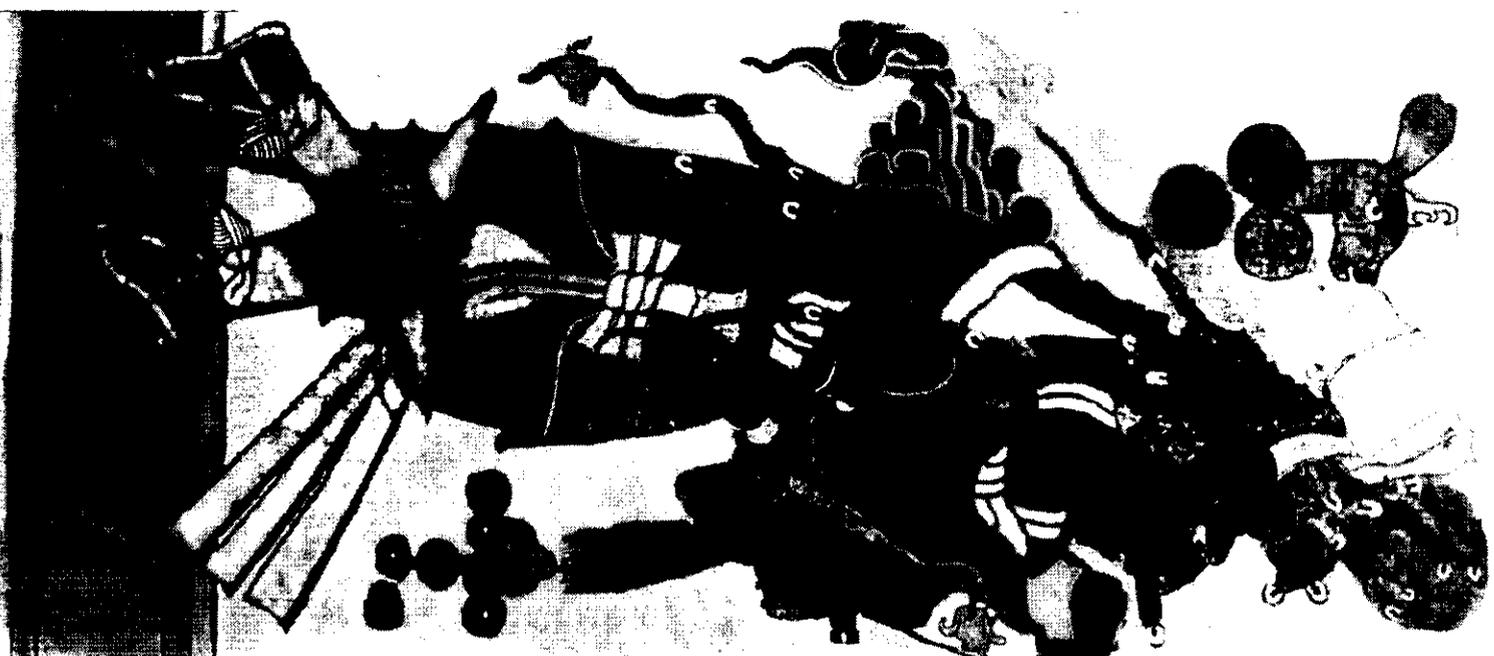
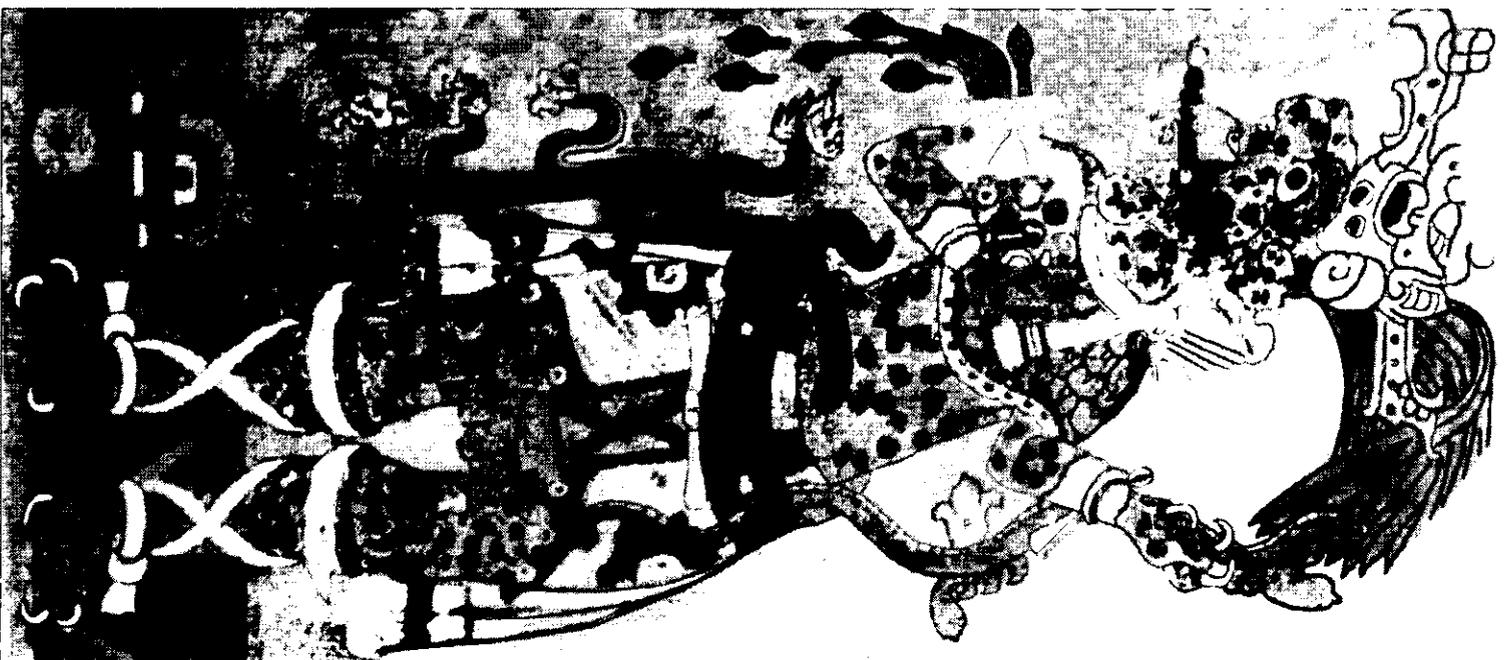


- a: hombre jaguar
- b: hombre águila
- c: danzante jaguar
- d: danzante con caracol
- e: serpientes entrelazadas
- f: bajo relieve del edificio A
- g: la batalla
- h: bajo relieve del edificio E
- i: cenefa del pasillo
- j: viejo con cacaxtli
- k: la rana jaguar
- l: esqueletos (en piso)
- m: íconos (parte vertical de la banqueta)
- n: hombre alacrán
- o: mujer
- p: hombres caminando
- q: talud pintado
- r: tablero pintado

Lámina 4. Ubicación de la pintura mural.

Lámina 5. Vista actual del interior del edificio A.



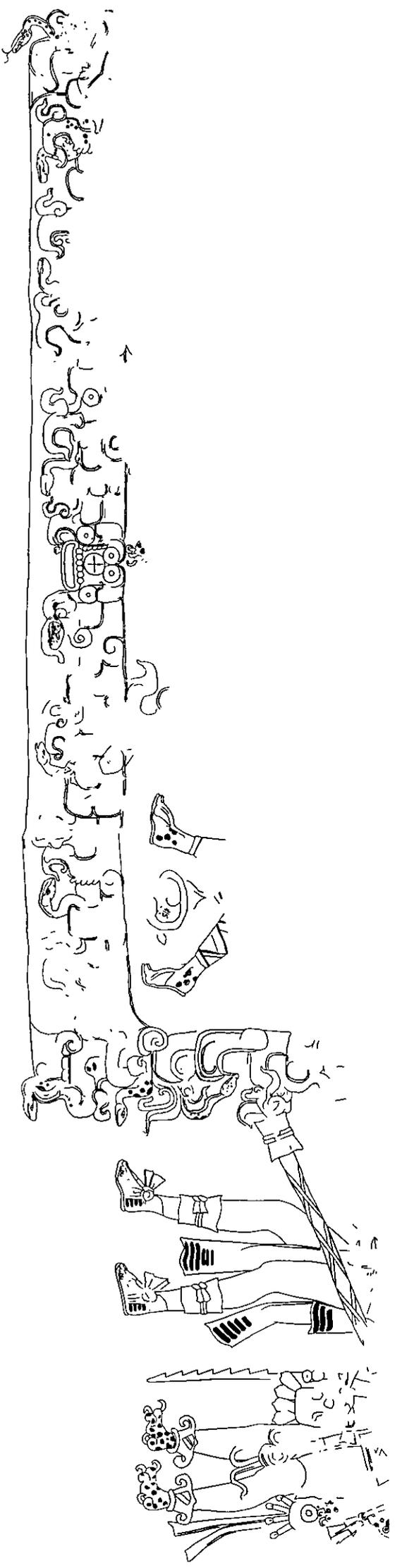


Lamina 6. Jambas norte y sur de la puerta interior del edificio A. Murales de los danzantes. Restitución.



Lámina 7. Murales restituidos del pórtico del edificio A. Hombre jaguar, bajo relieve y hombre águila.

107



107

Lámina 8. Calca del mural del aposento del edificio A. Mural de las serpientes entrelazadas.

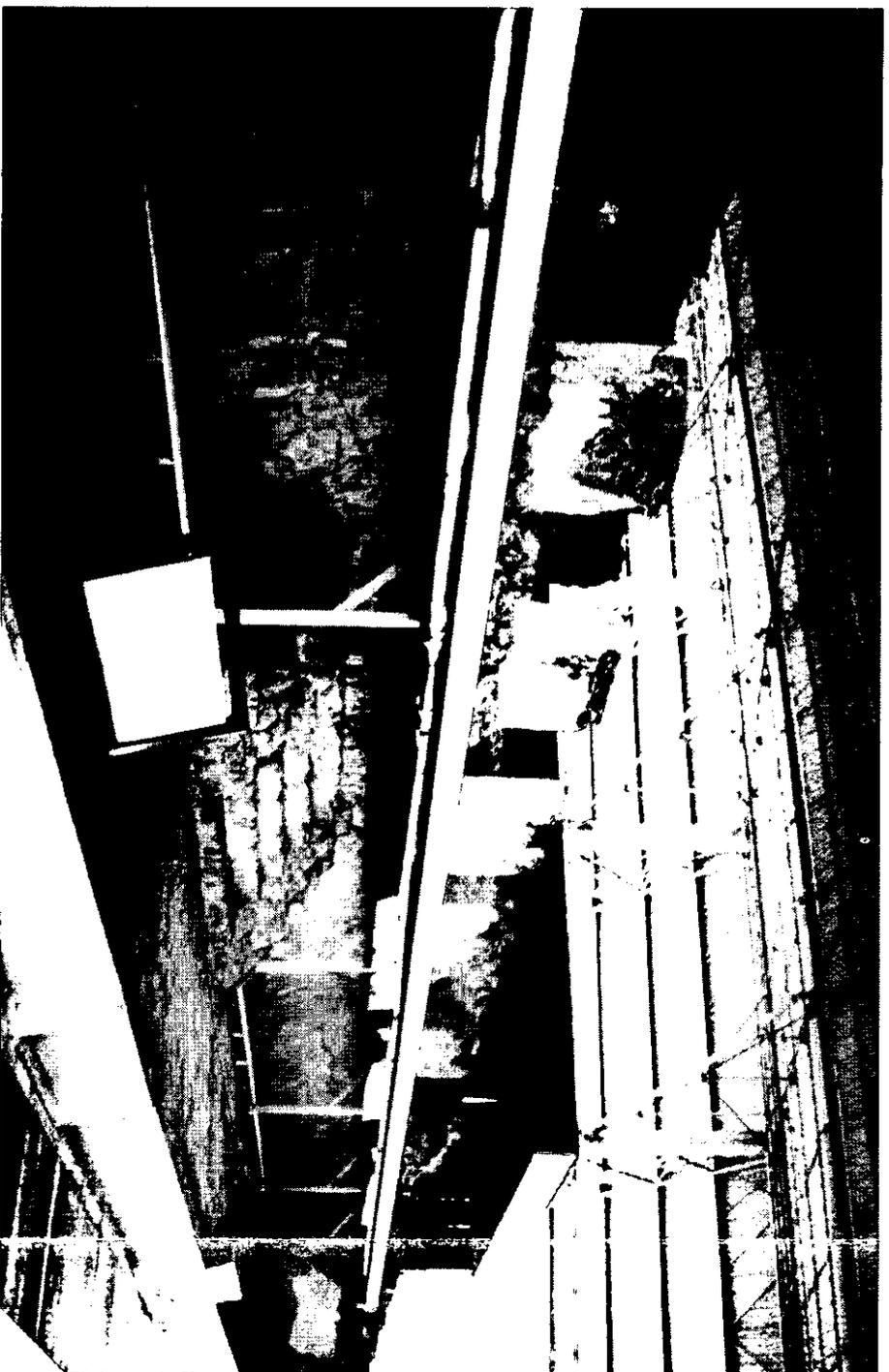
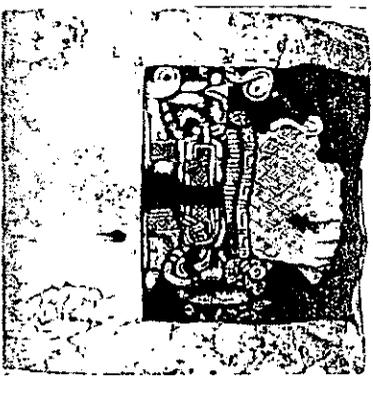
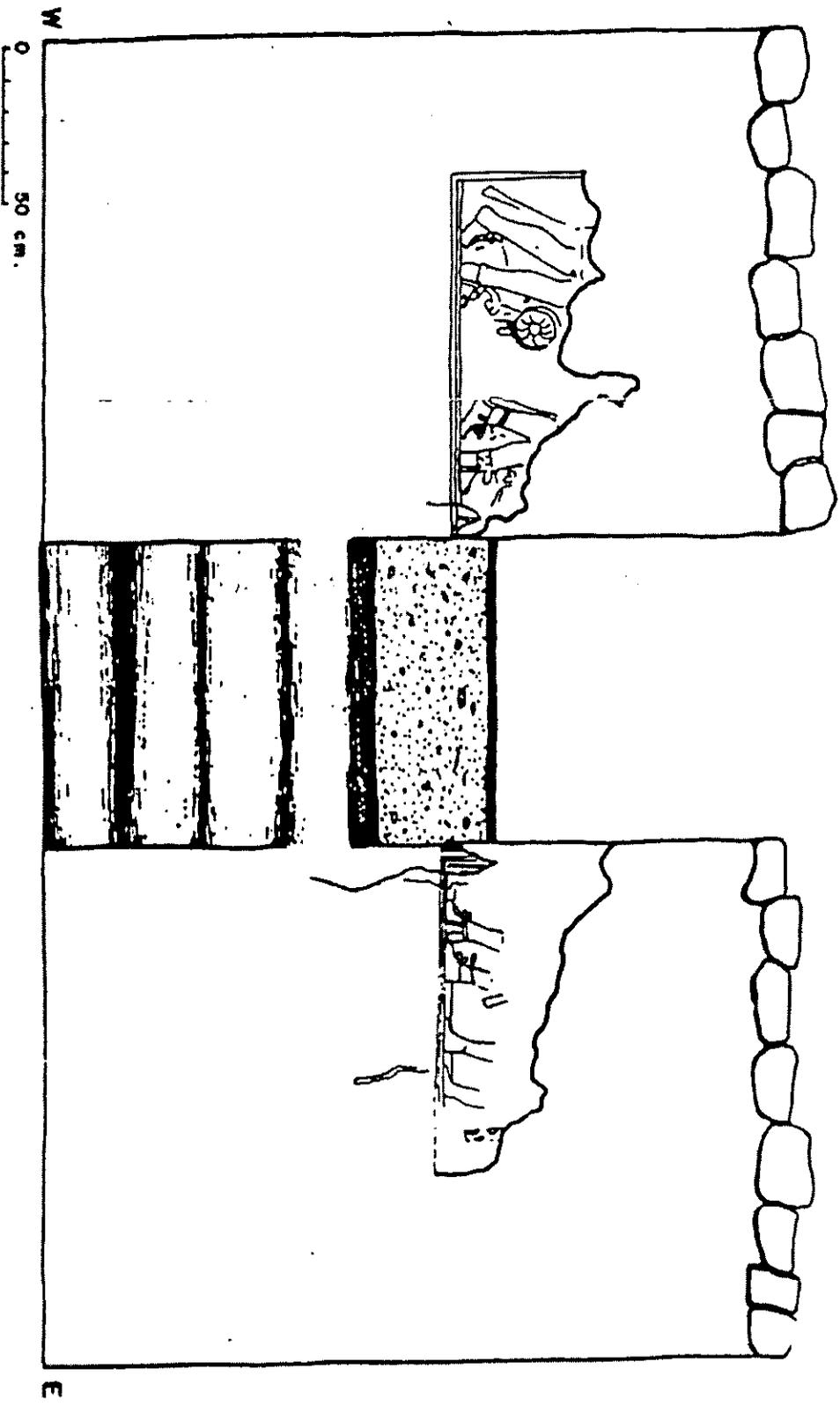
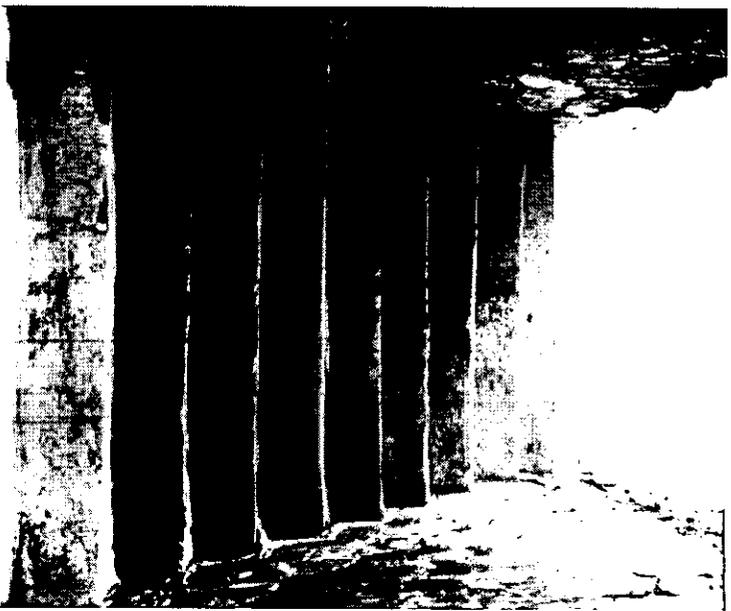


Lámina 9. Mural de la batalla (restitución Selene Salas, según Francisco Villaseñor Bello)



Lamina 10. Bajo relieve del edificio E y pintura de los hombres caminando (edificio F). (en Diana López de Molina, 1980)



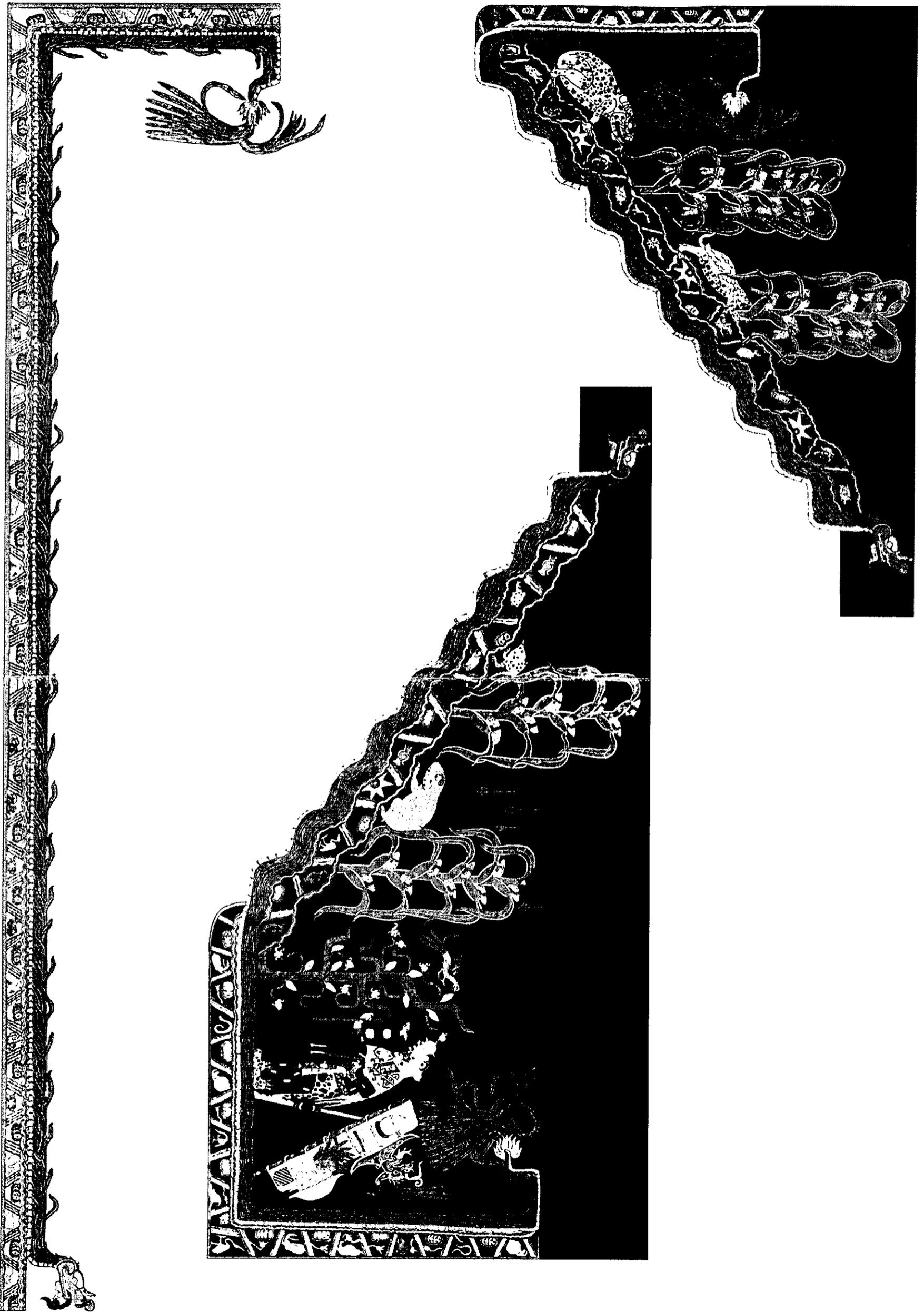


Lámina 12. Murales restituidos del templo rojo. Cenefa del pasillo, rana jaguar y viejo con cacaxtli.

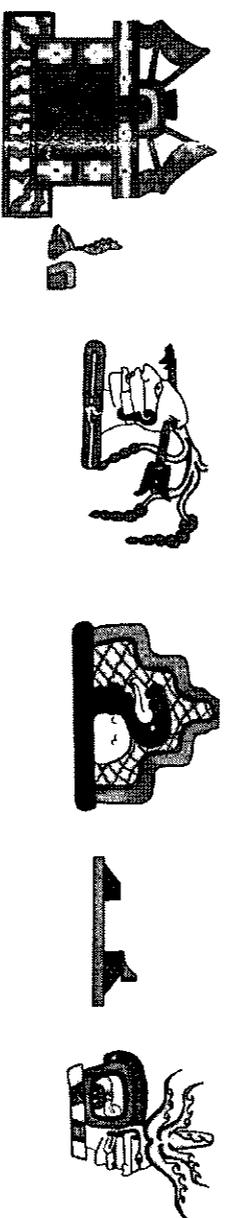
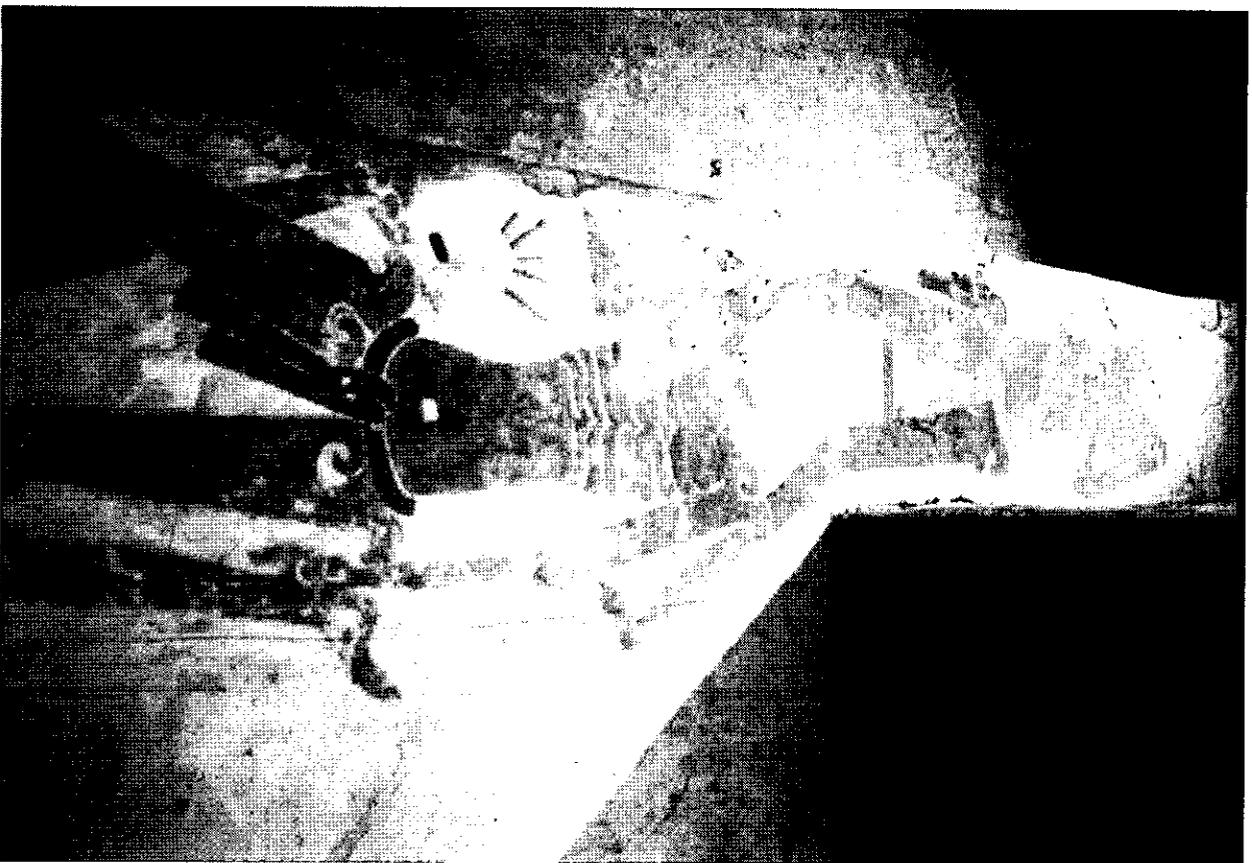
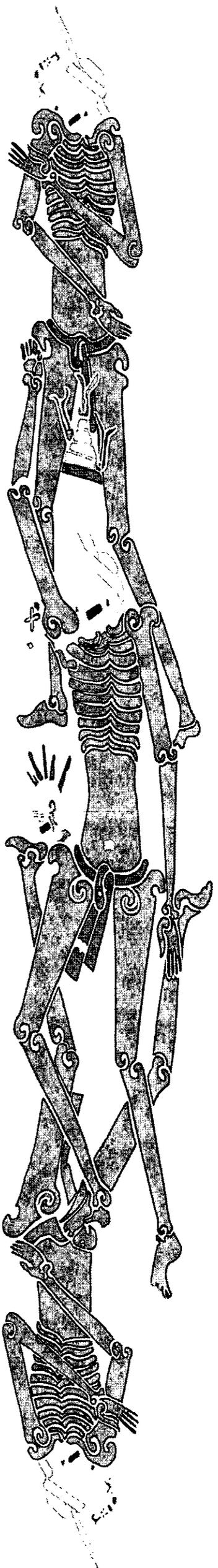


Lámina 13. Piso pintado del templo rojo. Los esqueletos y los iconos.

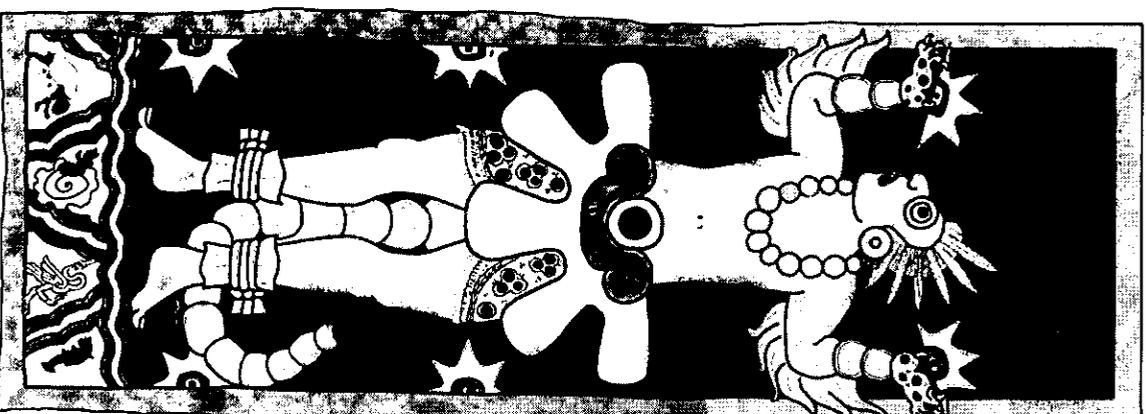
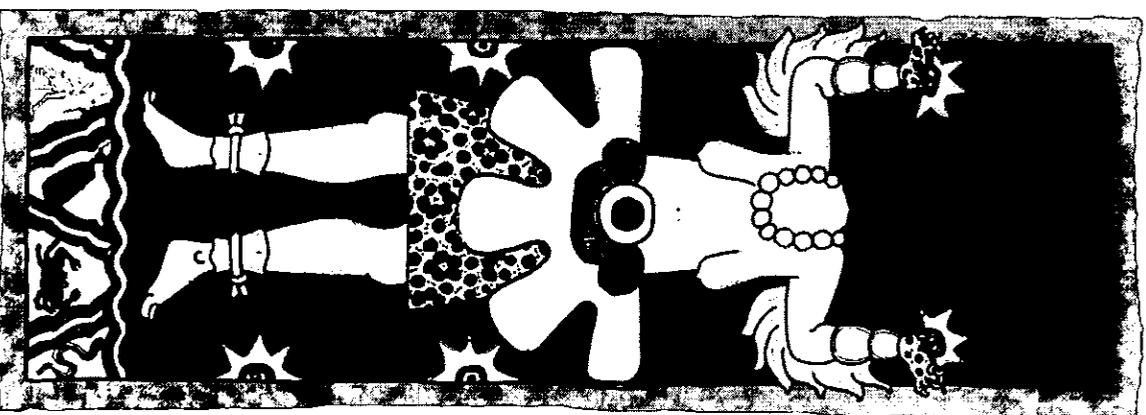


Lámina 14. Murales de la mujer y del hombre Alacrán.

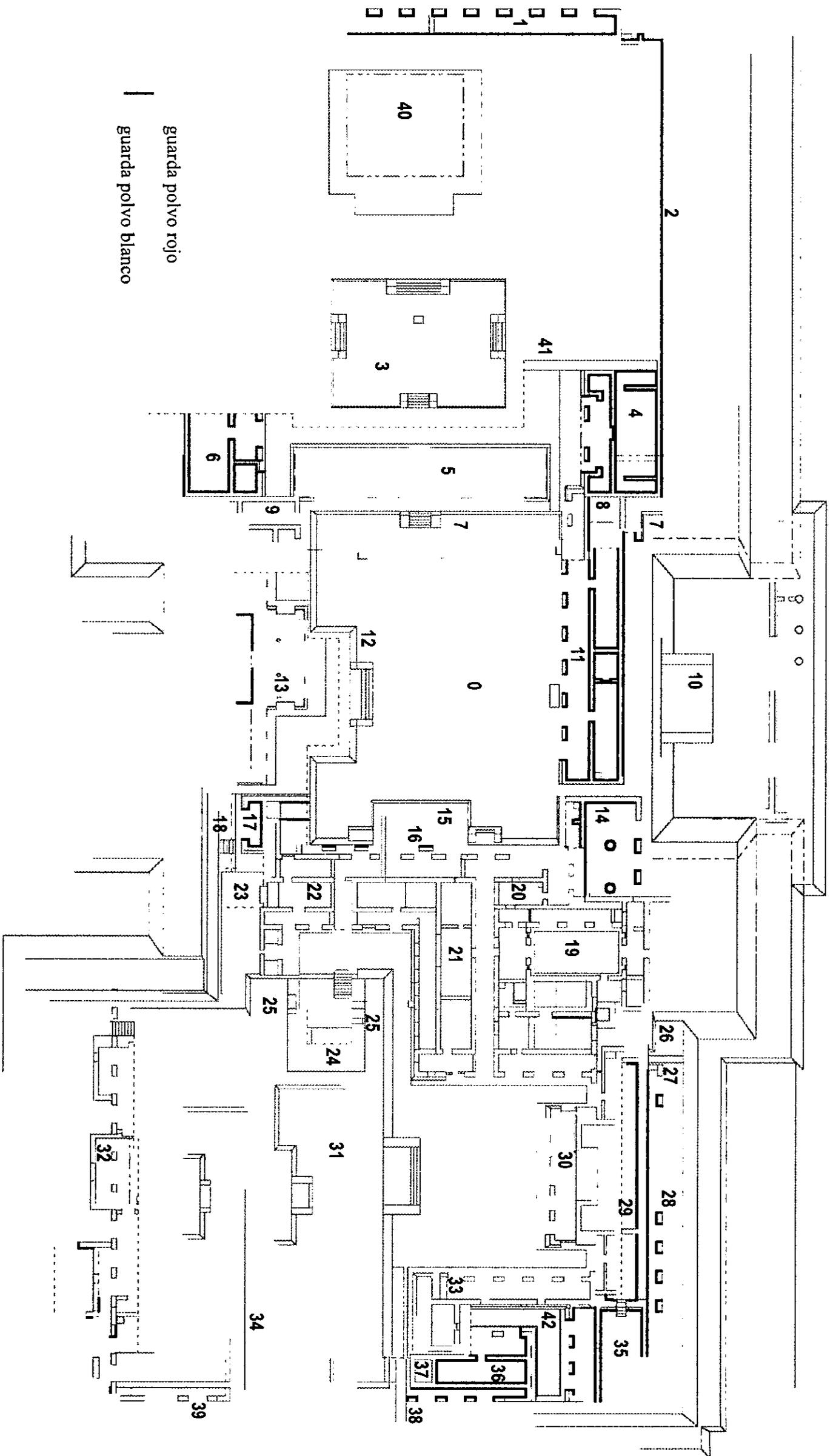


Lámina 15. Ubicación de los guarda polvos.

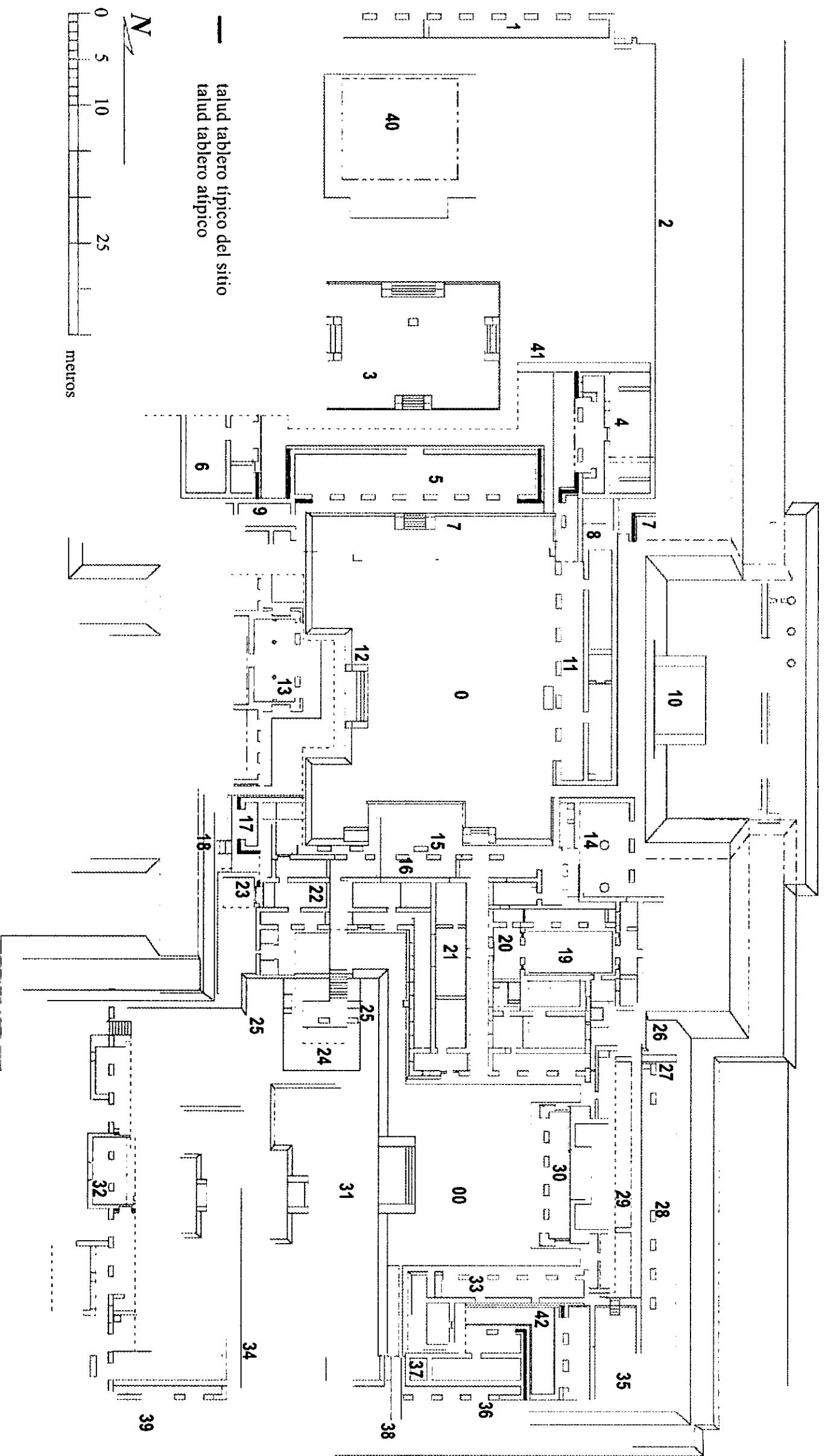


Lámina 16. Ubicación de los taludes tableros.

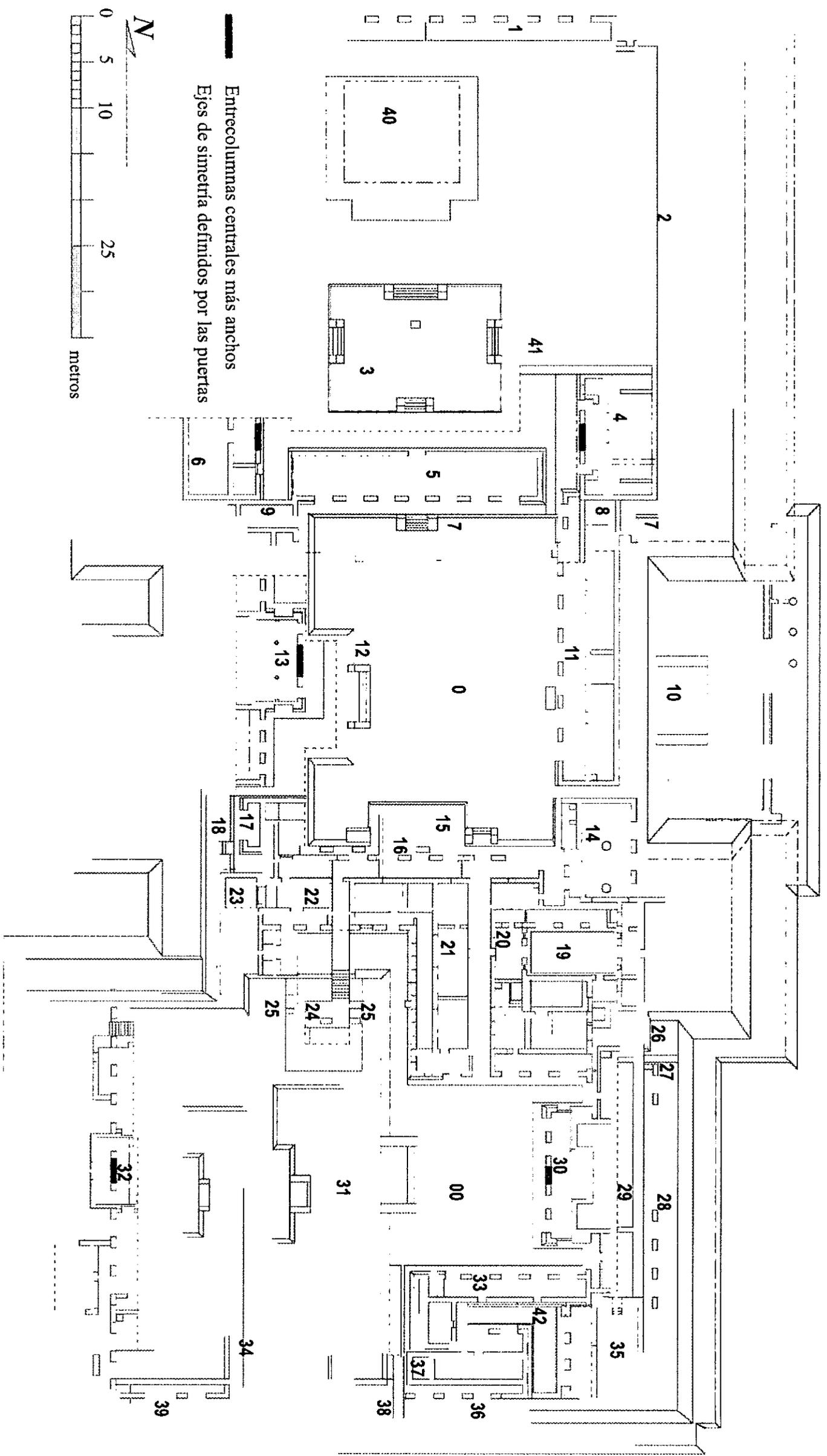
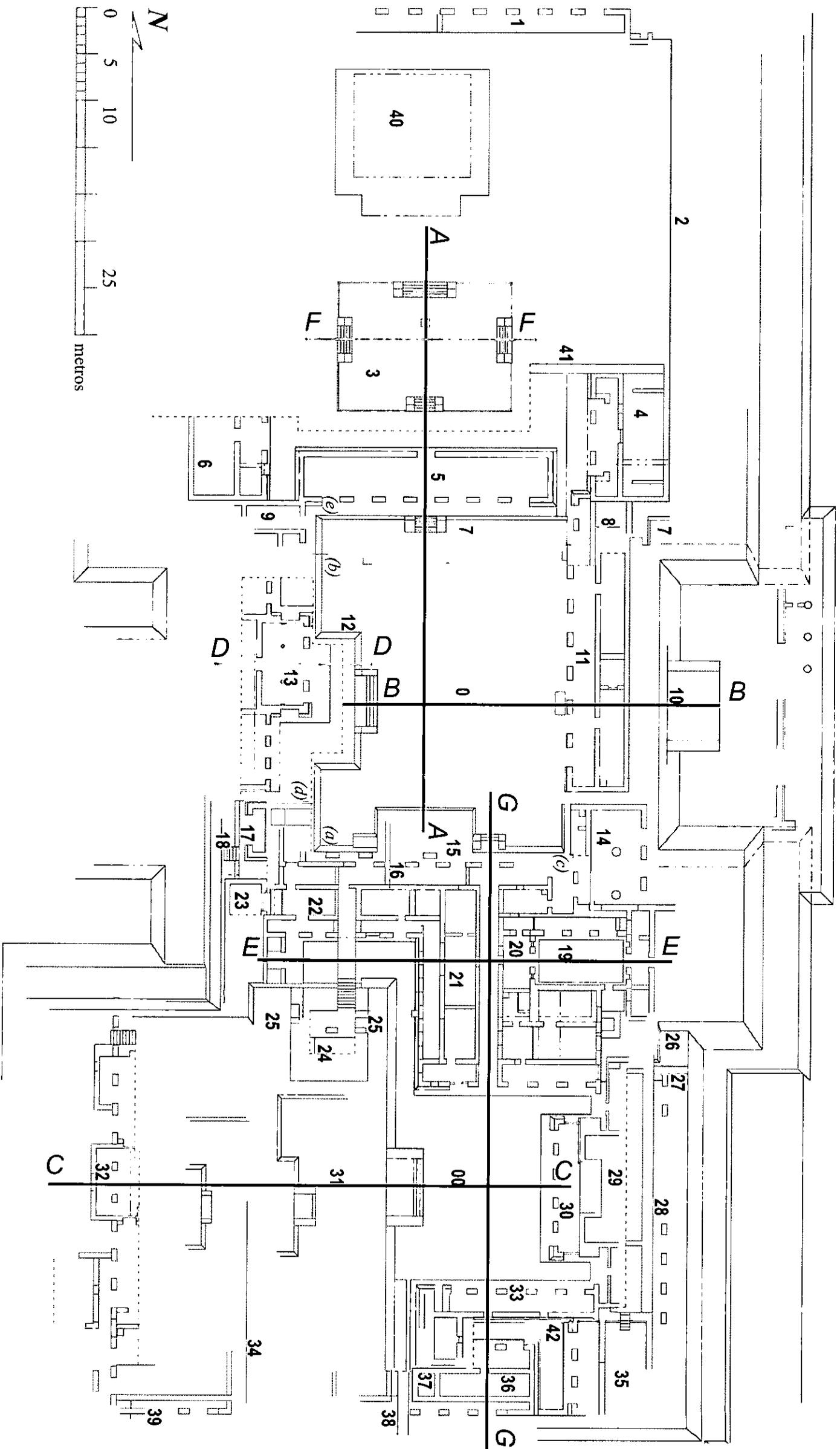


Lámina 17. Ejes centrales de edificios marcados por las puertas y los entrecolumnas.



Lamina 18. Ejes de simetría de espacios exteriores y ejes secundarios.

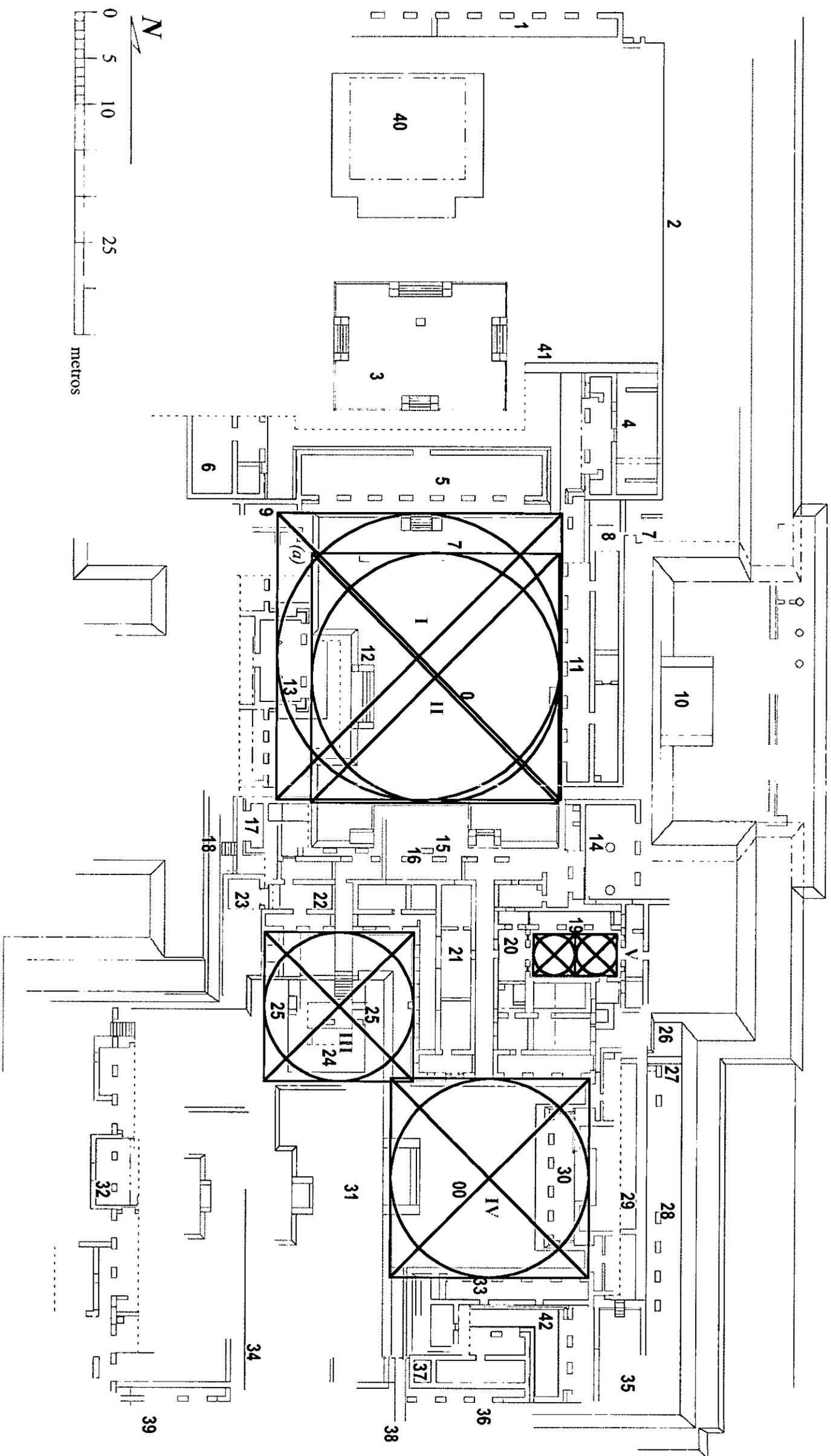


Lámina 19. Geometría de las plazas

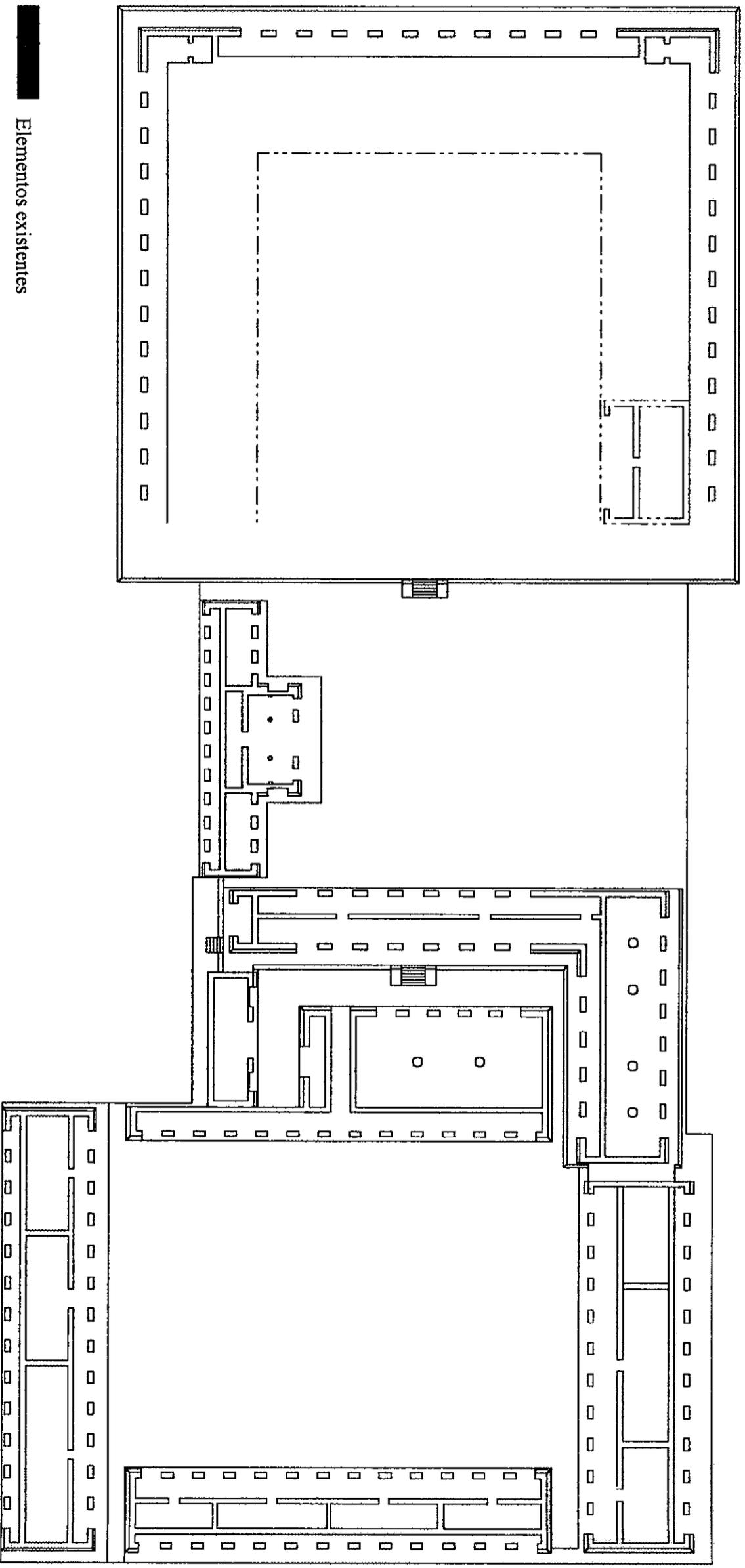
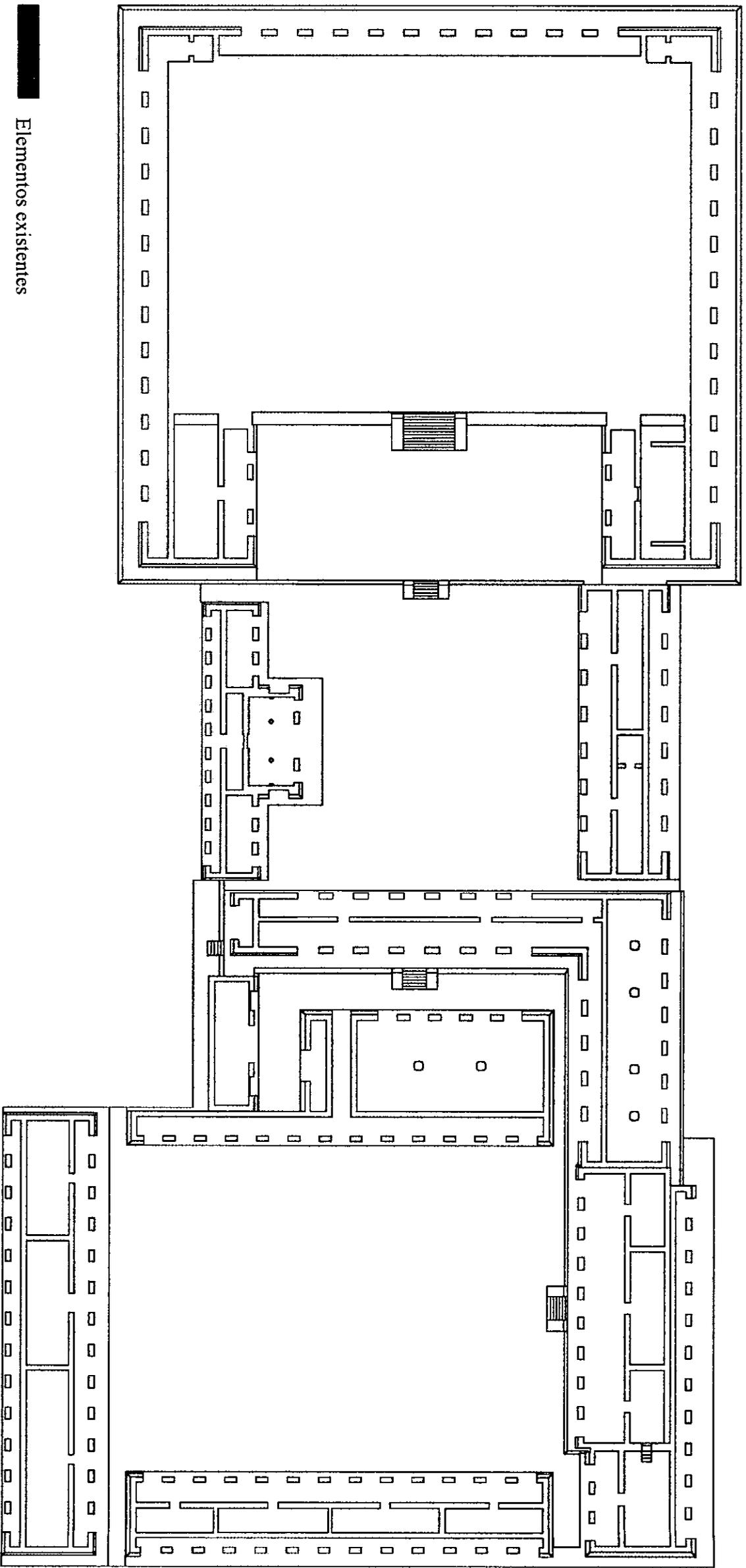


Lámina 20. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva I.



Elementos existentes

Zonas derrumbadas

Zonas enterradas

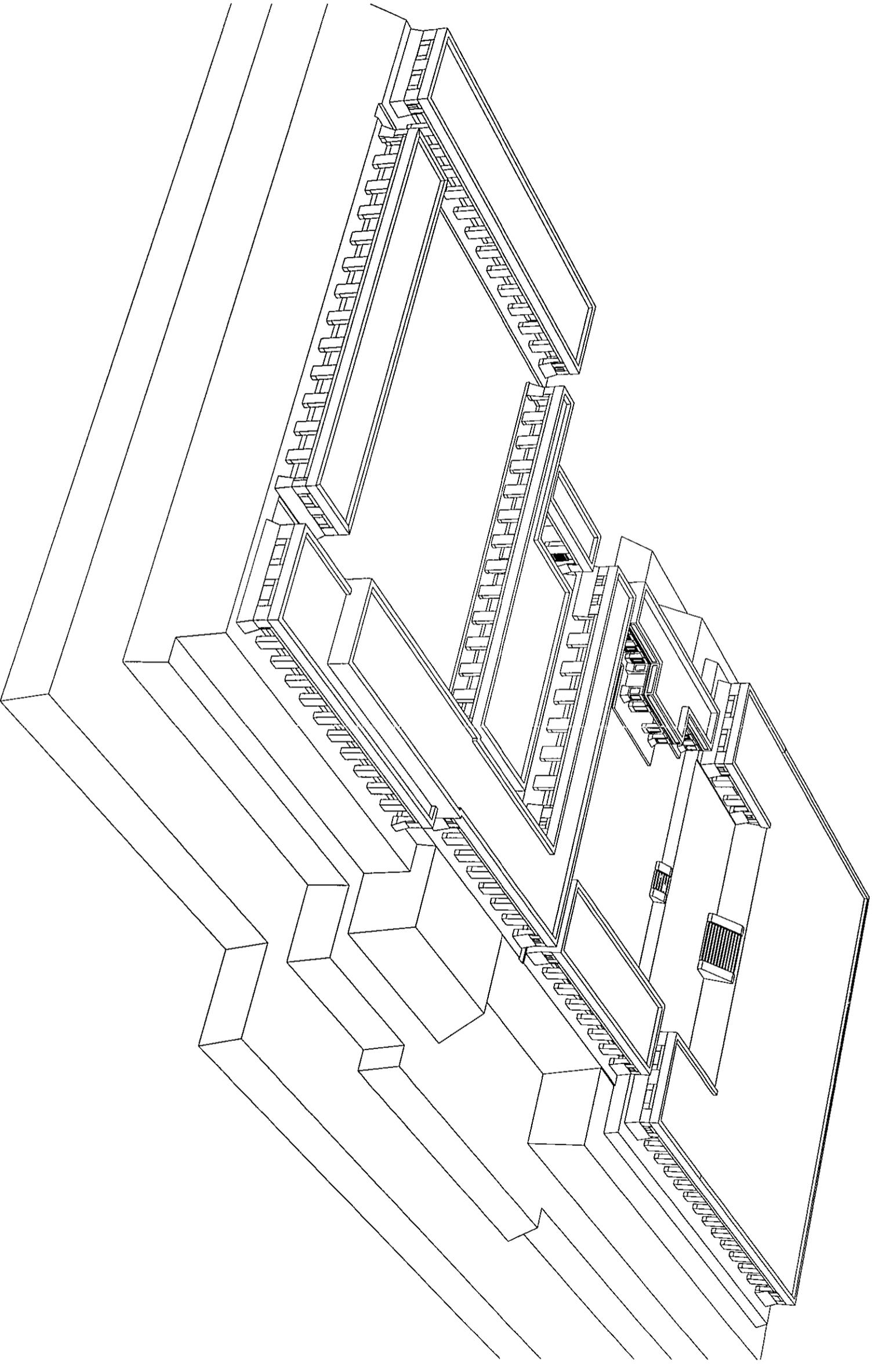


Lámina 22. Fase 2 y 3, perspectiva de la reconstrucción hipotética. (nota: el basamento sigue en estudio)

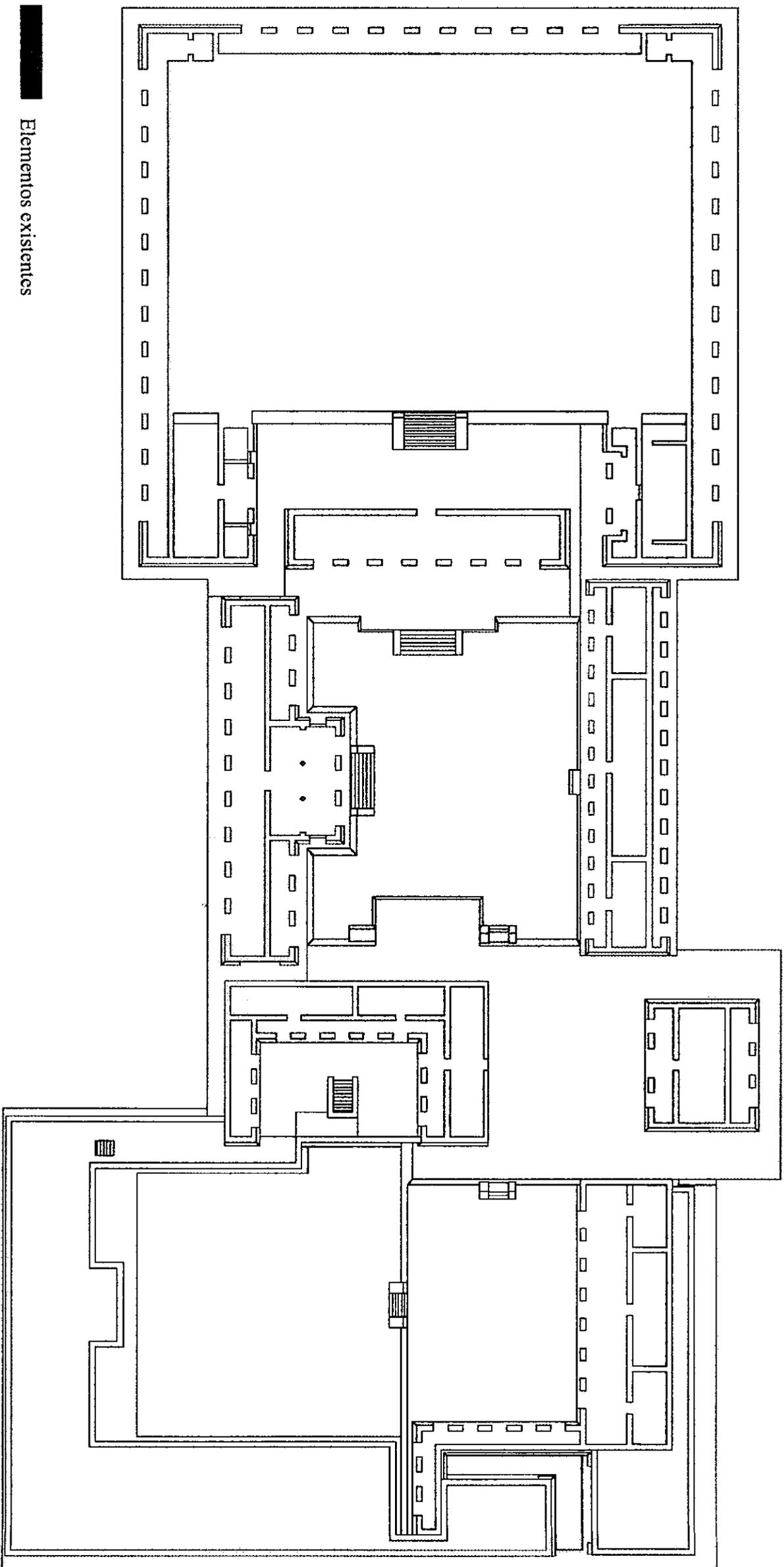
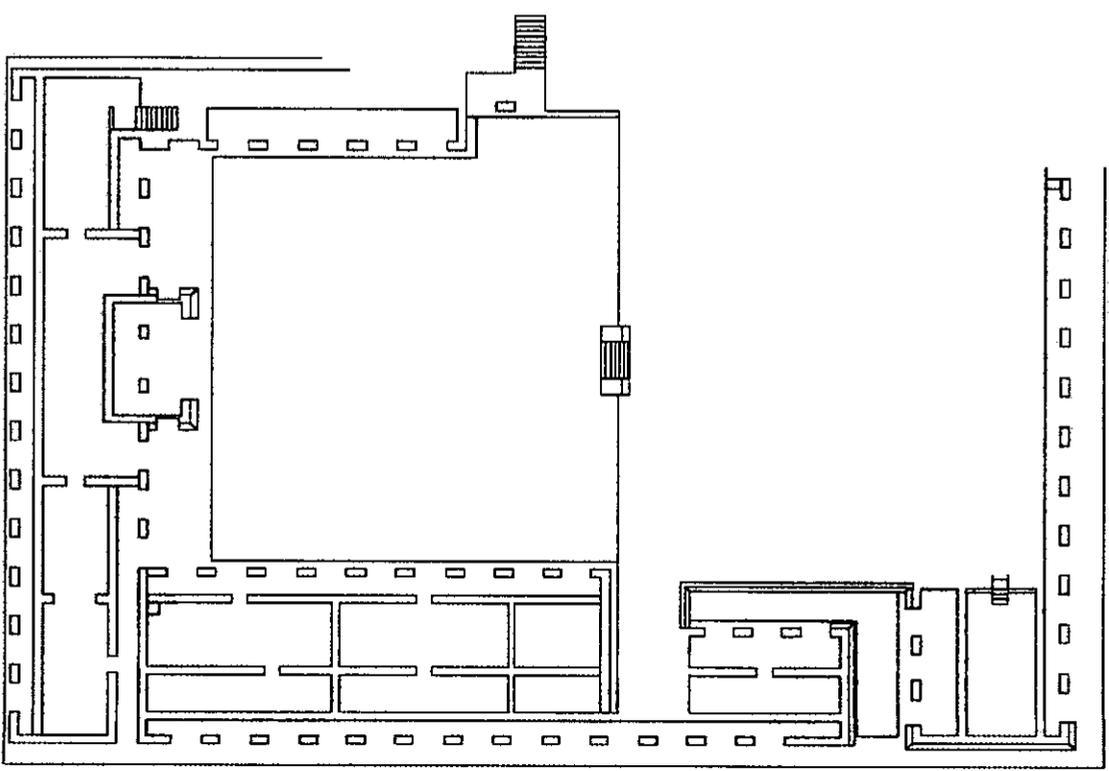


Lámina 23. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 4 - nivel alto



Elementos existentes

Zonas derrumbadas

Zonas enterradas

Lámina 24. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 4 - nivel bajo

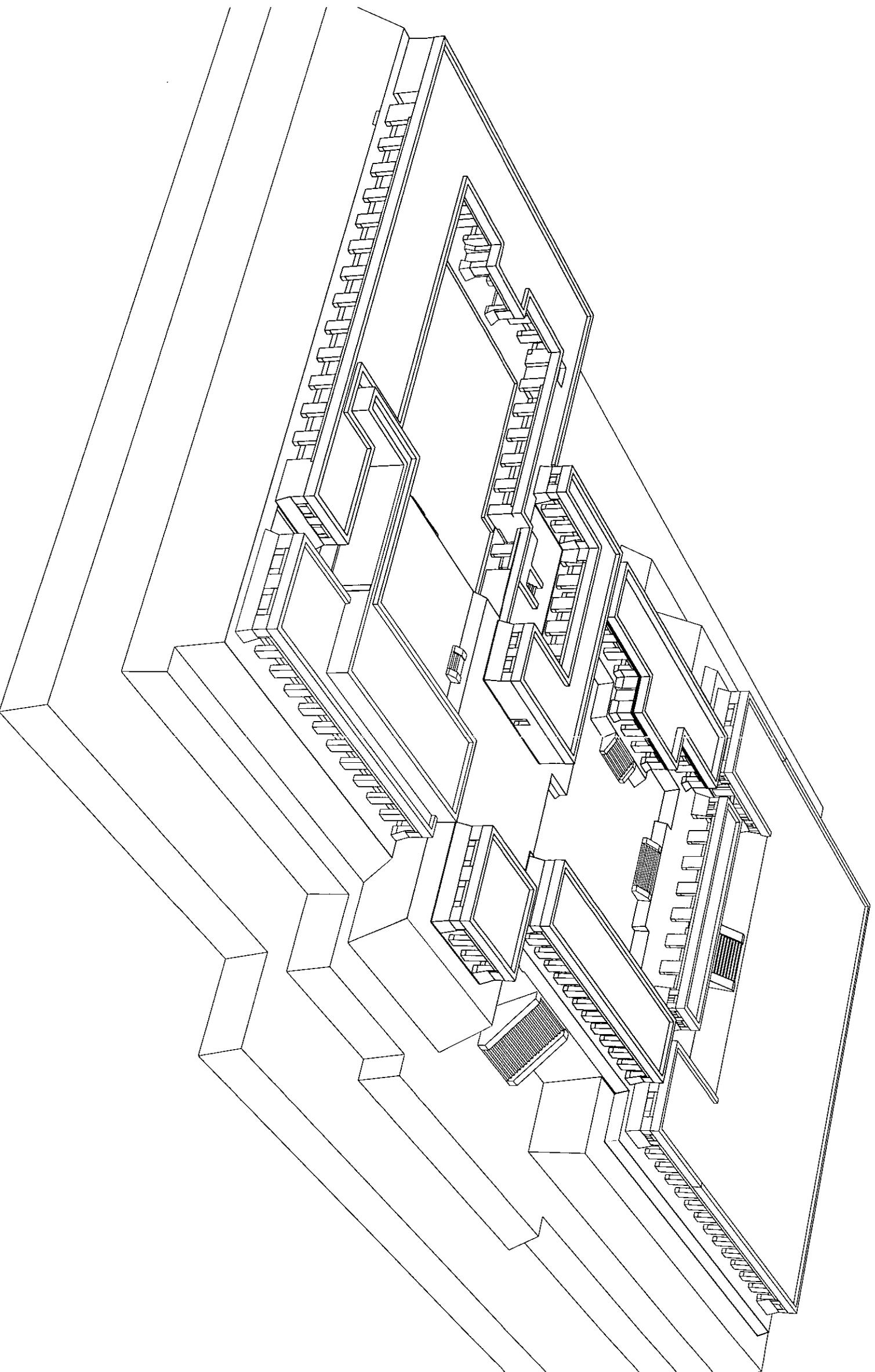
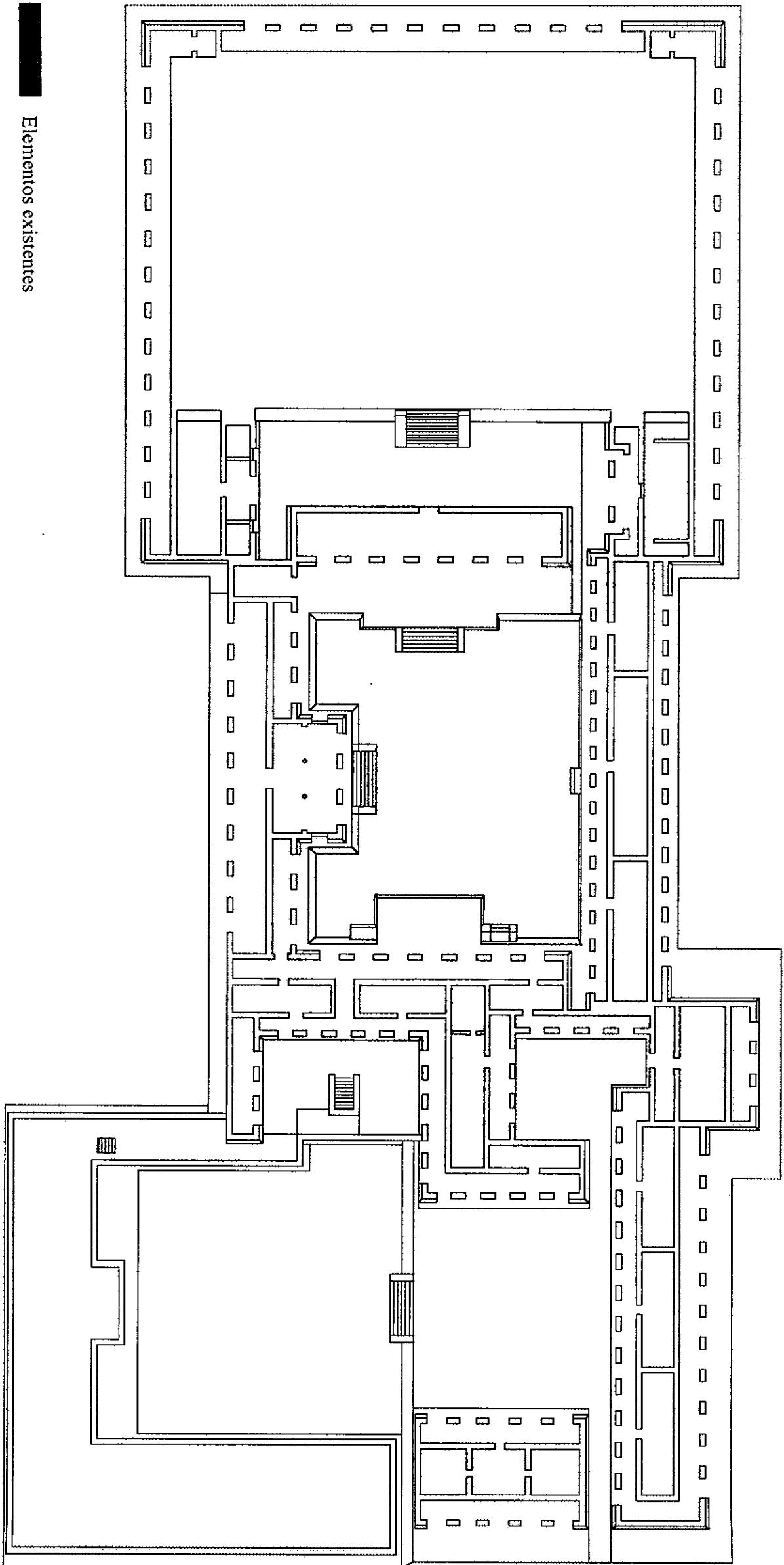
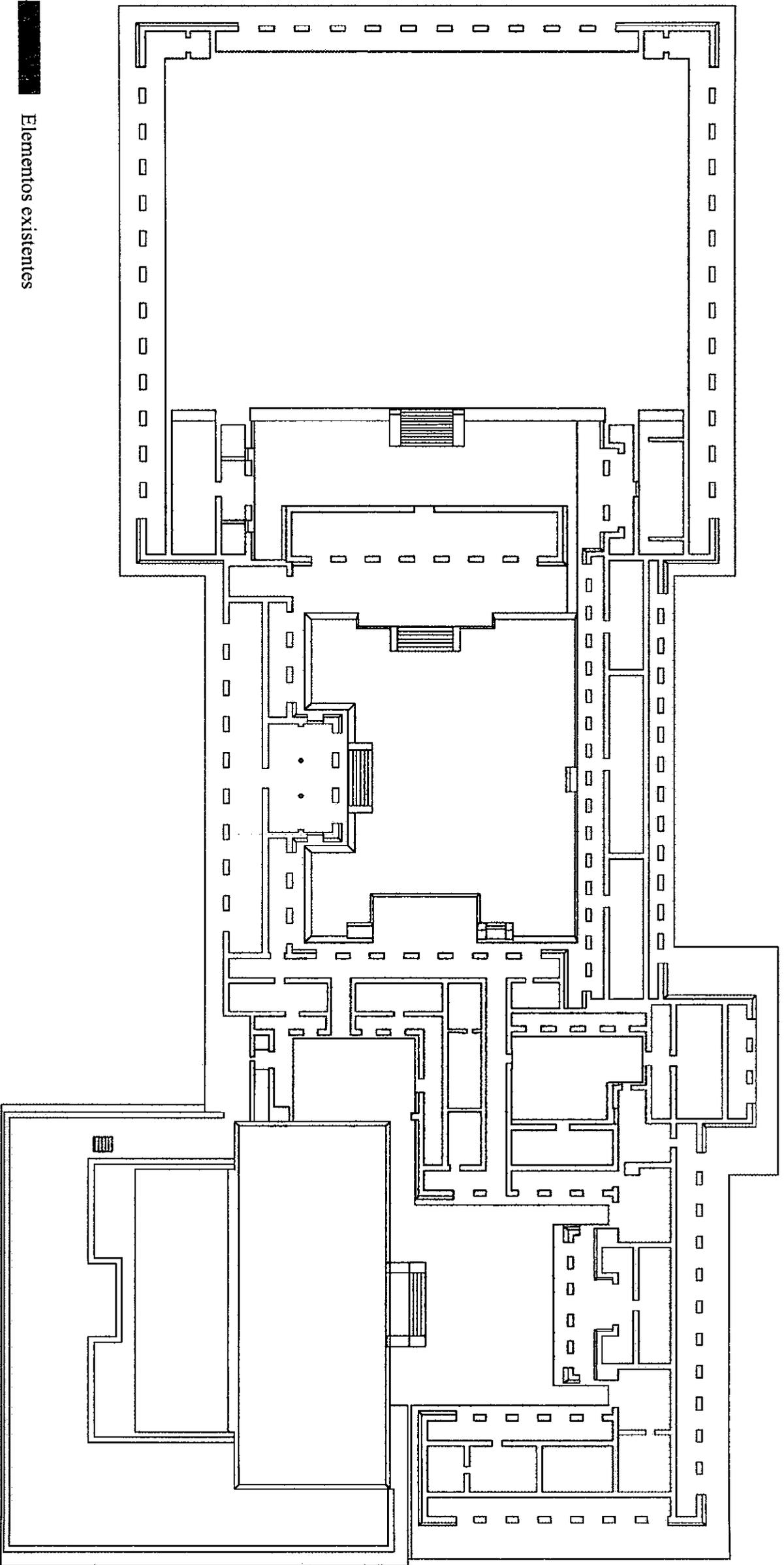


Lámina 25. Fase 4, perspectiva de la reconstrucción hipotética. (nota: el basamento sigue en estudio)



- Elementos existentes
- - - Zonas derrumbadas
- · · Zonas enterradas

Lámina 27. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 5 - nivel alto (para el nivel bajo, ver lámina anterior)

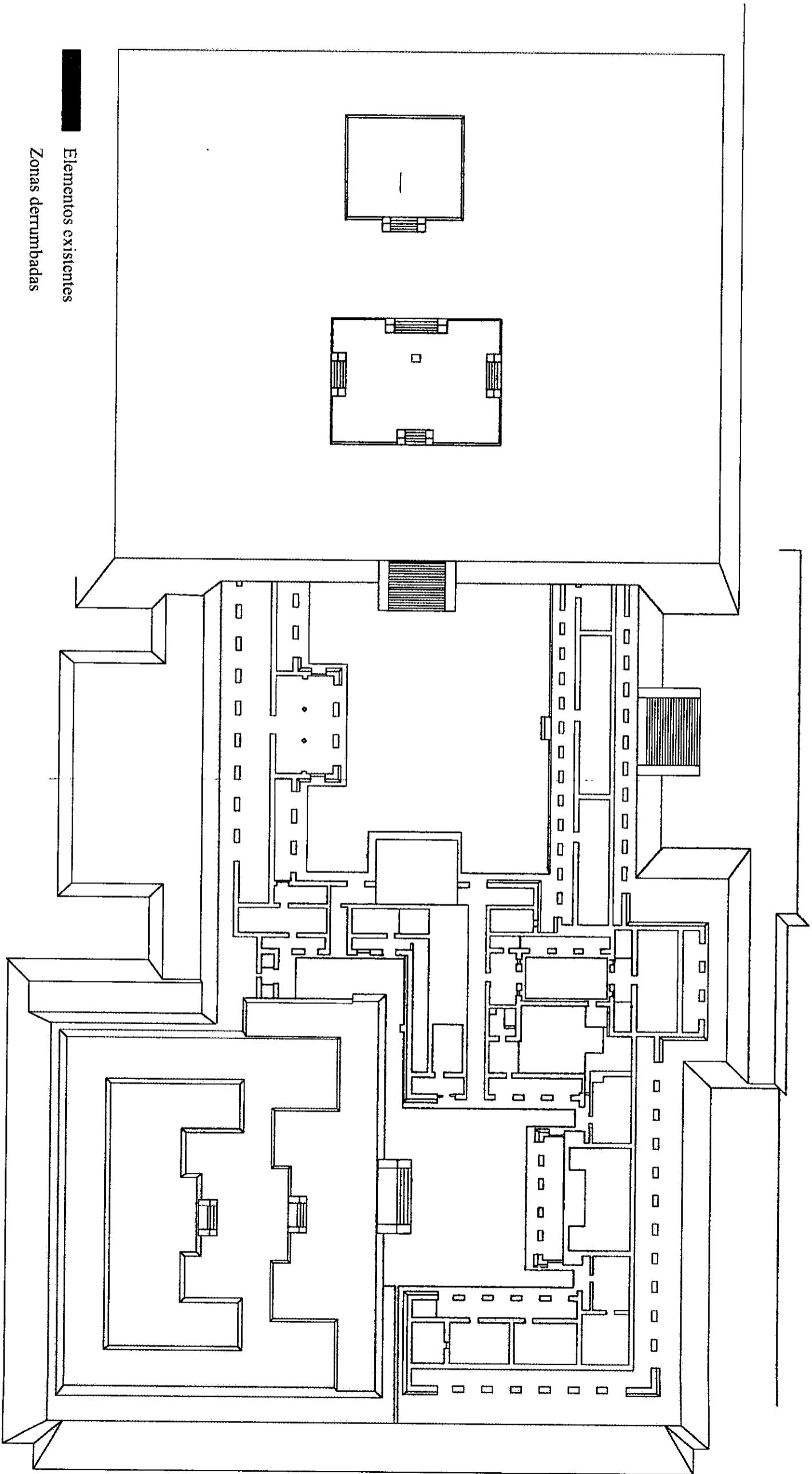


Elementos existentes

Zonas derrumbadas

Zonas enterradas

Lámina 28. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 6.



Elementos existentes

Zonas derrumbadas

Lámina 29. El sitio de Cacaxtla en su fase constructiva 7.

Figura 30. Tabla cronológica.

	1	2	3	4	4A	4B	5	6	6A	7	7A	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45					
pórtico norte																																																						
muro poniente																																																						
patio hundido																																																						
edificio A																																																						
pintura del fondo																																																						
pintura del pórtico																																																						
edificio B																																																						
edificio C																																																						
montículo Y																																																						
talud atrás del edificio A																																																						
talud del mural de la Batalla																																																						
mural de la batalla																																																						
plaza norte																																																						
superestructura del edificio D																																																						
superestructura del edificio E																																																						
escalera oriente																																																						
edificio D																																																						
basamento piramidal																																																						
edificio E																																																						
edificio de las columnas																																																						
columnas enterradas sur de la plaza norte																																																						
cuarto poniente																																																						
escalera poniente																																																						
desnivel sur de la plaza norte																																																						
plaza de los altares																																																						
patio de los rombos																																																						
palacio I-rombos																																																						
palacio II arriba T.R.																																																						
palacio III arriba celosía																																																						
palacio IV o pórtico A																																																						
palacio V arriba F																																																						
palacio VI desague																																																						
superestructura del templo rojo																																																						
esquina de basamento																																																						
pequeño talud																																																						
atrás del cuarto de las pinturas																																																						
pórtico oriente																																																						
cuarto de las pinturas y pórtico F																																																						
pinturas F																																																						
edificio F																																																						
muro con talud frente al edificio F																																																						
pórtico sur																																																						
celosía																																																						