



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estimación de daños a contenidos de museos
por sismo: caso Museo Soumaya y Museo
Nacional de Antropología de la Ciudad de
México**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

Luis Manuel Buendía Sánchez

Tutor:

Dr. Eduardo Reinoso Angulo

Septiembre 2012





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/126/12

Señor
LUIS MANUEL BUENDIA SÁNCHEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. EDUARDO REINOSO ANGULO, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

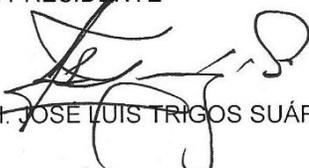
"ESTIMACIÓN DE DAÑOS A CONTENIDOS DE MUSEOS POR SISMO: CASO MUSEO SOUMAYA Y MUSEO NACIONAL DE ANTROPOLOGÍA DE LA CIUDAD DE MÉXICO"

- INTRODUCCIÓN
- I. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EN CASOS DE ESTUDIO
- II. ESTIMACIÓN SIMPLIFICADA DE COSTOS EN CUADROS Y ESCULTURAS
- III. ESTIMACIÓN DE PROBABILIDAD DE FALLA DE CONTENIDOS EN FUNCIÓN DE LA GEOMETRÍA
- IV. ESTIMACIÓN DE CURVAS DE SUSCEPTIBILIDAD EN FALLA DE CONTENIDOS DADO UN PARÁMETRO
- V. DISCUSIÓN DE METODOLOGÍAS
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 3 de septiembre del 2012.
EL PRESIDENTE


M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar.

Dedicada a:

Josefina Aldana Rodríguez

Santiago Sánchez Flores

Agradezco a:

La Universidad Nacional Autónoma de México

La Facultad de Ingeniería, UNAM

El Instituto de Ingeniería, UNAM

Mis padres Cecilia Sánchez Aldana y Manuel Buendía Granados

Ma. Lidia Martínez Rodríguez

Dr. Miguel Ángel Jaimes Téllez

Dr. Eduardo Reinoso Angulo

Luis Manuel Buendía Sánchez

Índice

	<i>Página</i>
Resumen	4
Introducción	6
Capítulo 1. Recopilación de Información en casos de estudio	17
1.1 Descripción general de las edificaciones	17
1.2 Información del inventario de contenidos	17
1.3 Aplicación a los museos de estudio	18
1.3.1 Descripción general de los museos de estudio	18
1.3.2 Información del inventario de contenidos en los museos de estudio	27
1.4 Resumen de la información obtenida en los museos de estudio	32
1.5 Información sísmica	33
Capítulo 2. Estimación simplificada de costos en cuadros y esculturas	35
2.1 Metodología	36
2.1.1 Estimación del valor de la firma del artista	36
2.1.2 Valor de la firma del artista	36
2.1.3 Valuación de una obra de arte	37
2.1.4 Modelo integrado de valoración de una obra de arte	37
2.2 Aplicación del modelo	38
2.2.1 Museo Soumaya	39
2.2.2 Museo Nacional de Antropología	44
2.2.3 Instituto de Ingeniería UNAM	44
2.3 Costo relativo	48
Capítulo 3. Estimación de probabilidad de falla de contenidos en función de la geometría	50
3.1 Información preliminar	50
3.1.1 Digitalización de imágenes en el programa Auto CAD 2008	50

3.1.2	Obtención de propiedades geométricas	51
3.2	Probabilidad de vuelco	54
3.2.1	Antecedentes	54
3.2.2	Probabilidad de vuelco bajo la acción de movimientos sísmicos	54
3.3	Aplicación a la muestra	55
3.3.1	Inventario de contenidos del Museo Soumaya, Museo Nacional de Antropología e Instituto de Ingeniería UNAM	55
3.3.2	Movimientos sísmicos	57
3.3.3	Probabilidad de vuelco en los contenidos de la muestra	57
3.4	Modelo con regresión no lineal	62
3.4.1	Modelo aplicado a objetos regulares	65
3.5	Comparación entre resultados observados y resultados calculados	67
3.6	Curvas de deslizamiento	68
3.6.1	Probabilidad de deslizamiento de hasta 0.30 m bajo la acción de movimientos sísmicos	69
3.7	Fragilidad y costo del daño	71
Capítulo 4.	Estimación de curvas de susceptibilidad de falla de contenidos dado un parámetro de intensidad sísmica	75
4.1	Análisis probabilista de peligro sísmico	76
4.1.1	Aplicación del modelo al caso de estudio	79
4.2	Amplificación de la aceleración de piso respecto a la aceleración máxima del suelo	80
4.2.1	Elaboración del modelo simplificado	82
4.2.2	Demandas de aceleración por piso	83
4.2.3	Aplicación del modelo al Museo Soumaya	85
4.3	Gráficas h_c vs b_c	92
4.4	Modelo con regresión no lineal	103
Capítulo 5.	Discusión de metodologías	106
5.1	Análisis de curvas h_c vs b_c	107
5.2	Relación entre ambas metodologías	110
Capítulo 6	Conclusiones	111
Anexo A	Inventario en los museos de estudio	112
Anexo B	Curvas de probabilidad de vuelco de los contenidos de estudio en el Museo Soumaya	129
Anexo C	Curvas de probabilidad de vuelco de los contenidos de estudio en el Museo Nacional de Antropología	133

Anexo D	Curvas de probabilidad de vuelco de los contenidos de estudio de los objetos del Instituto de Ingeniería UNAM	136
	Referencias	137

Resumen

Se presenta un método para estimar los daños en contenidos de museos por sus diferentes mecanismos de falla provocados por un movimiento sísmico, a través de modelos matemáticos generados a partir de metodologías publicadas anteriormente. Para ello se generan curvas de probabilidad para conocer la susceptibilidad de los contenidos a volcarse y/o deslizarse con el método propuesto por Jaimes et al (2009), en el que se simulan varias aceleraciones escaladas hasta provocar la falla del objeto y a partir de estas curvas se generan ecuaciones que describan el comportamiento de los objetos ante un movimiento sísmico en función de su geometría y se propone un método simplificado para la valoración de obras de arte para que en combinación con la información previa estimar los costos de restauración o reposición de estos contenidos. Para extrapolarlo a diferentes periodos de retorno se utiliza un PSHA propuesto por Esteva L. (1967), para estimar las aceleraciones pico esperadas y también se utiliza el método simplificado de amplificación de aceleración de piso respecto a la del suelo para diferentes alturas de entrepiso propuesto por Miranda y Taghavi (2005). Con estas adecuaciones se replantea la probabilidad de falla de los contenidos en un grafico que relaciona solo la geometría del objeto, mostrando los que caerían en un movimiento sísmico dado un periodo de retorno, es decir, se simulan historias dada una aceleración esperada para obtener la geometría de los objetos que vuelcan bajo la misma. Por último se comparan los dos métodos, obteniendo una ecuación que permite relacionarlos, para así poder obtener cualquiera de estos dos tipos de gráficos, sin necesidad de hacer simulaciones. Para ilustrar la metodología propuesta se toman como ejemplo el Museo Soumaya Polanco, el Museo Nacional de Antropología y algunos objetos del Instituto de Ingeniería UNAM, localizados en la Ciudad de México.

Abstract

A method is presented to estimate the damage to contents of museums by different failure mechanisms caused by an earthquake, through mathematical models generated from previously published methodologies. This probability curves are generated to determine the susceptibility of the tip and slide content with the method proposed by Jaimes et.al.(2009), which simulate various accelerations scaled to cause the failure of the object and from these curves generate equations describing the behavior of objects to a seismic shift in terms of their geometry and proposes a simplified method for the valuation of works of art in combination with prior information to estimate the costs of restoration or replacement of such content. To extrapolate to different return periods using a PSHA proposed by Esteva L. (1967), to estimate the expected peak accelerations and also used the simplified method of amplification of ground-floor acceleration on the ground, for different heights Miranda and Taghavi (2005) mezzanine. With these adjustments to restate the probability of failure of the contents in a single graph that relates the geometry of the object,

showing that fall in a given earthquake return period, i.e. a given story are simulated to obtain the expected acceleration geometry of objects flushed there under. Finally we compare the two methods, obtaining an equation that can relate, in order to obtain either of these two types of graphics, without the need for simulations. To illustrate the proposed methodology are taken as an example the Soumaya Museum Polanco, the National Museum of Anthropology and objects of the UNAM Institute of Engineering, located in Mexico City.

Introducción

Actualmente en México, la ingeniería sísmica y la ingeniería estructural en conjunto han logrado avances en el diseño y construcción de estructuras resistentes a eventos sísmicos, o también llamadas sismoresistentes. Lo cual es muy bueno, ya que para la sociedad es muy importante contar con edificaciones seguras, estructuralmente hablando, es decir, que durante y después de la acción de un sismo, se pueda asegurar la supervivencia de sus ocupantes y/o residentes, además de que en el mejor de los casos, la estructura no sufra daños severos, lo cual se puede traducir en menos recursos dirigidos a la reparación o rehabilitación de los mismos.

México es un país que se encuentra dividido entre cinco placas tectónicas: Cocos, Pacífico, Norteamérica, Caribe y Rivera. El movimiento relativo entre estas placas ocasiona que nuestro país se encuentre en una de las zonas sísmicas más activas del mundo.

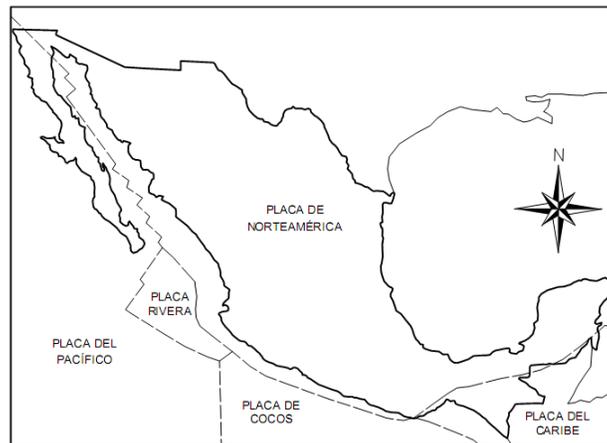


Figura 1 Placas tectónicas que rodean a la República Mexicana

Esto hace que el diseño de estructuras sea muy estricto en cuanto su resistencia a acciones sísmicas, dando lugar a que se crearan diversos manuales y reglamentos de construcción. En México, los principales documentos que han marcado la pauta en los criterios de diseño sísmico son el RCDF y el MDOC-CFE. El primer documento, el RCDF tiene un carácter legal, es decir, es una obligación cumplirlo para quien diseña, pero su utilización está limitada únicamente al Distrito Federal, sin embargo sus criterios básicos son empleados con mucha frecuencia como modelo para la elaboración y desarrollo de otros reglamentos, ya sean mexicanos o extranjeros. En cambio el MDOC-CFE es más para el diseño estructural de obras civiles típicas del sector eléctrico y por lo tanto no tiene el carácter legal de un reglamento, sin embargo dicho manual es utilizado como documento de referencia y de diseño estructural de obras localizadas en cualquier punto de la República Mexicana y no solo para el Distrito Federal.

En un edificio la estructura forma parte de un subsistema dentro de un sistema integral que contiene otros igualmente importantes para su funcionamiento, tales como: instalaciones hidráulicas, sanitarias, pluviales, eléctricas, electromecánicas, entre otras. Los contenidos son del parte del sistema que ayuda a que el edificio pueda cumplir el uso para el cual fue concebido, es decir, son los que hacen posible que las labores humanas dentro del edificio puedan ser realizadas con eficiencia, ya que sin estos cualquier edificación no tendría razón de ser o existir.

Estos objetos sin duda, también son afectados por la acciones de un sismo, provocando que se desplacen y volteen y como consecuencia que se dañen o dejen definitivamente de funcionar, provocando gastos de reparación o reposición que pueden llegar a ser muy elevados dependiendo del tipo de equipo u objeto del que se trate o en el peor de los casos su caída pueda herir o matar a una persona para lo cual el costo es invaluable.

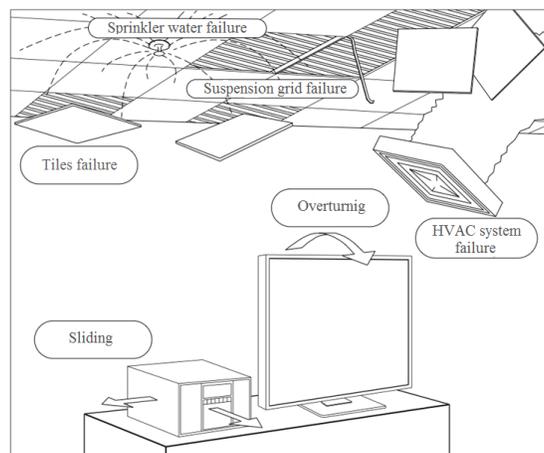


Figura II Contenido de edificios sujetos a múltiples modos de fallo. Una ocupación típica de una oficina y los daños ocurridos debido a una respuesta sísmica (Jaimes et al, 2011)

Es por eso que evaluar el riesgo sísmico a los cuales están sometidos estos objetos o contenidos es muy importante, ya que a partir de conocerlo se podría contar con información muy valiosa para la toma de decisiones en cuanto la mitigación de desplazamientos o volteo de estos contenidos minimizando las pérdidas humanas debido a este fenómeno y eventualmente reducir significativamente los gastos posteriores destinados a reparación o reposición.

Cabe mencionar tres parámetros que influyen en lo anterior, el riesgo, la peligrosidad y la vulnerabilidad sísmica que se podrían definir de la siguiente manera:

- ❖ **Riesgo Sísmico:** Son las consecuencias sociales y económicas potenciales provocadas por un sismo.
- ❖ **Peligrosidad Sísmica:** Es la probabilidad de que ocurran un fenómeno físico como consecuencia de un sismo, provocando efectos adversos a la actividad humana. Estos fenómenos además del movimiento del terreno pueden ser la falla del terreno, la deformación tectónica, la licuefacción, inundaciones, tsunamis, etc.
- ❖ **Vulnerabilidad Sísmica:** Es un valor único que permite clasificar a las estructuras de acuerdo a la calidad estructural intrínseca de las misma, dentro de un rango de nada vulnerable a muy vulnerable a la acción de un sismo.

Se puede observar que el Riesgo Sísmico depende directamente de la peligrosidad y de la vulnerabilidad, es decir, los elementos de una zona con cierta peligrosidad sísmica pueden verse afectados en menor o mayor medida dependiendo de su vulnerabilidad sísmica, aumentando o disminuyendo el riesgo sísmico de una estructura u objeto.

Existen varios tipos de edificaciones según el uso que se le dé a la misma, por ejemplo: viviendas, oficinas, estacionamientos, almacenes, centros comerciales, museos, etc. Los cuales tienen contenidos comunes y también contenidos particulares por ejemplo en una vivienda y en una oficina podríamos encontrar contenidos comunes tales como lápices, cuadernos, computadoras, etc., pero cada uno con sus contenidos particulares, una licuadora, camas o estufas en una vivienda y un plotter, un fax o archiveros en una oficina. Todos estos contenidos pueden tener valores muy variados, desde unos cuantos hasta miles de pesos, pero la mayoría son reemplazables, es decir se fabrican en serie.

Sin embargo existen edificaciones en las cuales las pérdidas de contenido del edificio, debido a los terremotos pueden ser importantes, e incluso superar el valor de la pérdida estructural del edificio para algunas ocupaciones, tales como museos, hospitales, laboratorios, e instalaciones industriales.

Por ejemplo los museos contienen piezas las cuales la mayoría son irremplazables. Los museos son edificaciones usadas para exhibir colecciones, es decir, conjuntos de objetos e información que reflejan algún aspecto de la existencia humana o su entorno. Este tipo de colecciones, casi siempre valiosas, son puestas a la vista de la población con fines meramente culturales. Por otra parte están las galerías de arte, donde también se muestran pinturas y esculturas para su posible venta.

Los contenidos y colecciones de los museos al igual que los de las demás edificaciones están sometidos, en su momento, a acciones provocadas por un movimiento sísmico, desplazamiento o volteo, que como ya se dijo con anterioridad pueden provocar la pérdida o daño de estas piezas, las cuales a diferencia de otras, en su mayoría son irremplazables o el hecho de restaurarlas disminuye drásticamente su valor cultural y/o económico. A lo largo de la historia nos podemos encontrar con casos en los cuales las acciones sísmicas provocaron pérdidas al patrimonio artístico de la humanidad que quizá se pudieron haber evitado o en su defecto disminuir el gasto público dedicado a la restauración de las mismas a través de la contratación de seguros contra terremotos.

A continuación se muestran algunos ejemplos:

1. Terremoto de Chile, 27 de Febrero de 2010

El 27 de febrero de 2010 se presentó un sismo de magnitud de 8.8 grados en la escala de Richter. El epicentro se ubicó en el Mar chileno, frente a las localidades de Curanipe y Cobquecura, cerca de 150 kilómetros al noroeste de Concepción y a 63 kilómetros al suroeste de Cauquenes, y a 30.1 kilómetros de profundidad bajo la corteza terrestre. El sismo, tuvo una duración de 3 minutos 25 segundos, al menos en Santiago.

Dentro del patrimonio artístico que resultó dañado por el evento, en el poblado de Viña del Mar, un total de nueve esculturas de mármol resultaron dañadas, con fracturas, fragmentos faltantes, abrasiones, saltaduras y raspaduras, estas esculturas decoraban el Palacio de Vergara. El proyecto para restaurar estas esculturas tuvo un costo de US\$8, 872,800.00.



Figura III Escultura dañada por su caída (Izquierda), restauración de esculturas dañadas (derecha)

También en la región de Talca hubo daños, en la plaza Ignacio Serrano, tres esculturas también resultaron seriamente dañadas, estas esculturas de mármol adornaban dicho parque y su caída les provocó fracturas y raspaduras, las cuales se tradujeron en gastos para el gobierno de la zona.



Figura IV Escultura con fracturas (Izquierda), restauración de esculturas de Talca (derecha)

En el Cementerio General de Santiago en el terremoto una de las 4 figuras principales, cayó al suelo, al igual que la columna superior. La escultura resultó con un brazo roto y fue trasladada a la Dirección Municipal. En junio el monumento había sido despojado de todas las esculturas. Dos de ellas están en la Dirección Municipal y la última que representaba a una madona y un niño (La Caridad), aparentemente fue robada.



Figura V Esculturas del Cementerio General de Santiago, antes (izquierda) y después (derecha) del sismo.

2. Terremoto de España, 11 de mayo de 2011

El 11 de mayo de 2011, en España se presentó un sismo de 5.1 grados en la escala de Richter, sacudiendo principalmente la localidad de Lorca, en la región de Murcia. El epicentro se localizó aproximadamente a 6 kilómetros al suroeste de Lorca. El hipocentro del terremoto fue extremadamente superficial, a unos 2.000 metros de profundidad. El sismo se sintió en todo el sureste peninsular, especialmente en la Región de Murcia.

Independientemente de las víctimas mortales, otra de las consecuencias más graves de estos terremotos fue la pérdida de una parte importante del patrimonio histórico de la ciudad, además de los edificios públicos y las viviendas. El casco histórico de Lorca, declarado Conjunto histórico-artístico desde 1964, se vio muy afectado. El terremoto causó una de las mayores catástrofes para el patrimonio, con 33 edificios históricos afectados y esculturas seriamente dañadas.

La Administración Autonómica, en colaboración con el Ayuntamiento y el Ministerio de Cultura, emprendió una serie de medidas urgentes, como la evacuación de los bienes materiales que guardaban los edificios históricos, que se encontraban en buen estado, en general.

La restauración de las piezas de arte corrió a cargo de varias casas especialistas en el tema generando costos muy elevados para el gobierno local.



Figura VI Escultura de un monje rota (izquierda), restauración de esculturas del Convento de Clarisas de Lorca (derecha).

3. Terremoto de Italia, 6 de abril de 2009

El 6 de abril de 2009 en Italia se presentó un sismo de 6.7 grados en la escala de Richter y fue conocido como el terremoto de L'Aquila. El epicentro se localizó en la ciudad de L'Aquila, región de Abruzzo, mientras que en Roma su magnitud fue de 4,6 grados Richter. El terremoto dejó 308 muertos, 1.500 heridos y unas 50.000 personas perdieron sus casas a causa de la destrucción total o parcial de miles de edificaciones. Las réplicas continuaron los días posteriores al sismo principal, entre ellos varios que superaron los 5 grados en la escala de Richter.

El terremoto dañó numerosos monumentos históricos en la región de Abruzzo. La ciudad de L'Aquila, capital de Abruzzo, fundada en el siglo XIII, resultó entre las más perjudicadas por el gran número de bienes arquitectónicos que contaba, tanto de la época medieval como del Barroco.

La escultura Virgen con el niño, del siglo XVI y obra del italiano Saturnino Gatti, fue rescatada de entre los restos de la basílica de Collemaggio, en L'Aquila, perdió uno de los apoya-brazos del trono en el que reposa la Virgen y parte de mano derecha, la escultura El San Equizio, terminó llena de grietas.



Figura VII Escultura "Virgen con el niño" (izquierda), Basilica de Collemaggio mostrando la falta de una escultura debido a su caída (derecha)

En Roma, las célebres Termas de Caracalla, uno de los monumentos más imponentes de la Roma imperial construidas en el siglo III, resultaron levemente dañadas por el sismo. Un castillo

construido en el siglo XV, durante la dominación española, que es sede del Museo Nacional de Abruozos, sufrió también daños materiales y tuvo que ser cerrado.

4. Terremoto de China, 12 de mayo de 2008

El 12 de mayo de 2008 se presentó un sismo en China, que después sería llamado el terremoto de Sichuan, este sismo tuvo una magnitud de 8.0 grados en la escala de Richter, el epicentro se situó en el condado de Wenchuan, Ngawa Tibetana y Qiang, a 90 km al norte-oeste de Chengdu.

Se sintió incluso en Pekín, Shanghái, a lo largo de la República de China y en la capital de Vietnam, Hanói. La ciudad más importante en cuanto a cercanía al epicentro es la de Chengdu. Fue el segundo terremoto más desastroso de la historia de China, tras el terremoto de Tangshan de 1976, que provocó la muerte de unas 250.000 personas.

Las esculturas conocidas como Guerreros de Terracota situados en las cercanías de la ciudad de Xian (provincia de Shaanxi, centro del país) sufrieron daños y resultaron con algún grado de inclinación además de dislocación, desunión, aberturas y rupturas producto del sismo,. Las esculturas son de una pieza entera excepto brazos y cabeza, por lo que el sismo causó que algunas cabezas se inclinasen y apareciesen grietas en ciertas partes, pero no produjo graves daños al conjunto artístico.

Los Guerreros de Terracota tienen una antigüedad de más 2100 años, por lo que está de más decir que su pérdida sería irreparable.



Figura VIII Guerreros de Terracota, Republica Popular de China

5. Terremoto de Perú, 15 de agosto de 2007

Este sismo fue registrado el 15 de agosto de 2007 a las 18:40, hora local, y tuvo una duración de 175 segundos. El epicentro se localizó a 40 km al oeste de la ciudad de Chincha Alta y a 150 km al suroeste de Lima. El hipocentro de dicho sismo se ubico a 39 km de profundidad. En cuanto a duración y magnitud es el mas grande registrado en ese país.

La magnitud en escala momento fue de 8.0 grados, dejó 513 muertos, 2291 heridos y 76000 viviendas afectadas.

En cuanto al patrimonio cultural dañado, fue muy variado, incluyendo sitios arqueológicos, iglesias del periodo colonial y casas que datan del siglo XVIII y XIX. Entre las zonas más afectadas se

encontraron en su momento, los sitios de monumetos de la edad media y periodos Incas, donde las estructuras hechas de adobe fueron seriamente dañadas.

Las iglesias, en especial las que fueron construidas entre el siglo XVI y XVII, resultaron muy dañadas, en la estructura y en el arte sacro que contenían. En el caso de la iglesia de la Compañía en Pisco, colapso totalmente.

El sismo tambien causo daños en el Museo Regional Ica, donde se encuentra la mayor colección de objetos antiguos, locales y nacionales. Los daños que sufrió la colección tambien fueron considerables. Otro museo que resultó dañado fue el Huaca Malena, en el que algunas partes colapsaron, y muchas piezas de la colección cayeron al suelo.

La mayoría de las fallas en estas estructuras fue debido a los procesos constructivos y a los materiales de aquella epoca.



Figura IX Daños estructurales y en contenidos de los recintos culturales en Perú despues del sismo de 2007

6. Terremoto de México, 28 de julio de 1957

El domingo 28 de julio de 1957 a las 02:44 horas de la Ciudad de México, se presentó un sismo de 7.7 grados en la escala de Richter, este sismo también fue conocido como el terremoto del Ángel. El epicentro de este sismo se ubico en el puerto de Acapulco, en la costa del estado de Guerrero, el saldo de este sismo fue de 700 muertos y más de 2500 personas resultaron heridas.

Varios edificios y casas habitación localizados sobre la avenida Reforma, Insurgentes, Bucareli y la calzada del Obrero Mundial fueron de las más dañadas y la caída de la emblemática Victoria Alada o Ángel de la Independencia fueron de los daños más destacados.

La escultura cayó a tierra y fue reconstruida y reestructurada por un grupo de técnicos encabezados por el escultor José María Fernández Urbina. Este trabajo tardó más de un año en concluirse, por lo que la columna permaneció sin su colosal complemento, hasta el 16 de septiembre de 1958 en que fue reinaugurada.



Figura X Columna del Angel de la Independencia, sin la escultura de la Victoria Alada

El Angel de la Independencia es una escultura de bronce hueca recubierta de oro, tiene una altura de 6.7 m y un peso aproximado de 7 toneladas. Su caída desde una altura de 90.16 m, provocó que se rompiera en varios fragmentos, haciendo la restauración sumamente difícil y costosa.



Figura XI Las fotografías muestran el tamaño que posee el Ángel de la Independencia

Una vez que la escultura fue reparada y restaurada por el equipo del escultor José María Fernández Urbina, a mediados de 1958 se realizó la complicada maniobra para regresarla a su sitio. Al celebrarse las fiestas patrias de 1958, la escultura estaba nuevamente en su sitio, completamente renovada.



Figura XII Maniobras de colocación de la escultura del Ángel a su posición en la columna

Una vez que fue reparada y vuelta a colocar en su sitio, pudo soportar el más fuerte temblor que se recuerde, de 8.2 grados de la escala de Richter, en el año de 1985.

La cabeza del Ángel de la Independencia original, tal cual quedó después de su caída en 1957 se puede ver en la Casa de los Condes de Heras y Soto, que fue propiedad del Conde de Heras y Soto, uno de los firmantes del Acta de Independencia en 1821. Este edificio se encuentra en el Centro Histórico de la Ciudad de México, en República de Chile esquina con Donceles y actualmente aloja el Archivo Histórico de la Ciudad.

Como estos, existen muchos más casos alrededor del mundo, los cuales demuestran la necesidad de conocer el riesgo que presenta el patrimonio artístico de la humanidad en caso de verse afectado por un movimiento sísmico.

Actualmente algunos museos poseen una normativa de seguridad en el traslado y colocación de obras de arte, las cuales hacen énfasis en las partes susceptibles a fracturas, rompimientos o rapaduras en las mismas. Por ejemplo, todas las partes sobresalientes de una escultura (cabeza, manos, cuello, etc.) nunca deberán ser sometidas a presión, ya que son las partes más frágiles de la misma. Estos datos sirven para tener una idea de las partes más frágiles o susceptibles a fracturas en una escultura y como el apoyo directo sobre el suelo puede provocar inestabilidad en las mismas.

Algunas aseguradoras recomiendan que las obras de arte como los cuadros deben estar bien sujetos a las paredes con fijaciones especiales que impidan que se caigan, las esculturas y otros objetos de arte deben tener un soporte o ser fijados a las estanterías y en caso de tener botellas de vino de valor, deben ser correctamente colocados en una bodega, rejilla o refrigerador que evite que las botellas se muevan y se rompan por los movimientos sísmicos.

Sin embargo, existe el caso en que muchas obras de arte u objetos históricos es imposible fijarlos o atornillarlos a estanterías o bases, ya que el hecho de perforarlas o colocarles aditamentos puede dañarlas y hacer que su valor original decaiga al sufrir esta modificación.

En la actualidad existe un paquete de seguros contra terremotos, que es una cobertura optativa y adicional al seguro de incendio, cuyo objetivo es cubrir los daños materiales que sufra el inmueble asegurado como consecuencia de un terremoto. El fin de este seguro, es reparar el daño ante una

pérdida material, que está condicionada a un monto de dinero, que cada periodo de tiempo el consumidor paga como parte de su dividendo.

Pueden existir más, pero estas son las tres coberturas básicas que manejan:

- Una que cubra los daños estructurales que puedan surgir en el inmueble
- Una que proteja los artículos y utensilios que se encuentren en el interior de la vivienda
- Garantías que se relacionan con la pérdida de beneficios por inhabilitación de los inmuebles

El costo de este seguro la mayoría de las veces va en función del valor de la edificación y sus contenidos.

Desde el reciente terremoto en Japón (2011) ha aumentado en varios miles la contratación de pólizas con cobertura de terremotos. Una prevención adecuada, la preparación y la información son clave para disminuir las pérdidas potenciales.

Este estudio busca relacionar las propiedades físicas y geométricas que posee cada objeto contenido y la aceleración del suelo causada por un sismo. Relacionando las variables y utilizando metodologías propuestas se llega a conocer que tan probable pueden ser ciertos objetos a sufrir mecanismos de falla en función de la PGA (*Peak Ground Acceleration*) del suelo, para así poder tomar medidas para la protección de los visitantes y de las obras mismas, reduciendo al mínimo las pérdidas humanas y económicas debido a la caída de estas.

Los riesgos que los terremotos representan para la sociedad, tales como la pérdida de vidas humanas, las lesiones y las pérdidas económicas, se pueden reducir considerablemente mediante una mejor planificación, prácticas preventivas e información adecuada para mejorar la respuesta cuando ocurran estos sucesos.

CAPITULO 1

Recopilación de información de casos de estudio

La recopilación de información como en la mayoría de los estudios es el primer paso de esta metodología, esta se divide en una descripción general de la estructura que contiene el inventario de estudio y una descripción detallada de los contenidos de estudio. Esto es el parte aguas del estudio, por lo cual una recopilación fiable de esta información es medular en el estudio.

1.1 Descripción general de las edificaciones

Una descripción general de los edificios que contienen los inventarios que se van a estudiar es importante, ya que a partir de esta información se puede tener una imagen general de todo lo que rodea a los objetos que se estudiarán, tales como, la ubicación y localización del inmueble, las colecciones que posee, el número de obras, año de construcción e información general que pueda ayudar a conocer la importancia del inventario que posee dicha edificación. A este nivel no hace falta una descripción técnica.

1.2 Información del inventario de contenidos

La información que se obtiene de las esculturas es la más importante ya que el estudio parte bajo la hipótesis de que existe una relación matemática entre el comportamiento de una escultura bajo la acción de un movimiento sísmico y sus propiedades geométricas. Muchas veces es imposible recaudar información precisa de las obras ya que por políticas del museo de estudio, no está permitido acercarse demasiado a las mismas, sin embargo, habrá que hacer aproximaciones muy precisas a las mediciones que se tendrían al medir directamente la obra en cuestión.

La información que básicamente se requiere en cuanto a cada escultura individualmente son dos dimensiones, ancho y alto en dos planos, a los que se llamaron *plano favorable* y *plano desfavorable*, la figura 2.1 ilustra estos planos, el material del cual está hecha la escultura, el autor y si esta descansa sobre una base de otro material, indicar el material y las dimensiones de la misma.

Para la recopilación de la información se acude físicamente a las edificaciones que se pretendan estudiar, una vez allí se toman fotografías (con una cámara digital de preferencia para que su manejo electrónico sea más fácil) a la edificación, sus componentes estructurales y no estructurales, además de a los contenidos más representativos de la misma, ya que muchas veces pueden llegar a contener mas 2000 piezas.

Para la recopilación de la información se utilizó la siguiente metodología:

1. Se visita físicamente la estructura de estudio
2. Se identifica el número de niveles que posee
3. Se identifica el material del cual están hechos los elementos estructurales

4. Se identifican los elementos no estructurales
5. Se toman fotografías de las esculturas representativas
6. Se toma una fotografía en su plano favorable (en el que su momento de inercia sea mayor)
7. Se toma una fotografía en su plano desfavorable, (en el que su momento de inercia se menor)
8. Se registran las medidas de la altura y el ancho de cada plano de la escultura
9. Se registra el material del cual está hecha la escultura y el autor de la misma
10. Se registra las dimensiones y material de la base sobre la cual reposa, en caso de existir
11. Se registra en qué nivel se encuentra la estructura
12. Una vez que se haya terminado de recopilar la información en una sala, se toma una fotografía panorámica de la sala que se documentó



Figura 1.1 La fotografía ilustra el plano favorable (izquierda) y el plano desfavorable (derecha) de una escultura del Museo Soumaya

La planta baja no se toma como un nivel, o sería el nivel cero para uso práctico, ya que en el plano arquitectónico de los mismos museos, así se maneja y se quiso conservar el formato original de la fuente.

1.3 Aplicación a los museos de estudio

1.3.1 Descripción general de los museos de estudio

❖ Museo Soumaya

El Museo Soumaya Plaza Carso se encuentra ubicado en la colonia Ampliación Granada de la delegación Miguel Hidalgo en la ciudad de México, y cuenta con más de 66,000 obras de arte, incluidas tanto las de la época prehispánica como las de la pintura mexicana del siglo XX. Es considerado uno de los más completos de su tipo.

En un recorrido, los visitantes pueden admirar muestras de las siguientes colecciones:

- Monedas virreinales, republicanas y del Segundo Imperio Mexicano.
- Retratos mexicanos del siglo XIX y artes aplicadas.
- Antiguos maestros europeos y novohispanos.
- Paisajes mexicanos y europeos del siglo XIX. Impresionismo y primeras vanguardias.
- Culturas mesoamericanas del Occidente (colección recibida por el museo en comodato del Instituto Nacional de Antropología e Historia). Arte mexicano del siglo XX.

- En el último nivel, accesible sólo a través de la sala 5, se encuentra la colección escultórica (piezas originales de Auguste Rodín, que constituye el segundo conjunto más importante de este autor francés en el mundo, y las ensoñaciones de Salvador Dalí).



Figura 1.2 Aspecto del Museo Soumaya

En el año 2008 comenzó la construcción de Plaza Carso y en el 2009, inició la del Museo Soumaya, para el año 2010, la estructura metálica tubular fue dando forma al nuevo edificio, los materiales empleados fueron concreto reforzado, acero, vidrio y aluminio.

El Museo fue inaugurado el 1 de marzo de 2011 en una magna ceremonia a la que asistieron Carlos Slim, Emilio Azcárraga, el Presidente de la República Mexicana, Felipe Calderón y otros invitados más; sin embargo hasta el día 28 de marzo de 2011 abrió sus puertas al público en general.



Figura 1.3 Distribución de las exposiciones permanentes y servicios del Museo Soumaya Polanco

El Museo Soumaya, sin duda alguna, es el ícono de Plaza Carso. Es un edificio que muestra un atrevimiento arquitectónico que rompe con los paradigmas existentes en lo referente a este tipo de construcciones en nuestro país, su forma es de un cubo que se desdobra que carece de esquinas.

Diseñado por el arquitecto Fernando Romero, el Museo Soumaya presenta una moderna geometría estructural que surge de un punto central radiado en ángulos uniformes y en su estructura muestra una ligera asimetría en planta y alzados.

❖ *Museo Nacional de Antropología*

El Museo Nacional de Antropología (MNA) es uno de los recintos museográficos más importantes de México y de América Latina. Está concebido para albergar y exhibir el legado arqueológico de los pueblos de Mesoamérica, así como para dar cuenta de la diversidad étnica actual del país. El edificio actual del MNA fue construido entre 1963 y 1964 en el Bosque de Chapultepec por instrucción del presidente Adolfo López Mateos, quien lo inauguró el 17 de septiembre de 1964.

El Museo Nacional de Antropología cuenta con 24 salas de exhibición, de las cuales 23 son permanentes y una está destinada a exposiciones temporales, que en ocasiones son muestras museográficas provenientes de diversos museos del mundo. El acceso a ésta última se encuentra separado del resto del museo.

Las salas de antropología y arqueología están dispuestas alrededor de la parte descubierta del patio central, que es donde se encuentra el estanque de lirios, y están ordenadas según un criterio cronológico comenzando por el lado derecho hasta llegar a la sala Mexica. Las salas de antropología y arqueología son:

- Introducción a la antropología
- Poblamiento de América
- Preclásico en el Altiplano Central
- Teotihuacán
- Los Toltecas y su época
- Mexica
- Culturas de Oaxaca
- Culturas de la Costa del Golfo
- Maya
- Culturas del Norte
- Culturas de Occidente



Figura 1.4. Fachada del Museo Nacional de Antropología

El diseño y planeación general del Museo Nacional de Antropología son únicos en la historia de la arquitectura moderna en México. Un equipo multidisciplinario de especialistas, concibió un espacio innovador, diseñado específicamente para albergar las colecciones arqueológicas y etnográficas más importantes del país.

El diseño museográfico tuvo un impacto nacional y mundial. Las salas tienen alturas diferenciadas en los techos: tres metros y medio en la sección de los antecedentes y seis metros en las áreas donde se exhiben los grandes logros culturales. La Sala Mexica mantiene siempre la altura de seis metros, como una manera de exaltar a esta cultura.



Figura 1.5 Distribución de las salas de exposición del Museo Nacional de Antropología

Es una estructura de concreto reforzado y cuenta con 45 mil m² construidos, y únicamente 30 mil corresponden a las áreas de exhibición, lo cual representa un recorrido de 5.5 km. El resto de los

espacios, es decir 15 mil m², están destinados al área académica, biblioteca, áreas de investigación arqueológica y de etnografía, almacenes y bodegas, talleres de restauración, de conservación y otros servicios de apoyo.

❖ *Instituto de Ingeniería UNAM*

El Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM) es el centro de investigación en diversas áreas de la ingeniería más productivo del país. Sus instalaciones ocupan 15 edificios en la zona de Ciudad Universitaria, en la ciudad de México, con una extensión de 26,020 metros cuadrados construidos entre laboratorios, cubículos, áreas comunes y un auditorio.

Desde su fundación en 1956, la política del Instituto ha sido realizar investigación orientada a problemas generales de la ingeniería, colaborar con entidades públicas y privadas para mejorar la práctica de la ingeniería en el ámbito nacional, proporcionar servicios de ingeniería a los diversos sectores de la sociedad. Asimismo, ha puesto especial atención en la formación de recursos humanos y en difundir los resultados de sus investigaciones, contribuyendo así al desarrollo del país y al bienestar de la sociedad.

El edificio 1 “Fernando Hiriart Balderrama” se encuentra a un costado de la Torre de Ingeniería, consta de dos plantas las cuales albergan la dirección, la secretaría académica, de planeación y desarrollo académico y administrativa. Sismología e instrumentación sísmica, promoción y comunicación, laboratorio de instrumentación sísmica y la unidad de servicios de información.

Este edificio resalta o es objeto de estudio porque tiene en su interior 6 esculturas de barro y engobe, hechas por la escultora Maribel Pórtela entre los años 2004 y 2008.



Figura 1.6 Edificio “Fernando Hiriart Balderrama” (izquierda), esculturas “Jardín Onírico” dentro del edificio (derecha)

El edificio 13 “Torre de Ingeniería”, consta de 7 pisos en los cuales se encuentran albergados el laboratorio LTST, mecánica y energía, grupo de hidromecánica, ingeniería sismológica, ingeniería de procesos Industriales y ambientales, laboratorio de geoinformática y la secretaría técnica.

En este edificio se encuentra una escultura en el primer nivel, el cual consta de un cubo de acrílico sobre una estructura de acero la cual se muestra en la figura siguiente.



Figura 1.7 Torre de Ingeniería (izquierda), escultura dentro del edificio (derecha)

La información general de las edificaciones se puede levantar en sitio llenando los siguientes formatos como se muestra en la siguiente página.

Tabla 1.1 Formato de recabación de información básica del Museo Soumaya

MUSEO SOUMAYA																
USO DE LA EDIFICACIÓN	<input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="19"/> NIVELES <input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="7"/>															
UBICACIÓN	Latitud <input style="width: 100px;" type="text" value="19.4407"/> Longitud <input style="width: 100px;" type="text" value="- 99.2046"/>															
LOCALIZACIÓN	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%; padding: 2px;">Calle</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 30%;">Miguel Ángel de Cervantes</td> <td style="width: 20%; padding: 2px;">Colonia</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 30%;">Ampliación Granada</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Delegación o municipio</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Miguel Hidalgo</td> <td style="padding: 2px;">CP</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">11529</td> </tr> </table>	Calle	Miguel Ángel de Cervantes	Colonia	Ampliación Granada	Delegación o municipio	Miguel Hidalgo	CP	11529							
Calle	Miguel Ángel de Cervantes	Colonia	Ampliación Granada													
Delegación o municipio	Miguel Hidalgo	CP	11529													
DESCRIPCIÓN GENERAL	El Museo Soumaya tiene una forma muy singular, ya que no cuenta con esquinas en su superficie, tiene una estructura de acero y toda la fachada está recubierta por hexágonos de aluminio. En su interior tiene pocas columnas que pudieran disminuir el área de las salas.															
ELEMENTOS ESTRUCTURALES																
<input style="width: 40px; height: 20px;" type="checkbox"/> A	Acero															
<input style="width: 40px; height: 20px;" type="checkbox"/> C	Concreto															
<input style="width: 40px; height: 20px;" type="checkbox"/> M	Mampostería															
ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES																
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="width: 60%;"></th> <th style="width: 20%;">SI</th> <th style="width: 20%;">NO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left; padding: 2px;">Falso plafón</td> <td></td> <td style="text-align: center;">√</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left; padding: 2px;">Muros divisorios</td> <td style="text-align: center;">√</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: left; padding: 2px;">Cancelería</td> <td></td> <td style="text-align: center;">√</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left; padding: 2px;">Iluminación</td> <td style="text-align: center;">√</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		SI	NO	Falso plafón		√	Muros divisorios	√		Cancelería		√	Iluminación	√	
	SI	NO														
Falso plafón		√														
Muros divisorios	√															
Cancelería		√														
Iluminación	√															
NOTAS																
CLAVES USO DE EDIFICACIÓN																
1 Almacén	16 Industria															
2 Banco	17 Laboratorio															
3 Biblioteca	18 Librería															
4 Central de comunicación	19 Museo															
5 Central eléctrica	20 Oficina															
6 Centro comercial	21 Restaurante															
7 Comercio	22 Taller															
8 Deposito de sustancias	23 Terminal de transporte															
9 Escuela	24 Vivienda															
10 Estacionamiento																
11 Fabrica																
12 Funeraria																
13 Hangar																
14 Hospital																
15 Hotel																

Tabla 1.2 Formato de información básica del Museo Nacional de Antropología

MUSEO NACIONAL DE ANTROPOLOGÍA																
USO DE LA EDIFICACIÓN	<input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="19"/> NIVELES <input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="1"/>															
UBICACIÓN	Latitud <input style="width: 100px; text-align: center;" type="text" value="19.426"/> Longitud <input style="width: 150px; text-align: center;" type="text" value="- 99.186"/>															
LOCALIZACIÓN	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%; padding: 2px;">Calle</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">Pase de la Reforma S/N</td> <td style="width: 20%; padding: 2px;">Colonia</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">Chapultepec</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Delegación o municipio</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">Miguel Hidalgo</td> <td style="padding: 2px;">CP</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">11560</td> </tr> </table>	Calle	Pase de la Reforma S/N	Colonia	Chapultepec	Delegación o municipio	Miguel Hidalgo	CP	11560							
Calle	Pase de la Reforma S/N	Colonia	Chapultepec													
Delegación o municipio	Miguel Hidalgo	CP	11560													
DESCRIPCIÓN GENERAL	El Museo Nacional de Antropología es una estructura más conservadora, arquitecturalmente hablando, está hecha de concreto, y su colección más importante se encuentra en la planta baja, tiene un patio central que une todas las salas, a diferencia de otros museos en que el recorrido es lineal															
ELEMENTOS ESTRUCTURALES																
<input style="width: 40px; text-align: center;" type="text" value="A"/> Acero	<input style="width: 60px; text-align: center;" type="text" value="e"/> Concreto															
<input style="width: 60px; text-align: center;" type="text" value="M"/> Mampostería																
ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES																
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;"></th> <th style="width: 25%;">SI</th> <th style="width: 25%;">NO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">Falso plafón</td> <td style="text-align: center;">√</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Muros divisorios</td> <td style="text-align: center;">√</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Cancelería</td> <td></td> <td style="text-align: center;">√</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Iluminación</td> <td style="text-align: center;">√</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		SI	NO	Falso plafón	√		Muros divisorios	√		Cancelería		√	Iluminación	√	
	SI	NO														
Falso plafón	√															
Muros divisorios	√															
Cancelería		√														
Iluminación	√															
NOTAS																
CLAVES USO DE EDIFICACIÓN																
1 Almacén	16 Industria															
2 Banco	17 Laboratorio															
3 Biblioteca	18 Librería															
4 Central de comunicación	19 Museo															
5 Central eléctrica	20 Oficina															
6 Centro comercial	21 Restaurante															
7 Comercio	22 Taller															
8 Deposito de sustancias	23 Terminal de transporte															
9 Escuela	24 Vivienda															
10 Estacionamiento																
11 Fabrica																
12 Funeraria																
13 Hangar																
14 Hospital																
15 Hotel																

Tabla 1.3 Formato de información básica del Instituto de Ingeniería UNAM

INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM																
USO DE LA EDIFICACIÓN	<input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="20"/> NIVELES <input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="1"/>															
UBICACIÓN																
Latitud	<input style="width: 100px;" type="text" value="19.329"/>															
Longitud	<input style="width: 100px;" type="text" value="- 99.181"/>															
LOCALIZACIÓN																
Calle	<input style="width: 150px;" type="text" value="Circuito Escolar S/N"/>															
Delegación o municipio	<input style="width: 150px;" type="text" value="Coyoacán"/>															
Colonia	<input style="width: 150px;" type="text" value="Ciudad Universitaria"/>															
CP	<input style="width: 150px;" type="text" value="04510"/>															
DESCRIPCIÓN GENERAL	Las esculturas de estudio en esta edificación se encuentran en el lobby del edificio 1, el cual está hecho de concreto y cuenta con planta baja y un nivel. En este edificio se llevan a cabo tareas administrativas del propio instituto.															
ELEMENTOS ESTRUCTURALES																
<input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="A"/> Acero	<input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="C"/> Concreto															
<input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="M"/> Mampostería																
ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES																
	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50px;"></th> <th style="width: 50px; text-align: center;">SI</th> <th style="width: 50px; text-align: center;">NO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 2px;">Falso plafón</td> <td style="text-align: center;">√</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Muros divisorios</td> <td></td> <td style="text-align: center;">√</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Cancelería</td> <td style="text-align: center;">√</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Iluminación</td> <td style="text-align: center;">√</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		SI	NO	Falso plafón	√		Muros divisorios		√	Cancelería	√		Iluminación	√	
	SI	NO														
Falso plafón	√															
Muros divisorios		√														
Cancelería	√															
Iluminación	√															
NOTAS																
CLAVES USO DE EDIFICACIÓN																
1 Almacén	16 Industria															
2 Banco	17 Laboratorio															
3 Biblioteca	18 Librería															
4 Central de comunicación	18 Museo															
5 Central eléctrica	20 Oficina															
6 Centro comercial	21 Restaurante															
7 Comercio	22 Taller															
8 Deposito de sustancias	23 Terminal de transporte															
9 Escuela	24 Vivienda															
10 Estacionamiento																
11 Fabrica																
12 Funeraria																
13 Hangar																
14 Hospital																
15 Hotel																

1.3.2 Información del inventario de contenidos en los museos de estudio

La información requerida para el estudio se puede vaciar en este formato, las dimensiones de base y altura se refieren a la escultura, las dimensiones de la base se incluyen a la izquierda.

<i>El pensador</i>	<i>Plano X</i>	<i>Plano Y</i>
Material: Bronce con patina negra.		
Base del objeto: Madera de 1.5 x 1.5 x 1.4 m		
Ubicación: Planta Baja.		
Autor: Auguste Rodin.		
	B: 1.30m H: 1.70m	B: 0.80m H: 1.70m
<i>Cristo de San Juan de la Cruz</i>	<i>Plano X</i>	<i>Plano Y</i>
Material: Bronce con patina dorada.		
Base del objeto: Madera de 1.5 x 1.5 x 0.6 m		
Ubicación: Nivel 6		
Autor: Salvador Dalí.		
	B: 0.50m H: 2.60m	B: 0.50m H: 2.60m
<i>La mujer en llamas</i>	<i>Plano X</i>	<i>Plano Y</i>
Material: Bronce con patina dorada.		
Base del objeto: Madera de 1.3 x 1.3 x 0.2 m		
Ubicación: Nivel 6		
Autor: Salvador Dalí.		
	B: 0.5m H: 1.85m	B: 0.60m H: 1.85m

Figura 1.8 Algunos contenidos de las salas del Museo Soumaya

N
I
V
E
L
6



N
I
V
E
L
4



N
I
V
E
L
3



N
I
V
E
L
2

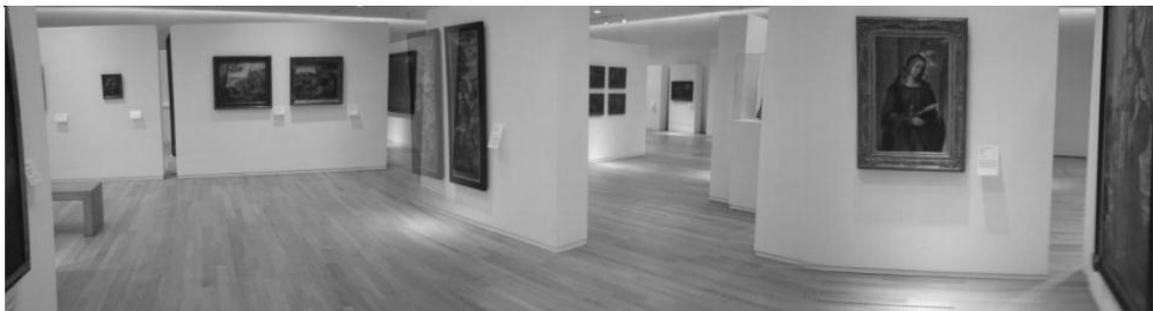


Figura 1.9 Panorámica de algunas salas del Museo Soumaya

<i>Estela de Acapulco</i>	<i>Plano X</i>	<i>Plano Y</i>
Material: Roca.		
Base del objeto: Madera de 1.0 x 1.0 x 0.4 m		
Ubicación: Planta Baja		
Autor: Culturas del Norte		
	B: 0.40m H: 1.60m	B: 0.30m H: 1.60m
<i>Cabeza colosal</i>	<i>Plano X</i>	<i>Plano Y</i>
Material: Roca.		
Base del objeto: Madera de 1.5 x 1.5 x 1.1 m		
Ubicación: Planta Baja		
Autor: Culturas del Golfo		
	B: 1.3m H: 1.70m	B: 1.05m H: 1.70m
<i>Coatlicue</i>	<i>Plano X</i>	<i>Plano Y</i>
Material: Roca.		
Base del objeto: Madera de 2.0 x 2.0 x 1.1 m		
Ubicación: Planta Baja		
Autor: Cultura Mexica		
	B: 0.90m H: 2.20m	B: 0.80m H: 2.20m

Figura 1.10 Algunos contenidos de las salas del Museo Nacional de Antropología

S
A
L
A

1



S
A
L
A

2



S
A
L
A

3



S
A
L
A

4



Figura 1.11 Panorámica de algunas salas del Museo Nacional de Antropología

*Estimación de daños a contenidos en museos por sismo:
caso Museo Soumaya y Museo Nacional de Antropología de la Ciudad de México*

<i>Busto de Fernando Hiriart</i>	<i>Plano X</i>	<i>Plano Y</i>
Material: Bronce y mármol.		
Base del objeto:		
Ubicación: Planta Baja		
Autor:		
	B: 0.44m H: 1.80m	B: 0.44m H: 1.80m

<i>Escultura 1</i>	<i>Plano X</i>	<i>Plano Y</i>
Material: Barro y engobe		
Base del objeto:		
Ubicación: Planta Baja		
Autor: Maribel Pórtela		
	B: 0.22m H: 1.70m	B: 0.22m H: 1.70m

<i>Escultura 2</i>	<i>Plano X</i>	<i>Plano Y</i>
Material: Barro y engobe		
Base del objeto:		
Ubicación: Planta Baja		
Autor: Maribel Pórtela		
	B: 0.30m H: 1.50m	B: 0.30m H: 1.50m

Figura 1.12 Algunos contenidos artísticos individuales del Instituto de Ingeniería UNAM



Figura 1.13 Panorámica de las esculturas del edificio 1 del Instituto de Ingeniería UNAM

1.4 Resumen de información obtenida en los museos de estudio

En la parte anterior se explicó cómo se efectuó la recopilación de información en campo y se mostró como se organizó en diversos formatos, sin embargo, solo se mostraron algunos de los contenidos de los cuales se obtuvo información, a continuación, se muestra un ejemplo del resumen de la información recabada. Para consultar el total de la información, ver el anexo A de esta tesis.

Tabla 1.4 Resumen de información obtenida en campo de los contenidos del Instituto de Ingeniería UNAM, en su plano favorable

I N S T I T U T O D E I N G E N I E R Í A						
P L A N O F A V O R A B L E						
ID	[NIVEL]	OBJETO	MATERIAL	BASE [m]	ALTURA [m]	AUTOR
1	PB	Busto Fernando Hiriart	Bronce y marmo	0.45	1.8	Desconocido
2		Escultura 1	Barro y engobe	0.23	1.7	Pórtela
3		Escultura 2	Barro y engobe	0.31	1.5	Pórtela
4		Escultura 3	Barro y engobe	0.26	1.3	Pórtela
5		Escultura 4	Barro y engobe	0.11	1.5	Pórtela
6		Escultura 5	Barro y engobe	0.19	1.9	Pórtela
7		Escultura 6	Barro y engobe	0.13	1.7	Pórtela
8	1	Escultura Torre de Ingeniería	Acero y acrílico	0.77	2.5	Desconocido

Como se puede observar en las tablas anteriores, el parámetro que define si se trata de un plano favorable o desfavorable es la “BASE”, que se refiere a la base directa de la escultura, y es decir, los valores mayores de este parámetro en un plano favorable son mayores a sus correspondientes en un plano desfavorable, sin embargo, en los contenidos del Instituto de Ingeniería, se observa que los valores son similares, lo que concluye que son simétricas en ambos planos y los efectos que se analizaran en un plano y en otro serán iguales.

El parámetro “ALTURA” se mantiene constante en ambos planos, ya que este registra la máxima altura que se observa, como los planos (favorable y desfavorable) son paralelos al eje z, esta se mantendrá invariable.

Los demás parámetros son propios de cada estructura, como el material del cual está hecho, el nombre que su autor le dio, así como el nivel en el que se encuentran.

1.5 Información sísmica

Todos los sismos en el pasado han causado fatalidades y pérdidas económicas, es por eso que la información sísmica es la otra parte medular del estudio de este trabajo de tesis, los movimientos del suelo se utilizan para simular el comportamiento de los objetos de estudio, es decir su tendencia a volcarse o a deslizarse bajo la acción de estos. Contar con información sobre los sismos ocurridos también sirve para conocer qué tipos de sismos se presentan, las magnitudes y las PGA que existen en la zona.

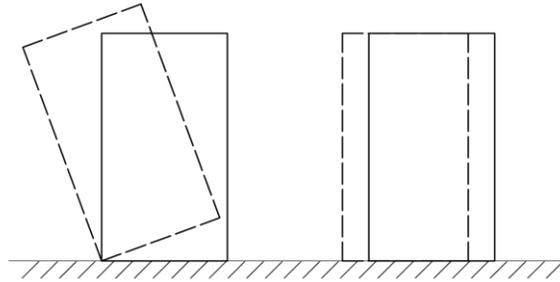


Figura 1.14 Vuelco de un objeto (izquierda) y deslizamiento de un objeto (derecha)

La información sísmica necesaria fue obtenida del sismógrafo localizado en Ciudad Universitaria, esta información es medular para poder realizar las graficas de volteo y deslizamiento que se muestran en los capítulos siguientes.

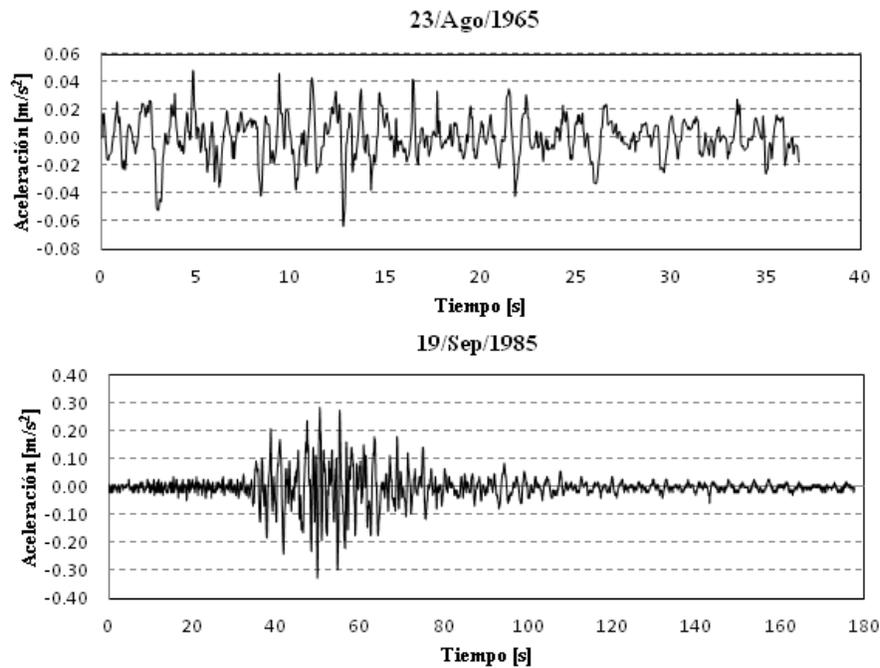


Figura 1.15 Acelerogramas de algunos sismos utilizados en este estudio

Los sismos utilizados en el estudio se resumen a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 1.5 Sismos utilizados en este estudio

REGISTROS DEL SISMÓGRAFO DE CIUDAD UNIVERSITARIA			
ID	FECHA	PGA [m/s²]	DURACIÓN DEL REGISTRO [s]
1	23/08/1965	0.0639	36.74
2	07/06/1976	0.066	46.76
3	19/03/1978	0.0579	40.58
4	29/11/1978	0.0657	55.34
5	14/03/1979	0.138	55.22
6	07/06/1982	0.0679	57.74
7	19/09/1985	0.325	177.96
8	21/09/1985	0.105	31.92
9	30/04/1986	0.0411	49.92
10	25/04/1989	0.0978	54.14
11	31/05/1990	0.032	148.9
12	24/10/1993	0.0342	327
13	10/12/1994	5.44	327.27
14	14/09/1995	0.0763	327.7
15	15/07/1996	4.06	46.64
16	03/02/1998	1.21	120.98
17	09/08/2000	3.34	129.04
18	22/01/2003	3.74	140.1
19	01/01/2004	2.17	95.04

Se utilizaron solo los registros de esta estación, al ser los únicos disponibles, pero son suficientes para la realización de este trabajo de tesis.

En este capítulo se mostraron los datos básicos para la realización de este estudio, así como la metodología de obtención de algunos de los mismos, en las tablas mostradas, se encuentra la información necesaria y resumida de todo este capítulo.

CAPITULO 2

Estimación simplificada de costos en cuadros y esculturas

Aparte del gusto personal, hay, según los expertos, algunas claves que considerar cuando se evalúa la compra de una obra de arte: autenticidad, el tema, los materiales, su condición, tamaño, estilo y fecha de creación, dónde ha sido expuesta, si es difícil de conseguir y su calidad plástica.

El contexto socioeconómico y las tendencias estéticas y culturales del momento son influyentes, pero quizás el aspecto fundamental en el precio de una obra es el mismo artista y su currículum.

Según Diana Moreinis, asesora e historiadora de arte, el precio de la pieza varía si la obra es de un artista emergente, establecido o famoso. "Los artistas establecidos ya son conocidos y venden en galerías, a través de *dealers* y subastas. Tienen precios más altos y un mercado secundario (internacional). Los artistas famosos son los más costosos. Muchos han muerto y hay pocas obras disponibles".

Hay algunos indicadores indirectos del valor de una obra o de la promesa artística de un género. El más importante es la estabilidad del juicio de distintas generaciones de artistas, receptores y críticos a lo largo del tiempo.

Por otro lado, la inversión en autores noveles es más estética que financiera y el consumo puede seguir modas por ejemplo: la obra de Frida Kahlo se disparó cuando Madonna declaró en público su gusto por su pintura. Asimismo, Picasso y Van Gogh cuando los japoneses irrumpieron en el mercado del arte, movidos sobre todo por el excedente de dinero que provocaba la gran situación económica del país y por el deseo de encontrar nuevas vías para rentabilizar el dinero.

En otras palabras no existe un método con el cual se pueda calcular el valor de una obra de arte, ya que intervienen muchos factores subjetivos, sobre los cuales no se tiene algún control, en este capítulo se propone utilizar un método desarrollado en la tesis doctoral de Isabel Montero Muradas "Una valoración de obras de arte", a la cual se le hace una modificación para obtener resultados más cercanos a la realidad.

2.1 Metodología

2.1.1 Estimación del valor de la firma del artista.

No existe un modelo generalmente aceptado para la valoración de una obra de arte, como ya se dijo anteriormente, dependen de muchos factores históricos y subjetivos de la persona que valúa, así que Isabel Montero propone un esquema que proporcione el proceso de un valuador.

Primero, se procede a la determinación del costo o valor de la firma de un artista, es decir, ¿Cuánto cuestan las obras de determinado autor?, y por otro, la delimitación de la importancia que los diferentes factores relacionados con su vida y producción artística tiene en la cotización de una determinada obra.

Para fines prácticos y debido al alcance de este trabajo de tesis el parámetro de importancia y que se utilizara para esta valuación simplificada, es el valor de la firma del artista, para ello se parte de la noción de notoriedad o fama, que suele medirse en términos medios por la cotización de la firma del pintor en un mercado específico. Este mercado ha asignado en esa cotización media, calculable a partir de información de precios de subastas o de bases de datos propias del evaluador a la obra del artista, apreciable en una serie de valores medios.

La cotización media puede referirse a una obra estándar de dimensiones normales del artista que viene a recoger el tema y la técnica que usualmente aparecen en sus obras.

La determinación de la cotización media de la obra del autor se efectuara cada año en función de las proyecciones de los datos realizadas a partir de la información de las ventas de los distintos autores en el mercado.

2.1.2 Valor de la firma del artista.

La información disponible, procedente de las fuentes antes indicadas, puede ser escasa y, por ello, limitar el tipo de modelo estadístico a emplear, en esta primera etapa. De tal forma que al utilizar un determinado método de cálculo, se debe tratar que el mismo pueda proporcionar la mayor información sobre la cotización media de la obra del artista, teniendo en cuenta los datos disponibles, en este caso se tomaron tres obras significativas que siguieran un patrón.

En cualquier caso se debe proceder a la homogeneización monetaria de los precios, tomando el año de estudio como período de referencia, antes de determinar un precio medio de la firma del artista.

En el documento de donde se obtiene esta información se propone un ejemplo: la determinación de un valor medio en un cuadro, (en este caso pesos por cm²) por técnica y tamaño. Para ello se procede a agrupar los datos disponibles, una vez homogeneizados monetariamente los precios, por las técnicas utilizadas. Una vez efectuada esta asociación se separan por tamaños los cuadros del pintor considerado. Cuando la base de datos disponibles es más amplia, generada por pintores con una amplia producción artística basada en diferentes técnicas y una presencia apreciable en el mercado del arte, a través de su cotización en subastas.

2.1.3 Valuación de una obra de arte

Una vez obtenido el valor de mercado de la firma de un autor y destacados los aspectos más significativos de su vida y producción artística, se procede a determinar el valor intrínseco de una obra de arte en particular. La valoración de la obra de arte se debe realizar de forma individualizada, pieza por pieza, reuniendo la información del conjunto de variables significativas recogidas ya indicadas.

El valor intrínseco que se determine para una obra de arte, dentro de la producción artística de un determinado autor, debe partir del valor de la firma, que será ponderado teniendo en cuenta la existencia de determinados coeficientes correctores que marcará la diferencia de una obra con respecto a otra.

El estudio de la obra a evaluar, se puede iniciar con la identificación de la pieza y la verificación de si es una obra original del artista que lo firma o una copia, fotografía, reproducción, litografía, etc. firmada por el mismo, o incluso sin estar firmada.

En este modelo se asume que todas las obras ubicadas en los museos de estudios son originales, por lo cual someterlas a un proceso de autenticidad es innecesario.

El precio también varía con el tamaño, de tal forma que las piezas mayores tienen un precio proporcionalmente inferior que las pequeñas en el caso de pinturas y viceversa en el caso de esculturas, es decir, el tamaño y el precio correspondiente son directamente proporcionales.

La técnica y el soporte han sido tradicionalmente consideradas como variables importantes en la determinación del precio de una obra. Así, se considera, en términos generales para un determinado autor, que un dibujo es más barato que una acuarela, mientras que ésta lo es ante un óleo. La diferencia en precios se suele justificar por los costes de producción y la durabilidad de la obra, pero la razón de la jerarquía está más en las preferencias de los compradores.

Aunque todas las obras de arte son únicas e irrepetibles, sí que es posible hacer un amplio número de obras muy similares, por ello la originalidad de la obra de arte analizada será altamente apreciada para determinar su valoración. Obras, técnicas y temas originales son más significativos al valorar una obra que aquellos que se copian o repiten.

Se completa con la consideración de las variables significativas para la valoración con el estudio del estado de conservación de la obra de arte y su historial de trabajos de restauraciones.

2.1.4 Modelo integrado de valoración de una obra de arte

Todo el proceso realizado está sustentado en la utilización de datos fiables, provenientes de fuentes de calidad.

A partir de la cotización media, dato proveniente del mercado de referencia (fecha y lugar determinado), se procede a evaluar puntualmente las características de cada obra antes indicadas, de acuerdo con el criterio del experto que lo está valorando.

El modelo de valoración que viene a recoger la integración de las distintas variables del sistema, agrupadas alrededor de la vida y la producción artística del pintor, así como los relativos a los aspectos financieros y de mercado, utilizadas en la determinación del valor intrínseco de una obra de arte es:

$$V_a = B_0 \cdot B_1 \cdot B_2 \cdot B_3 \cdot B_4 \cdot B_5 \cdot B_6 \cdot B_7 \cdot B_8 \cdot B_9 \quad (2.1)$$

En donde:

- V_a: Valor intrínseco de la obra*
- B₀: Cotización de la firma*
- B₁: Coeficiente de Corrección Período*
- B₂: Coeficiente de Corrección Técnica*
- B₃: Coeficiente de Corrección Estilo*
- B₄: Coeficiente de Corrección Tema*
- B₅: Coeficiente de Corrección Tamaño*
- B₆: Coeficiente de Corrección Categoría*
- B₇: Coeficiente de Corrección Originalidad*
- B₈: Coeficiente de Corrección Perfección*
- B₉: Coeficiente de Corrección Conservación.*

Como elementos auxiliares en la determinación del rango de valores que modificarán la cotización básica de la firma se utilizan estos factores que dependerán del juicio y habilidad del valuador. Sin embargo el alcance de este trabajo de tesis no llega hasta los aspectos artísticos o subjetivos que pueda tener una obra de arte y es por eso que se hace la consideración de que los factores de corrección de la serie B₁ hasta B₉ tienen un valor de 1, para simplificar la valuación.

Lo anterior indica que el parámetro de interés en esta valuación es el valor de la firma de cada autor y es por eso que es necesario disponer de una base de datos sobre las operaciones comerciales del autor considerado. Esta información se limita a unos determinados elementos informativos: identificación del autor, título de la obra objeto de transacción dimensiones, precio, fecha de la transacción y sala de subasta en que se realizó la operación. Esta información, en la mayoría de los casos es muy restringida debido a políticas de las mismas casas de subastas.

2.2 Aplicación del modelo

A continuación se muestra la aplicación de este modelo a las esculturas de los museos Soumaya, Nacional de Antropología y esculturas del Instituto de Ingeniería UNAM. Cabe mencionar que la existencia de una gran diferencia entre los autores, ya que por ejemplo, en el Museo Soumaya, son autores muy famosos y reconocidos y en muchos casos ya fallecidos, en el Museo Nacional de Antropología, son piezas muy antiguas de culturas prehispánicas y del Instituto de Ingeniería UNAM, es una autora contemporánea.

Dentro de las modificaciones que se hacen al modelo original, esta la del uso de un área promedio, esto es a que debido a la complejidad de la obtención del volumen de la escultura a valuar por razones de seguridad hacia la misma obra y políticas del museo, una unidad de volumen sería más congruente en la aplicación del modelo, sin embargo, el cálculo de un área promedio que relacione el área desfavorable y el área favorable previamente descritas se acerca a un valor representativo para el cálculo. Otra modificación es el uso de regresiones matemáticas en lugar de un valor fijo en el caso del valor de la firma del artista y así obtener una ecuación o línea de tendencia que relacione los datos disponibles y así tener una estimación más apegada a la variabilidad de los precios de las obras del autor.

2.2.1 Museo Soumaya

El museo Soumaya posee una colección muy amplia de esculturas por lo que hacer una valuación completa de sus contenidos sería un tema propio de una tesis, por lo cual solo se valuarán los escultores más reconocidos, entre las cuales destacan Auguste Rodín, Salvador Dalí y Fernando Botero, estos tres autores que son los más significativos se les aplicará el modelo, al resto de las esculturas que representan un 15% de las esculturas totales se les aplicará un precio medio estimado, ya que se trata en su mayoría de arte sacro y autores anónimos.

Como primer autor está Auguste Rodín, para el cual se tienen los siguientes datos, obtenidos de subastas y galerías de arte, cabe mencionar que esta es información muy restringida por lo cual la base de datos es pequeña y los precios reales pueden variar.

Tabla 2.1 Datos disponibles para valuación de las esculturas de Auguste Rodín

RODIN						
ANÁLISIS DE OBRAS EN SUBASTAS						
Id	Año	Título	Técnica	Área [cm ²]	Pesos MX	Dólares US
1	1880	El pensador	Bronce	2526.11	\$38,038,756.05	\$2,999,901.90
2	1876	La edad de bro	Bronce	13947	\$78,616,000.00	\$6,200,000.00
3	1884	Fauna de rodil	Mármol	741.7	\$11,741,295.76	\$925,969.70



Figura 2.1 Auguste Rodín, 1840-1917, (izquierda) y "Fauna de rodillas" (derecha)

A continuación a través del uso del programa *Curve expert*, se obtienen las ecuaciones de regresión que mejor se adapten a los datos disponibles, es decir, con un factor de correlación entre 0.98 y 1. El resultado es el siguiente:

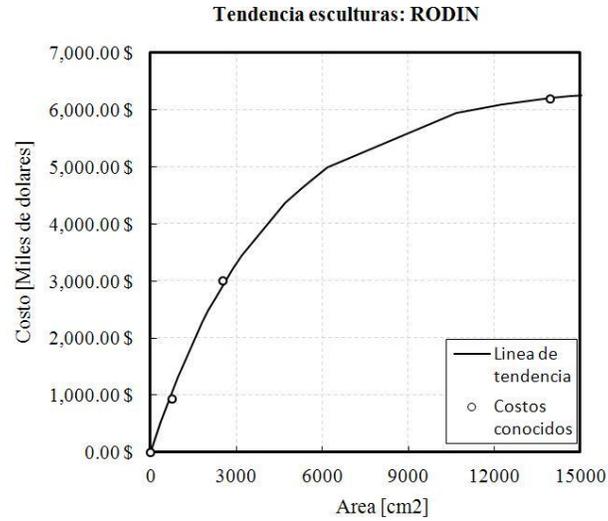


Figura 2.2 Gráfica que ilustra los datos disponibles y la línea de tendencia de los precios de Auguste Rodin

La ecuación 2.2 define la línea de tendencia del costo de las esculturas de Auguste Rodin:

$$\$ = 6.426 \cdot 10^{-6} \cdot \left(1 - e^{-2.419 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Área}}\right) \quad (2.2)$$

Aplicando esta ecuación a la columna *Área Promedio* de la tabla 2.2, se obtiene el costo estimado de la escultura en cuestión.

Tabla 2.2 Parámetros utilizados y costo estimado de cada escultura de Auguste Rodin contenida en la muestra tomada al museo Soumaya

Id	Título	Técnica	Área Desfavorable [cm²]	Área Favorable [cm²]	Área promedio [cm²]	Costo de la Escultura [US\$]
1	El pensador	Bronce	9965.04	13896.73	12254.8	\$6,095,476.80
2	La plegaria	Mármol	1262.67	737.4	1069.01	\$1,464,616.58
3	Jean Fiennes	Bronce	4993.06	7021.91	6178.78	\$4,985,448.38
4	Eustache de San Pierre	Bronce	1654.53	1951.53	1815.26	\$2,284,294.92
5	Cabeza colosal de Pierre	Bronce	2784.62	2925.35	2856.72	\$3,206,957.23
6	La edad de bronce	Bronce	4028.65	5216	4698.57	\$4,364,726.39
7	Los luchadores	Mármol	13947.18	13947.18	13947.18	\$6,206,833.07
8	El atleta	Bronce	362.63	354.84	358.78	\$534,325.04
9	El genio de la danza	Bronce	2024.53	1996.2	2010.46	\$2,475,385.59
10	Andrieu de Andrés	Bronce	9979.65	11296.2	10678.66	\$5,941,619.43
11	El vals secreto	Bronce	4462.43	6460.23	5644.03	\$4,786,362.89
12	El amor secreto	Mármol	5241	5241	5241	\$4,618,340.95
13	La puerta del Infierno	Bronce	9021.68	21015.8	17413.4	\$6,331,769.61
14	Laocoonte y sus hijos	Bronce	11600.29	21037.48	17683.26	\$6,337,783.23
15	La Piedad	Bronce	10973.7	16962.1	14609.75	\$6,239,429.06

Para los siguientes dos autores se hace un proceso similar al anterior, a continuación se muestran los resultados.

Tabla 2.3 Datos disponibles para valuación de las esculturas de Salvador Dalí

DALÍ						
ANÁLISIS DE OBRAS EN SUBASTAS						
Id	Año	Título	Técnica	Área [cm2]	Pesos MX.	Dólares US.
1	1977	Venus spatiale	Bronce	1417.47	\$292,971.40	\$23,105.00
2	1966	La sardane	Bronce	54.04	\$76,080.00	\$6,000.00
3	1929	Alicia en el país de las maravillas	Bronce	894.54	\$240,920.00	\$19,000.00

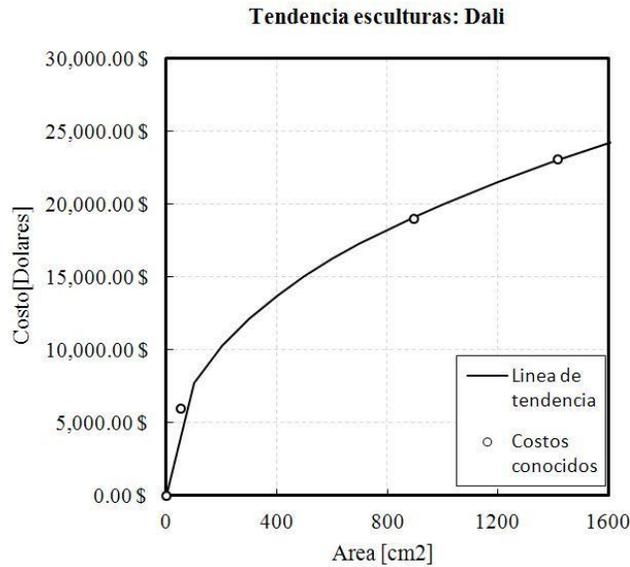


Figura 2.3 Gráfica que ilustra los datos disponibles y la línea de tendencia de los precios de Salvador Dalí

La ecuación 2.3 define la línea de tendencia que tienen los costos de las esculturas de Salvador Dalí.

$$\$ = \frac{469930}{\left[1 + \left(\frac{Area}{1502257} \right)^{-0.4257} \right]} \quad (2.3)$$

Tabla 2.4 Parámetros utilizados y costo estimado de cada escultura de Salvador Dalí en la muestra del tomada al Museo Soumaya

Id	Título	Técnica	Área Desfavorable [cm²]	Área Favorable [cm²]	Área promedio [cm²]	Costo de la Escultura [US\$]
1	Bailarina Daliniana	Bronce	8652.89	11640.87	10366.85	\$50,450.06
2	Cristo de San Juan	Bronce	6293.68	6738.9	6523.89	\$42,234.91
3	Montado por el tiempo	Bronce	4896.59	12724.05	10548.88	\$50,784.69
4	Perfil del tiempo	Bronce	2230.41	4052.34	3405.55	\$32,737.34
5	Angel triunfante	Bronce	8410.86	6742.67	7668.59	\$44,955.58
6	Mujer jirafa	Bronce	4016.2	4983.17	4551.63	\$36,703.54
7	Alicia en el país de las maravillas	Bronce	2872.04	4119.82	3607.27	\$33,491.26
8	Perseo	Bronce	14650.17	18392.99	16733.56	\$60,388.79
9	La mujer en llamas	Bronce	5713.67	7712.02	6861.57	\$43,067.87
10	Newton surrealista	Bronce	4198.16	5077.88	4679.74	\$37,105.27
11	Gabinete antropomórfico	Bronce	1979.21	3693.97	3095.74	\$31,522.29
12	Elefante espacial	Bronce	3258.76	7250.89	6013.04	\$40,919.65



Figura 2.4 Salvador Dalí, 1904-1989, (derecha), “Venus spatiale” (izquierda)

A continuación se analizan las obras de Fernando Botero.

Tabla 2.5 Datos disponibles para valuación de las esculturas de Fernando Botero

BOTERO						
ANÁLISIS DE OBRAS EN SUBASTAS						
Id	Año	Título	Técnica	Área [cm²]	Pesos MX.	Dólares US.
1	N/A	Hombre a caballo	Bronce	777.59	\$12,680,000.00	\$1,000,000.00
2	1987	Bailarines	Bronce	40146	\$21,556,000.00	\$1,700,000.00
3	1994	Mujer fumando	Bronce	3749.89	\$15,216,000.00	\$1,200,000.00

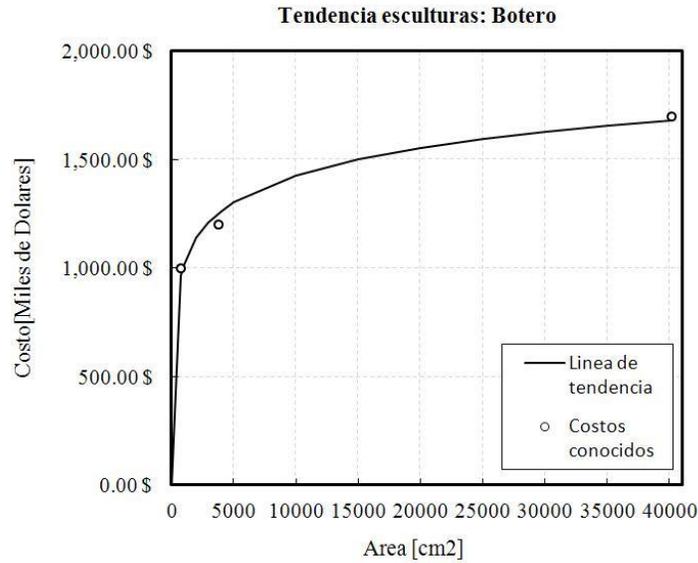


Figura 2.5 Gráfica que ilustra los datos disponibles y su línea de tendencia de Fernando Botero

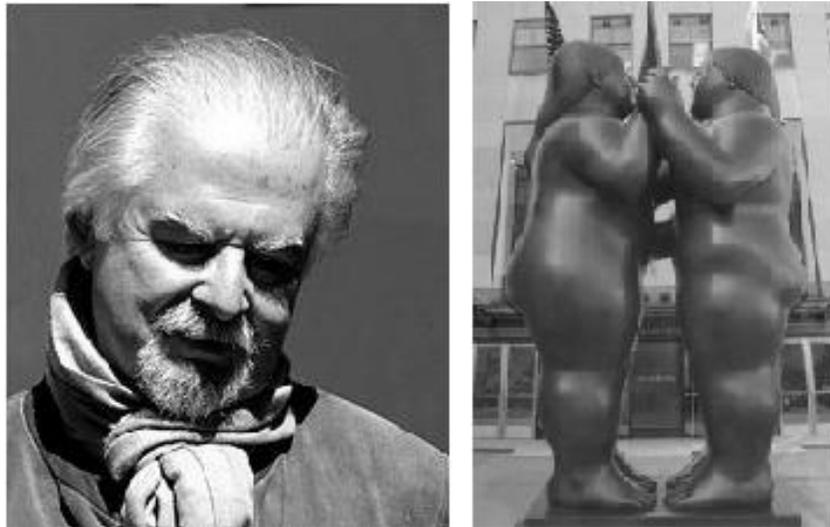


Figura 2.6 Fernando Botero, 1932- (derecha) y “Los Bailarines” (derecha)

La ecuación 2.4 define la línea de tendencia que tienen los costos de las esculturas de Fernando Botero.

$$\$ = [180153 \cdot \ln(\text{Area})] - 230455 \quad (2.4)$$

Tabla 2.6 Parámetros utilizados y costo estimado de cada escultura de Fernando Botero contenidas en la muestra del museo Soumaya

Id	Título	Técnica	Área Desfavorable [cm²]	Área Favorable [cm²]	Área promedio [cm²]	Costo de la Escultura [US\$]
1	Caminando	Mármol	594.06	904.17	781.21	\$969,515.78
2	Mujer recostada	Mármol	462.7	1196.69	992.03	\$1,012,555.56

2.2.2 Museo Nacional de Antropología

Las piezas históricas prehispánicas, son un caso peculiar en las obras artísticas, como ya se sabe todos sus autores están muertos y son anónimos, lo único que se sabe es a que cultura pertenece y su antigüedad, otra parte es que la mayoría son patrimonio de la humanidad por lo cual no se venden ni en subastas ni en galerías. Sin embargo existen datos de ventas que se realizaron en casas de subastas europeas de cerámica y esculturas hechas por culturas mesoamericanas. En este caso se optó por un valor medio debido a la escasez y generalidad de información. Se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 2.7 Costo promedio por material de arte de culturas prehispánicas

Material	Costo en dólares por cm²
Roca	\$12.53
Cerámica	\$8.48

En la tabla 2.10 se muestran los resultados de aplicar estas condiciones a los contenidos recabados en el Museo Nacional de Antropología.

2.2.3 Instituto de Ingeniería UNAM

En el IINGEN UNAM se encuentran 7 esculturas y un busto. Seis de las esculturas fueron realizadas por la escultora Maribel Pórtela, en este caso debido a la información obtenidas se puede aplicar el mismo método utilizado para valuar las esculturas del museo Soumaya. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 2.8 Datos disponibles para valuación de las esculturas de Maribel Pórtela

PORTELA						
ANÁLISIS DE OBRAS EN SUBASTAS						
Id	Año	Título	Técnica	Área [cm²]	Pesos MX.	Dólares US.
1	2004	Caricias tatuadas	Barro	1130.83	\$38,040.00	\$3,000.00
2	2008	Los amantes	Bronce	417.29	\$34,236.00	\$2,700.00
3	2006	Mujer reclinada	Mármol	4708	\$44,380.00	\$3,500.00

A continuación se muestra la ecuación que define la línea de tendencia obtenida a través de una regresión no lineal.

$$S = \frac{1}{(5.775 \cdot 10^{-4}) - [3.454 \cdot 10^{-5} \cdot \ln(Area)]} \quad (2.5)$$

La grafica que ilustra los contenidos y su línea de tendencia es la siguiente:

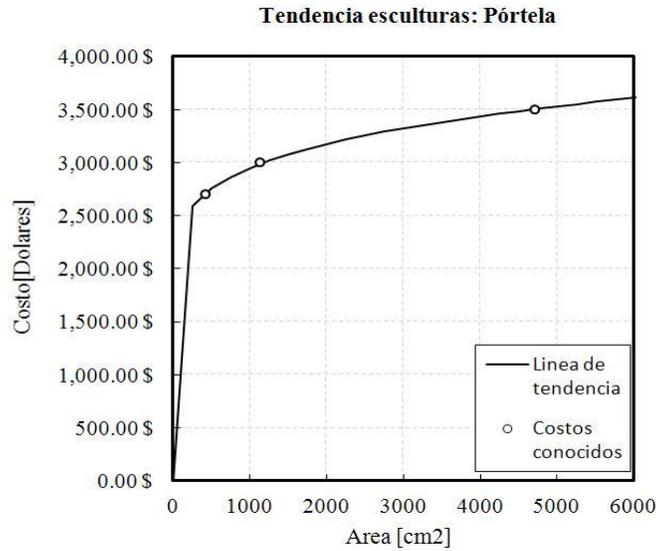


Figura 2.7 Gráfica que ilustra los datos disponibles y su línea de tendencia en las esculturas de Maribel Pórtela

Tabla 2.9 Parámetros utilizados y costo estimado de cada escultura de Maribel Pórtela contenidas en el IINGEN UNAM

Id	Título	Técnica	Área Desfavorable [cm ²]	Área Favorable [cm ²]	Área promedio [cm ²]	Costo de la Escultura [US\$]
1	Escultura 1	Barro	4214.1	4214.1	4214.1	\$10,394.77
2	Escultura 2	Barro	4367.4	4367.4	4367.4	\$10,772.91
3	Escultura 3	Barro	3784.98	3784.98	3784.98	\$9,336.27
4	Escultura 4	Barro	3140.08	3140.08	3140.08	\$7,745.52
5	Escultura 5	Barro	3498.62	3498.62	3498.62	\$8,629.92
6	Escultura 6	Barro	4510.38	4510.38	4510.38	\$11,125.59



Figura 2.8 Maribel Pórtela, 1960- , (izquierda), "Caricias tatuadas" (derecha)

Para el resto de las esculturas y contenidos en los cuales sus autores no aparecen o están como anónimos se estableció un costo por cm² generalizado, en función de un contenido en específico,

Tabla 2.10 Parámetros utilizados y costo estimado de cada escultura de Maribel Pórtela contenidas en el Museo Nacional de Antropología

Id	Título	Técnica	Área Desfavorable [cm²]	Área Favorable [cm²]	Área promedio [cm²]	Costo de la Escultura [US\$]
1	Chacmol	Roca	3848.53	10994.12	9141.35	\$114,541.11
2	Chacmol de Patzcuaro	Roca	2552.51	4122.34	3522.03	\$44,130.98
3	Escultura antropomórfica	Roca	1288.74	1455.65	1377.27	\$17,257.20
4	Escultura en piedra	Roca	2552.51	1184.56	2118.9	\$26,549.86
5	Estela de Acapulco	Roca	4616.38	8253.33	6948.75	\$87,067.86
6	Jarrón 1	Cerámica	688.02	688.02	688.02	\$5,834.41
7	Jarrón 2	Cerámica	188.88	188.88	188.88	\$1,601.70
8	Jarrón 3	Cerámica	3146.1	3146.1	3146.1	\$26,678.93
9	Mascara prehispánica	Cerámica	202.66	260.87	235.42	\$1,996.36
10	Trono zoomorfo	Roca	1848.5	3540.57	2960.17	\$37,090.99
11	Vitrina con objetos	Varios	20429.1	20429.1	20429.1	\$50,000.00
12	Atlante maya	Roca	2703.26	4069.51	3524.19	\$44,158.10
13	Códice maya	Roca	2633.22	12333.5	10626.85	\$133,154.41
14	Sacerdote maya	Roca	6180.27	6758.09	6482.08	\$81,220.49
15	Serpiente emplumada	Roca	3413.84	6326.51	5305.66	\$66,479.98
16	Cabeza colosal	Roca	18951.88	19245.94	19100.04	\$239,323.52
17	Dios del agua	Cerámica	8104.02	9766.52	9012.6	\$76,426.86
18	Dios dos conejo	Roca	4269.85	6699.57	5753.8	\$72,095.12
19	Diosa Cihuteteo	Cerámica	3152.81	4328.48	3833.02	\$32,504.03
20	Diosa generadora de la Vid	Roca	1717.26	4221.83	3497.65	\$43,825.50
21	Representación de Quetzalcóatl	Roca	1585.61	3425.27	2843.14	\$35,624.54
22	Dios Cocijo	Cerámica	2693.57	3246.61	2995.83	\$25,404.68
23	Diosa con mascara	Cerámica	4777.16	6071.53	5501.56	\$46,653.24
24	Xipe	Cerámica	2628.46	3602.93	3191.89	\$27,067.22
25	Ahizotl	Roca	1032.5	1261.44	1158.39	\$14,514.68
26	Atlante mexicana	Roca	3466.91	4265.09	3907.2	\$48,957.20
27	Coatlícucl	Roca	15952.32	23400.2	20381.05	\$255,374.62
28	Coatlícucl 2	Roca	2490.39	2946.82	2737.76	\$34,304.17
29	Escultura mexicana	Roca	3693.32	4156.07	3938.34	\$49,347.34
30	Guerrero águila	Cerámica	5732.08	5798.87	5765.67	\$48,892.87
31	Ocelote	Roca	9713.96	14900.21	12853.46	\$161,053.87
32	Personaje de la nobleza	Roca	2391.13	3074.74	2775.68	\$34,779.32
33	Sacerdote mexicana	Cerámica	2630.56	4293.48	3661.71	\$31,051.29

que a datos proporcionados por guías del museo Soumaya puede aproximarse a 3.20 dólares por cm², extraído de la escultura “Lámpara con alegoría a la paternidad” el cual tiene un costo aproximado de \$3,000.00 dólares. En el anexo incluido en este trabajo de tesis se pueden consultar los precios aproximados de cada contenido de los museos analizados. A continuación se incluyen gráficos que facilitan la identificación y comparación de los precios de algunas de las esculturas analizadas.

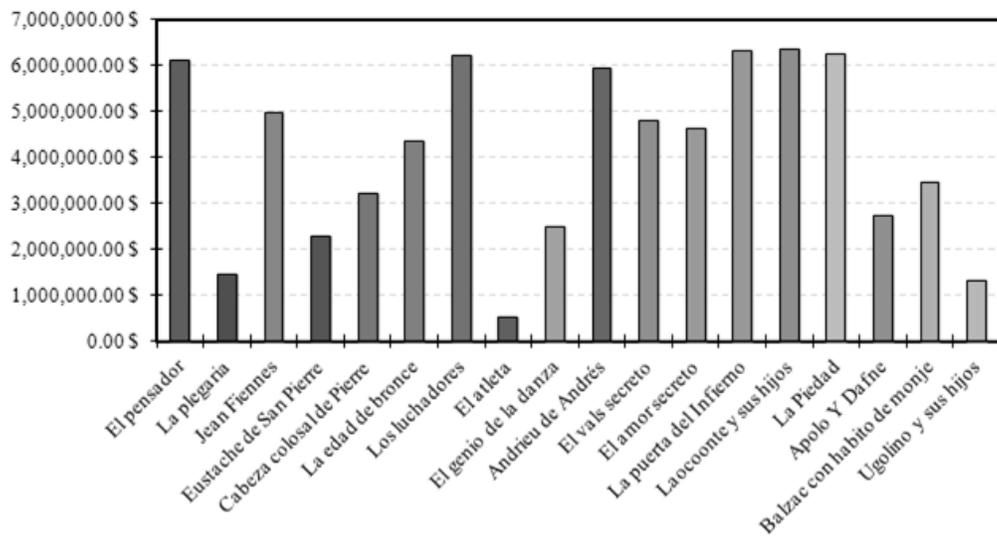


Figura 2.9 Comparación de precios entre esculturas de Auguste Rodin (la moneda está en dólares US)

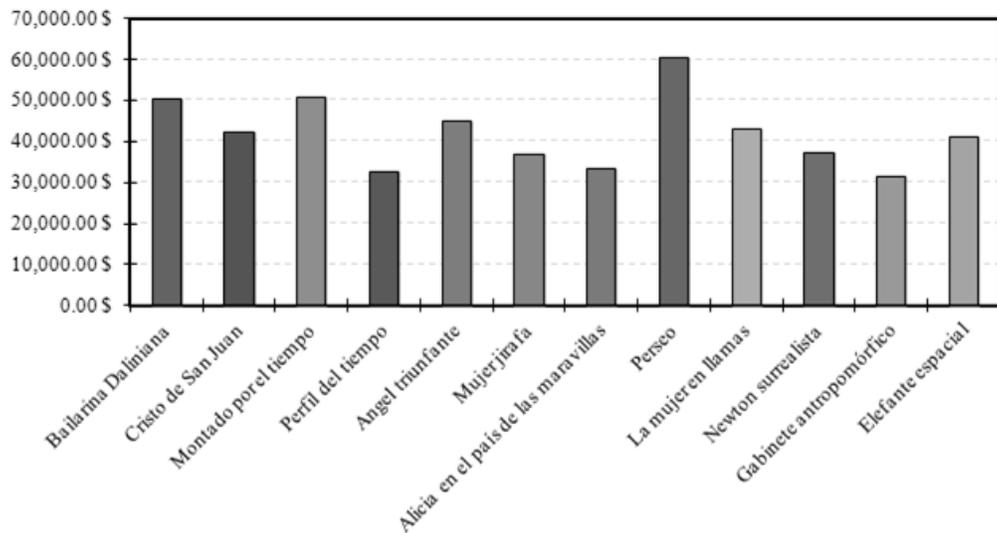


Figura 2.10 Comparación de precios entre esculturas de Salvador Dalí (la moneda está en dólares US)

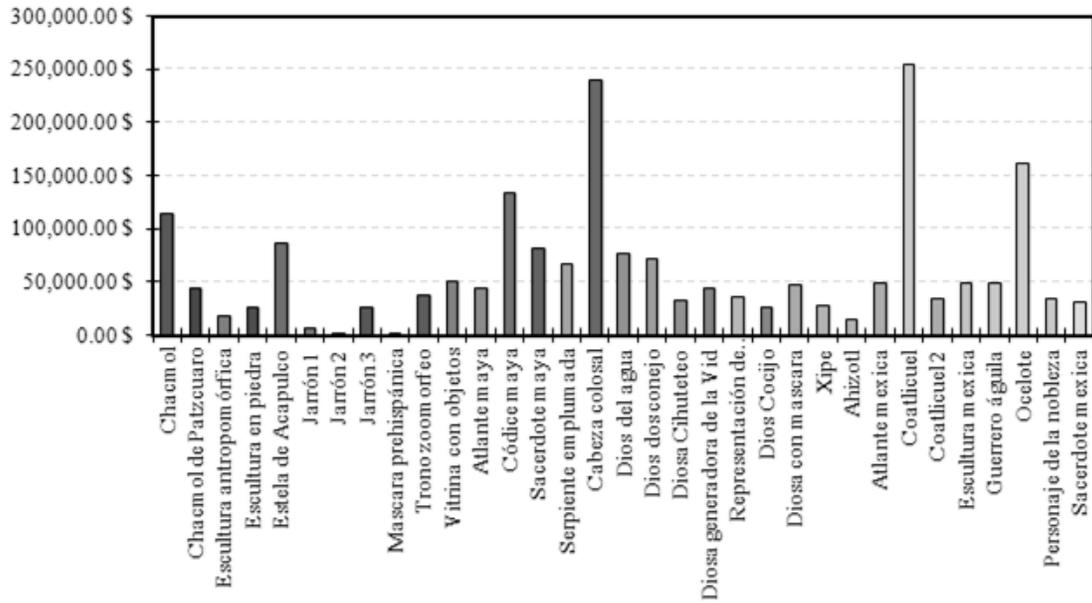


Figura 2.11 Comparación de precios entre esculturas del Museo Nacional de Antropología, (la moneda está en dólares US)

2.3 Costo relativo.

El costo relativo es el costo o precio que tiene un contenido en relación de la totalidad de la suma del precio de todos los contenidos juntos. En otras palabras es el porcentaje del costo total que le corresponde a ese contenido dentro de la edificación.

Para poder calcular el costo relativo de cada contenido es necesario conocer el costo de la totalidad del inventario. En el caso de los museos de estudio, cada uno tiene en su interior más de 1500 piezas y hacer el estudio de cada uno de estos contenidos sería bastante complicado en tiempo y no es la finalidad de este trabajo de tesis, sino mostrar el método a seguir para calcularlo. Es por eso que como ejemplo, se supondrá que la muestra tomada del inventario de contenidos tomada de los museos Soumaya y Nacional de Antropología representan la totalidad de su inventario, con fines meramente prácticos. En el caso del inventario artístico del IINGEN, si se posee información del 100% del inventario, y los resultados serán más apegados a la realidad.

Para calcular el costo relativo de cada contenido del inventario se utiliza la ecuación 2.6:

$$CR[\%] = \frac{Pc}{Pt} * 100 \tag{2.6}$$

Donde *CR* es el costo relativo del contenido analizado expresado en porcentaje, *Pc* es el precio del contenido analizado y *Pt* es el precio total del inventario analizado.

Para el caso de los museos e Instituto analizados se tiene que la totalidad del inventario analizado tiene el siguiente costo.

Tabla 2.11 Costo total de la muestra tomada del inventario de contenidos de las instituciones analizadas

<i>Nombre de la Institución</i>	<i>Costo total de la muestra [\$ US]</i>
Museo Soumaya	\$ 76,830,779.21
Museo Nacional de Antropología	\$ 2,734,290.93
IINGEN UNAM	\$ 61,804.98

Una vez obtenida la suma total del costo de los contenidos calculamos su costo relativo utilizando la ecuación 2.6. La tabla 2.12 muestra el costo relativo de algunos de los contenidos de la muestra tomada a los inventarios de las instituciones.

Tabla 2.12 Costo relativo de algunos contenidos de la muestra tomada a las diferentes instituciones

Nombre del objeto	Costo Unitario [\$ US]	Unidades	Costo total [\$US]	Costo relativo	Costo relativo [%]
Alicia en el país de las maravillas	\$ 33,491.26	1	\$ 33,491.26	0.000436	0.043590941
Andrieu de Andrés	\$ 5,941,619.43	1	\$ 5,941,619.43	0.077334	7.733384317
Angel triunfante	\$ 44,955.58	1	\$ 44,955.58	0.000585	0.058512461
Apolo Y Dafne	\$ 2,728,761.70	1	\$ 2,728,761.70	0.035517	3.551651731
Bailarina Daliniana	\$ 50,450.06	1	\$ 50,450.06	0.000657	0.065663866
Balzac con habito de monje	\$ 3,453,641.16	1	\$ 3,453,641.16	0.044951	4.495127078
Chacmol	\$ 114,541.11	1	\$ 114,541.11	0.04189061	4.189060986
Chacmol de Patzcuaro	\$ 44,130.98	1	\$ 44,130.98	0.016139828	1.613982755
Escultura antropomorfica	\$ 17,257.20	1	\$ 17,257.20	0.006311399	0.631139892
Escultura en piedra	\$ 26,549.86	1	\$ 26,549.86	0.009709961	0.970996068
Escultura 1	\$ 10,394.77	1	\$ 10,394.77	0.168186573	16.81865729
Escultura 2	\$ 10,772.91	1	\$ 10,772.91	0.174304843	17.43048429
Escultura 3	\$ 9,336.27	1	\$ 9,336.27	0.151060206	15.10602062

El uso de este método simplifica el cálculo del precio de cada obra y además nos da la posibilidad de poder utilizar estas ecuaciones para futuros cálculos, en el caso de que sean los mismos autores. Al tener pocos datos el grado de error puede ser grande pero en medida de que la información recabada sea más extensa esta incertidumbre sin duda se verá mermada y el método será más confiable y como se menciona anteriormente el mercado del arte está sujeto a muchos cambios, es decir, existen muchas fluctuaciones en función de los parámetros analizados y el costo de las mismas, por lo que estas ecuaciones solo son validas para el momento en que se analiza el problema. En conclusión este método es muy útil y práctico para una valoración rápida y confiable en medida de la información con la que se cuente.

CAPITULO 3

Estimación de probabilidad de falla de contenidos en función de la geometría

En este capítulo se muestra la metodología para procesar la información obtenida del trabajo en campo y de la información del sismógrafo de Ciudad Universitaria. Todo esto para obtener las curvas de vuelco y deslizamiento correspondientes a este inventario de contenidos.

3.1 Información preliminar

3.1.1 Digitalización de imágenes en el programa AutoCAD 2008

A partir de las fotografías tomadas a las esculturas de los respectivos museos, se obtiene las propiedades geométricas de las mismas y dimensiones que serán necesarias para cálculos posteriores; para esto a través del programa AutoCAD obtenemos un dibujo de la escultura en cuestión, dando como resultado lo siguiente.

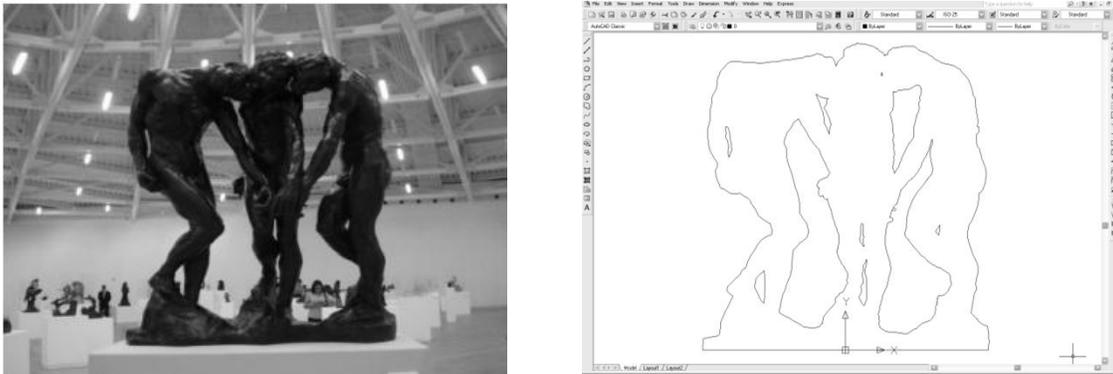


Figura 3.1. Digitalización de imágenes. Fotografía tomada en el museo (izquierda), imagen obtenida a partir de la fotografía (derecha)

Para lograr la digitalización en este programa hay muchas formas, sin embargo la metodología que se uso, por ser la más conveniente fue la siguiente:

1. Se copia la fotografía a digitalizar al programa AutoCAD
2. Con el comando “*Poliline*”, se procede a dibujar sobre el contorno de la imagen, en sentido horario (esto debido al posterior uso de una aplicación), hasta cerrar el contorno y obtener una superficie
3. Lo mismo se hace con los posibles huecos que llegara a tener la escultura vistos en la fotografía

4. Una vez que se termino de dibujar el contorno de la escultura y el contorno de los huecos se procede a escalar la imagen a su tamaño real
5. La unidad que se utilizara como medida de longitud es el metro, para esto se necesita saber la altura real de la escultura, información obtenida de la visita al museo
6. Para escalar la imagen se aplica la ecuación 3.1:

$$FE = \frac{DR}{DD} \quad (3.1)$$

En donde FE representa el factor de escala, DR la dimensión real a la cual se quiere escala y DD la dimensión que posee el dibujo antes de ser escalado.

7. La dimensión real será la altura de la escultura registrada del trabajo de campo y la dimensión del dibujo será la altura del dibujo que se acaba de realizar, para obtenerla se utiliza el comando “*Dimension*”, y se medirá de la base a la parte más alta del dibujo
8. Para escalar el dibujo se utiliza el comando “*Scale*” y se especifica el factor de escala como el resultado de la ecuación 3.1.
9. Se mueve el dibujo a la coordenada 0,0, para hacer esto, solo se selecciona el dibujo y se selecciona el comando “*Move*”, en el punto de referencia se selecciona el punto medio de la base del dibujo y se escribe 0,0 y se presiona la tecla “*Enter*”

Este proceso se realiza para todas las esculturas registradas en la visita a dichos museos y edificaciones.

3.1.2 Obtención de propiedades geométricas

En este punto lo que se pretende es ubicar el centroide de la escultura sobre plano que se esté analizando, favorable o desfavorable, y a partir de éste otros parámetros.

Para encontrar el centroide se utiliza el programa *Excel* de Microsoft, y una aplicación para AutoCAD realizada por el Instituto de Ingeniería UNAM llamada *exportCoord*.

La aplicación que se menciona sirve para obtener las coordenadas (x,y) de cada punto dibujado en AutoCAD, esto es para utilizar estos datos posteriormente en el programa *Excel*, y calcular las propiedades antes mencionadas. Los datos que genera se muestran en pantalla como una lista y estos corresponden a la superficie seleccionada.

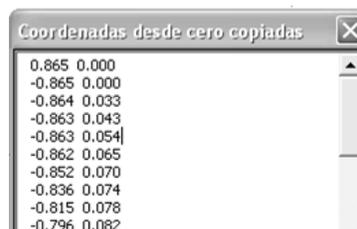


Figura 3.2. Parte de la lista de coordenadas de los puntos que forman el dibujo de una escultura en AutoCAD, obtenidos con la aplicación “exportCoord”

En los puntos que muestra la figura 3.2 la comuna de la izquierda muestra la coordenada X y los de la columna derecha la coordenada Y.

Estos puntos son copiados a una base de datos de *Excel* la cual adecuadamente programada calcula las coordenadas del centroide, que en el caso de las esculturas al ser de un material homogéneo coincide con el centro de masa. Las ecuaciones utilizadas para calcular las coordenadas de dicho centroide son las 3.2 y 3.3 respectivamente que se muestran a continuación.

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^n y_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (3.2)$$

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n x_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (3.3)$$

Donde x_c y y_c son las coordenadas del centroide a partir de un punto de referencia fijo, para poder calcular el centroide la figura original se divide en varias figuras más pequeñas de centroide conocido en este caso se optó por rectángulos, y_i y x_i son la ordenada y la abscisa respectivamente del centroide de la i -ésima “subfigura” respecto al mismo punto fijo y A_i es el área de la i -ésima “subfigura”.

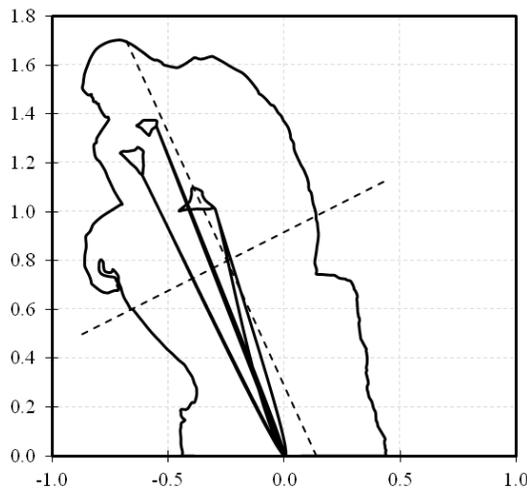


Figura 3.3 Visualización de la localización del centroide utilizando el programa Excel (las dimensiones están en metros)

Existen otras dimensiones que en este estudio son importantes para la realización de futuros cálculos las cuales se derivan del cálculo del centroide. La tabla 3.1 muestra el valor de estas dimensiones de algunos de los contenidos estudiados.

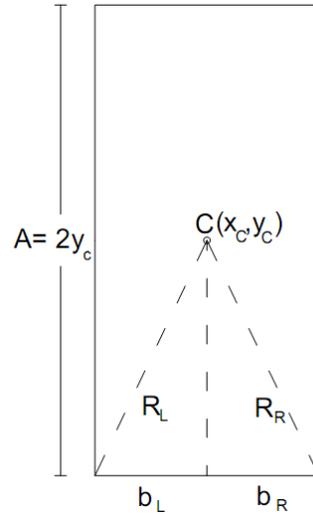


Figura 3.4 Dimensiones adicionales de los contenidos de estudio

Las columnas que corresponden a X_c y a Y_c son obtenidas a partir de utilizar las ecuaciones (3.2) y (3.3) las columnas correspondientes a las variables A , R_R y R_L se calculan con las ecuaciones (3.4), (3.5) y (3.6).

$$A = 2y_c \tag{3.4}$$

$$R_R = \sqrt{b_R^2 + y_c^2} \tag{3.5}$$

$$R_L = \sqrt{b_L^2 + y_c^2} \tag{3.6}$$

Tabla 3.1 Dimensiones adicionales de algunos objetos, obtenidas a partir del centroide

Museo Soumaya Planos Desfavorables									
ID	NIVEL	OBJETO	C2						
			A (m)	b_R (m)	b_L (m)	R_R (m)	R_L (m)	X_c (m)	Y_c (m)
1	PB	El pensador	1.506	0.419	-0.419	0.888	0.838	-0.052	0.753
2		Laocoonte y sus hijos	1.832	0.378	-0.378	1.001	0.981	-0.026	0.916
3		La piedad	1.388	0.431	-0.431	0.820	0.814	-0.005	0.694

Estos cálculos se realizan para la totalidad de la muestra del inventario que se esté analizando, las dimensiones de la totalidad de los contenidos se pueden consultar en el anexo de la presente tesis.

3.2 Probabilidad de vuelco

3.2.1 Antecedentes

Los criterios y métodos de para estimar las perdidas en los edificios se han desarrollado significativamente, sin embargo los métodos para evaluar las perdidas en los contenidos de los mismos no ha crecido al mismo ritmo. En los últimos años ha habido pocos estudios al respecto.

Yim, et al. (1980) estudiaron la influencia de la intensidad de vibraciones del suelo en las funciones de distribución de probabilidad de bloques rígidos rectangulares en el caso de objetos oscilantes. Y en otros trabajos propusieron una teoría de las probabilidades de vuelco utilizando vibración aleatoria, basados en esto se propuso una forma simplificada de estimación de las pérdidas de los contenidos en instalaciones industriales.

Purvance et al. (2008) obtuvieron susceptibilidades de vuelco de bloques rígidos debido a su tamaño y forma y la intensidad en términos de aceleración y velocidad máxima.

Jaimes et al. (2009) obtuvieron una metodología para la estimación de pérdidas debido a la respuesta de balanceo de contenidos sometidos a movimientos sísmicos.

3.2.2 Probabilidad de vuelco bajo la acción de movimientos sísmicos

Conocer la probabilidad que tiene un objeto a volcarse o a deslizarse hasta caer del lugar donde se encuentra, es muy importante ya que de esta información se pueden tomar las decisiones correspondientes para mitigar los daños que este podría sufrir. En este estudio se pretende conocer la probabilidad de falla de los contenidos que poseen los museos de la Ciudad de México bajo una acción sísmica y los daños sufridos por vuelco o caída.

En el artículo "*Seismic Vulnerability of an Inventory of Overturning Objects*", Jaimes, Reinoso, Esteva, 2009, se plantea una metodología para evaluar la probabilidad de vuelco bajo la acción de movimientos del suelo de un grupo de objetos o cierto inventario expuesto al mismo acontecimiento sísmico.

Dentro de las hipótesis que se hacen es que los contenidos son rígidos y están sin anclaje. La intensidad a la cual se produce la falla de los objetos está dada en una variable escalar, como la aceleración pico *PGA*.

La probabilidad de vuelco bajo la acción de un movimiento sísmico puede estimarse mediante un análisis estadístico de las respuestas de una muestra previamente registrada o generada artificialmente bajo historias de registros sísmicos con diferentes intensidades. En el artículo se mencionan dos métodos alternativos para estimar la probabilidad de vuelco de ($pF(y)$) de un solo objeto bajo la acción de un terremoto de intensidad igual a y .

- Método 1. A partir de una muestra de historias sismo-respuesta para un conjunto de movimientos del suelo con una intensidad dada.
- Método 2. A partir de una muestra de valores (y_F) de la mínima intensidad requerida para producir el vuelco.

La relación que existe entre estos dos métodos se establece como: la probabilidad de vuelco bajo la acción de un movimiento del suelo con intensidad y es igual a la probabilidad de que el valor mínimo de la intensidad necesaria para provocar el vuelco sea igual o menor que y , es decir, $pF(y) = F_{yF}(y)$.

Este método se utilizara para evaluar la probabilidad de vuelco y deslizamiento a 0.30 m de los contenidos de los museos Soumaya, Nacional de Antropología y del IINGEN UNAM bajo la acción de los 19 registros sísmicos de la estación CU.

3.3 Aplicación a la muestra

3.3.1 Inventario de contenidos de los museos de Soumaya, Nacional de Antropología y del IINGEN UNAM

En las figuras 3.5 a la 3.7 se muestra parte del inventario de los museos e instituciones antes mencionadas respectivamente, que podrían volcar y/o deslizarse mediante la acción de un movimiento sísmico. En este inventario se incluyen dimensiones de cada objeto, el costo de reemplazo en dólares estadounidenses, la fragilidad en función del material y la cantidad de los mismos que contiene el museo.

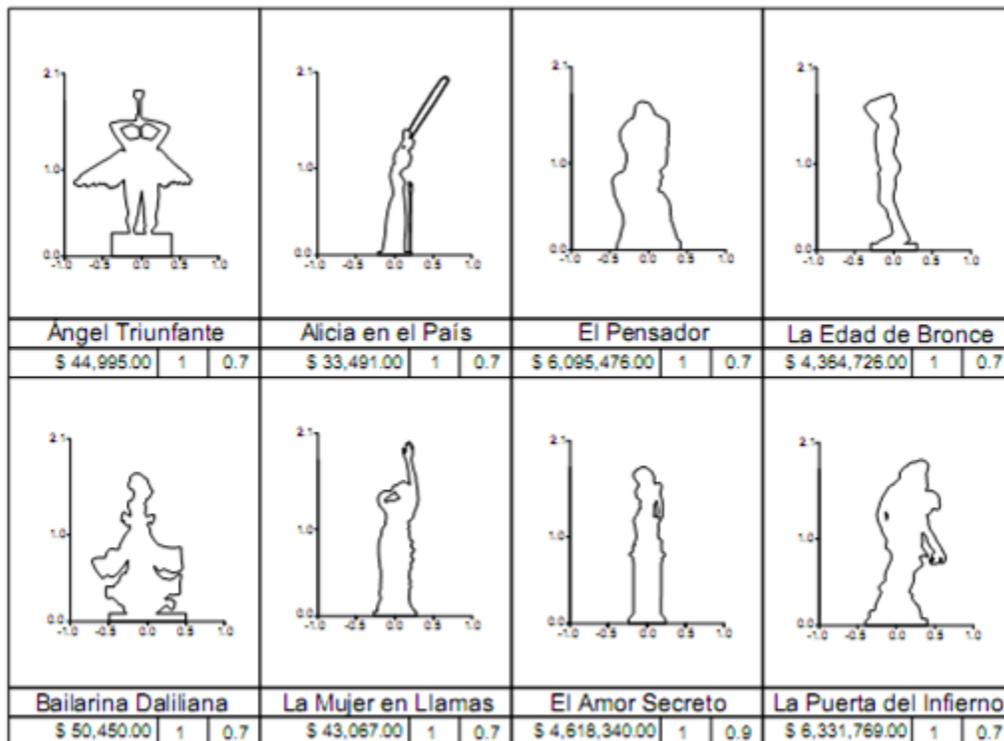


Figura 3.5 Parte del inventario de contenidos susceptibles a fallar por volteo o deslizamiento del Museo Soumaya, las dimensiones están en metros y la moneda en \$US

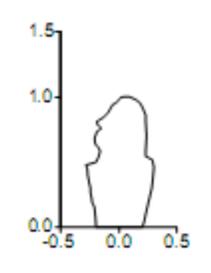
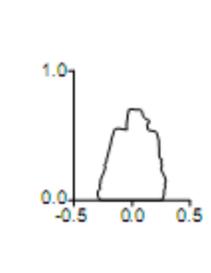
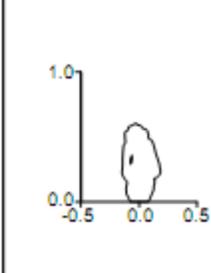
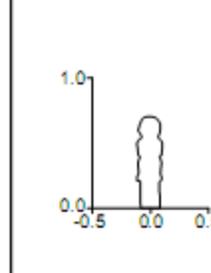
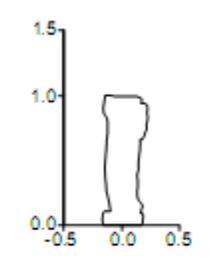
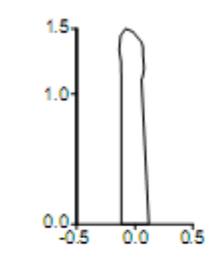
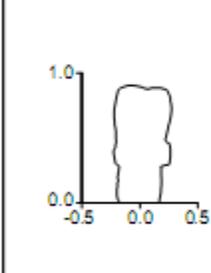
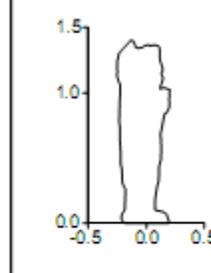
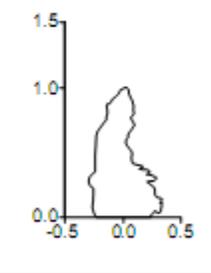
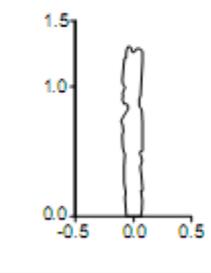
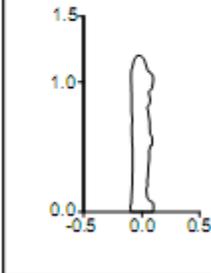
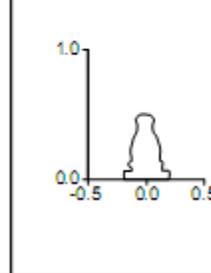
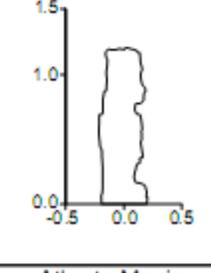
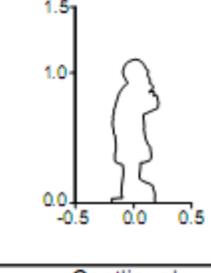
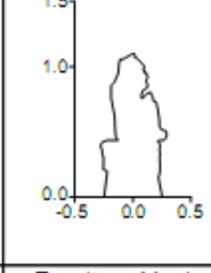
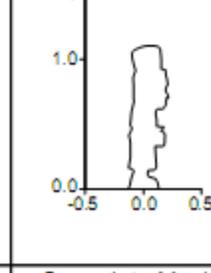
			
Chacmol	Chacmol de Pátzcuaro	Escultura Antropomór	Escultura en Piedra
\$ 114,451.00 1 0.8	\$ 44,130.00 1 0.8	\$ 17,257.00 1 0.8	\$ 26,549.00 1 0.8
			
Atlante Maya	Códice Maya	Serpiente Emplumada	Dios Dos Conejo
\$ 44,158.00 1 0.8	\$ 133,154.00 1 0.8	\$ 66,479.00 1 0.8	\$ 72,095.00 1 0.8
			
Diosa Cihuateteo	Diosa Generadora	Representacion de	Ahuizotl
\$ 32,504.00 1 1.0	\$ 43,825.00 1 0.8	\$ 35,624.00 1 0.8	\$ 14,514.00 1 0.8
			
Atlante Mexica	Coatlicue	Escultura Mexica	Sacerdote Mexica
\$ 48,957.00 1 0.8	\$ 34,304.00 1 0.8	\$ 49,347.00 1 0.8	\$ 31,051.00 1 0.8

Figura 3.6 Parte del inventario de contenidos susceptibles a fallar por volteo o deslizamiento del Museo Nacional de Antropología, las dimensiones están en metros y la moneda en \$US

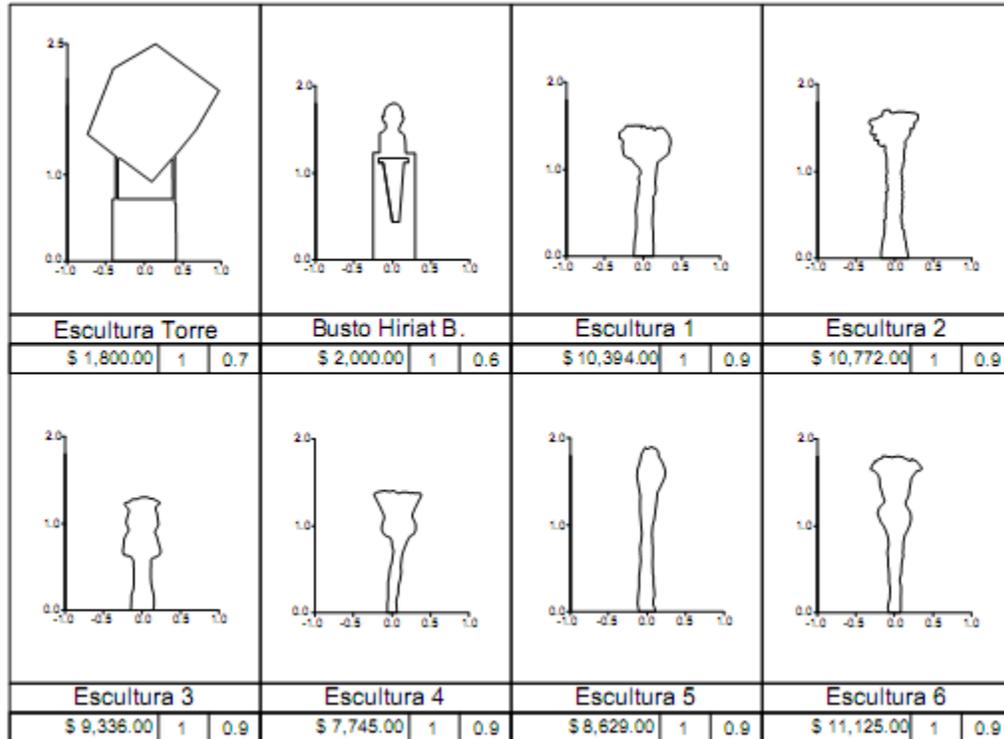


Figura 3.7 Inventario de contenidos susceptibles a fallar por volteo o deslizamiento del Instituto de Ingeniería UNAM, las dimensiones están en metros y la moneda en \$US

3.3.2 Movimientos sísmicos

Las respuestas al balanceo de cualquier objeto es no lineal por lo tanto se necesita una historia dado un acelerograma muy bien caracterizada, debido a que la respuesta depende las aceleraciones pico, contenido de frecuencias y duración del movimiento sísmico. Recordemos que para esto se utilizaron 19 sismos registrados de la estación CU mostrados en la tabla 1.5.

3.3.3 Probabilidad de vuelco en los contenidos de la muestra

Según el método uno que se menciona en este capítulo, las historias de los sismos registrados en la estación CU mostrados en la tabla 1.15, Estos valores van desde cero hasta la intensidad máxima esperada en el sitio. La probabilidad de fallo $p(y)$, se obtiene como las relación del número de casos cuando se produce el vuelco al número total de respuestas simuladas.

El método dos nos dice que el objeto de interés se somete a la acción de cada historia del movimiento del suelo a escala de un valor mínimo para producir el vuelco, llamada intensidad de falla y_f . Después de que el valor mínimo de la intensidad de falla es obtenido para cada historia, una muestra de datos queda disponible y la función $F_{YF}(y)$, puede ser obtenida. Utilizando una distribución de probabilidad lognormal, debido a que los datos tiene un comportamiento adecuado para esta, la función de probabilidad de fallo queda definida como:

$$F_{YF}(y) = \phi \left[\frac{1}{\sigma_{\ln YF}} \ln \left(\frac{y}{m_{YF}} \right) \right] \quad (3.7)$$

Donde Φ es la distribución normal acumulada del logaritmo de la muestra de valores aleatorios Y_F de la mínima intensidad requerida para provocar el vuelco o desplazamiento, σ es la desviación estándar de los logaritmos naturales y m es el valor de la mediana.

En la tabla 3.2 se pueden observar los resultados obtenidos de la simulación para la escultura “Pensador”, estos datos de aceleración mínima de fallo, tienen un valor medio y una desviación estándar, sin embargo como muestra la ecuación (3.7), los logaritmos naturales de las aceleraciones mínimas de fallo y sus correspondientes media y desviación estándar son los parámetros que rigen una distribución lognormal.

Tabla 3.2 Resultados de simular un objeto a diferentes historias escaladas hasta lograr la intensidad de falla, en este caso vuelco.

<i>Objeto</i>	<i>Sismo</i>	$Y_f[m/s^2]$	$Y_f[g]$	$LN(Y_f[g])$
El Pensador	CU01ENE04-0.02.EW	14.89	1.51	0.41
El Pensador	CU03FEB98-0.02.EW	11.36	1.15	0.14
El Pensador	CU09AGO00-0.02.EW	15.98	1.62	0.48
El Pensador	CU10DIC94-0.02.EW	26.01	2.65	0.97
El Pensador	CU15JUL96-0.02.EW	36.48	3.71	1.31
El Pensador	CU19SEP85-0.02.EW	8.32	0.84	-0.16
El Pensador	CU22ENE03-0.02.EW	17.87	1.82	0.59

Como se muestra en la tabla 3.2 solo aparecen siete de los diecinueve registros mencionados, esto debido a que la falla no solo ocurre por la aceleración máxima del suelo sino que también influye el contenido de frecuencias y la duración del sismo, es decir, los doce registros restantes no influyen o no tienen efecto en la falla de los objetos debido a que duran poco o su contenido de frecuencias es bajo.

En la tabla 3.3 se muestra los valores medios y las desviaciones estándar de los logaritmos naturales correspondientes a las aceleraciones mínimas de falla para el inventario del museo Soumaya, con estos datos se graficaron las curvas de probabilidad que corresponden a la ecuación 3.7.

Tabla 3.3 Parte del inventario de contenidos del museo Soumaya, se muestra el valor medio de los logaritmos naturales de las aceleraciones mínimas de falla y su respectiva desviación estándar en el caso de vuelco.

Piso	Nombre del Objeto	μ	σ	Piso	Nombre del Objeto	μ	σ
Nivel 6	Alicia en el país de las maravillas	-1.2327	0.6906	Nivel 5	Vitrina 2	0.7107	0.5765
	Andrieu de Andres	0.4096	0.4487		Vitrina 4	-0.3745	0.7440
	Angel triunfante	0.0437	0.5235	Nivel 4	Busto Madame Renoir	-1.3752	0.7530
	Apolo y Dafne	-0.9600	0.7904		Caminando	-1.6087	0.9721
	Bailarina Daliniana	0.8792	0.3783		Maternidad	-0.2582	0.7417
	Balzac con habito de monje	0.1101	0.5424		Mujer arreglandose el cabello	0.0833	0.6918
	Cabeza colosal de Pierre	-0.6509	0.7837		Mujer recostada	0.9268	0.6051
	Cristo de San Juan	0.8116	0.4567		Venus triunfante	-1.0187	0.8573
	El amor secreto	-1.0307	0.7099	Nivel 3	Vitrina 2	0.7107	0.5765
	El atleta	0.4087	0.6315		Juan el bautista	-0.6252	0.5359
	El genio de la danza	-0.9941	0.7834		La dolorosa	-1.3119	0.8588
	El vals secreto	0.0617	0.5752		Lampara con alegoria a la paternidad	-0.3846	0.7130
	Elefante espacial	-1.0965	0.6975		San Jose con el niño	-1.5934	0.9814
	Eustache de San Pierre	-1.0014	0.7490		San Luis Gonzaga	-1.1484	0.9970
	Gabinete antropomórfico	-0.2299	0.6275	Nivel 2	Vitrina 4	-0.3745	0.7440
	Jean de Fiennes	-0.7236	0.5557		Busto Renoir	-0.3564	0.7992
	La edad de bronce	-1.0206	0.6647		La edad de bronce pequeña	-1.5197	0.8887
	La mujer en llamas	-0.7072	0.6627		Niño pasionario	-1.6453	1.0361
	La mujer jirafa	-1.7163	0.7484		Portapapeles	-0.3469	0.6492
	La plegaria	-0.2635	0.7553		Vitrina 3	0.9360	0.5398
	La puerta del infierno	-0.4452	0.6176	Nivel 1	Monedas de la historia	0.8741	0.4527
	Los luchadores	0.6457	0.4991		Vitrina 2	0.7107	0.5765
	Montado por el tiempo	-0.5632	0.6924		Vitrina 3	0.9360	0.5398
	Newton surrealista	-0.8283	0.7010		Vitrina 4	-0.3745	0.7440
	Perfil del tiempo	0.5957	0.4606		Vitrina 5	1.1769	0.4750
	Perseo	0.0720	0.5917		El pensador	0.5397	0.4932
	Ugolino y sus hijos	-0.2007	0.8086	Planta Baja	La piedad	0.7935	0.4338
					Laocoonte y sus hijos	0.2292	0.5435

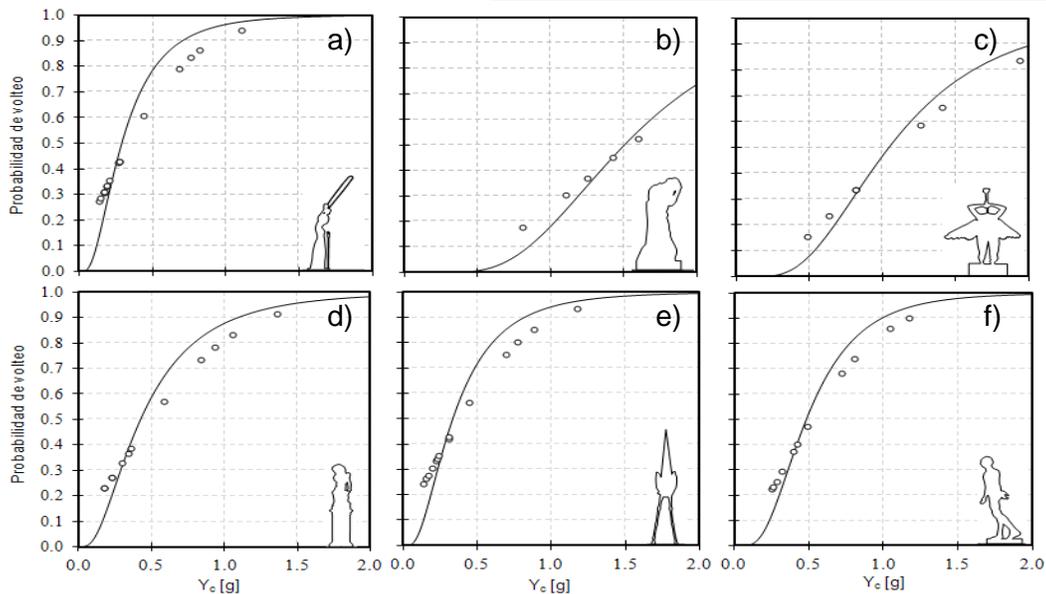


Figura 3.8 Probabilidad de falla por vuelco para seis objetos del museo Soumaya usando el método dos, a) Alicia en el país de las maravillas, b) Andrieu de Andrés, c) Angel triunfante, d) El amor secreto, e) Elefante espacial y f) Jean de Fiennes.

En la figura 3.8 se muestran en líneas continuas las gráficas de distribución de probabilidad lognormal y en marcadores los valores de intensidades de falla de todos los registros ajustados a la distribución de Gumbel para algunos contenidos del museo Soumaya.

También se puede ver que la escultura *El amor secreto* se balanceara con aceleraciones superiores a las 0.1 g y que se volcara con aceleraciones mayores 0.45 g, esto es debido a la esbeltez que posee su geometría, mientras que la escultura *Andrieu de Andrés* no se moverá con aceleraciones menores a 0.5 g.

En las tabla 3.4 y 3.5 se registran las aceleraciones mínimas de falla y_c para los contenidos de los museos mencionados, obtenidas por el método dos visto en este capítulo.

Tabla 3.4 Aceleraciones de falla mínima para volcar los contenidos de los museos Soumaya

MUSEO SOUMAYA					
ID	Nombre del Objeto	Y_c [g] ($p = 0.5$)	ID	Nombre del Objeto	Y_c [g] ($p = 0.5$)
1	Alicia en el país de las maravillas	0.292	29	Vitrina 4	0.688
2	Andrieu de Andrés	1.506	30	Busto Madame Renoir	0.253
3	Angel triunfante	1.045	31	Caminando	0.2
4	Apolo y Dafne	0.383	32	Maternidad	0.772
5	Bailarina Daliniana	2.409	33	Mujer arreglándose el cabello	1.087
6	Balzac con habito de monje	1.116	34	Mujer recostada	2.526
7	Cabeza colosal de Pierre	0.522	35	Venus triunfante	0.361
8	Cristo de San Juan	2.252	36	Vitrina 2	2.035
9	El amor secreto	0.357	37	Juan el bautista	0.535
10	El atleta	1.505	38	La dolorosa	0.269
11	El genio de la danza	0.37	39	Lámpara con alegoría a la paternidad	0.681
12	El vals secreto	1.064	40	San José con el niño	0.203
13	Elefante espacial	0.334	41	San Luis Gonzaga	0.317
14	Eustache de San Pierre	0.367	42	Vitrina 4	0.688
15	Gabinete antropomórfico	0.795	43	Busto Renoir	0.7
16	Jean de Fiennes	0.485	44	La edad de bronce pequeña	0.219
17	La edad de bronce	0.36	45	Niño pasionario	0.193
18	La mujer en llamas	0.493	46	Portapapeles	0.707
19	La mujer jirafa	0.18	47	Vitrina 3	2.55
20	La plegaria	0.768	48	Monedas de la historia	2.397
21	La puerta del infierno	0.641	49	Vitrina 2	2.035
22	Los luchadores	1.907	50	Vitrina 3	2.55
23	Montado por el tiempo	0.569	51	Vitrina 4	0.688
24	Newton surrealista	0.437	52	Vitrina 5	3.244
25	Perfil del tiempo	1.814	53	El pensador	1.715
26	Perseo	1.075	54	La piedad	2.211
27	Ugolino y sus hijos	0.818	55	Laocoonte y sus hijos	1.258
28	Vitrina 2	2.035			

Tabla 3.5 Aceleraciones de falla mínima para volcar los contenidos del Museo Nacional de Antropología y el Instituto de Ingeniería UNAM

<i>MUSEO NACIONAL DE ANTROPOLOGÍA</i>					
<i>ID</i>	<i>Nombre del Objeto</i>	<i>Y_c [g] (p = 0.5)</i>	<i>ID</i>	<i>Nombre del Objeto</i>	<i>Y_c [g] (p = 0.5)</i>
1	Ahuizotl	2.264	17	Escultura en piedra	0.152
2	Atlante mexicana	0.437	18	Escultura mexicana	1.158
3	Atlante maya	0.353	19	Estela de Acapulco	0.175
4	Cabeza colosal	2.957	20	Guerrero águila	0.78
5	Chacmol	0.698	21	Jarrón 1	0.301
6	Chacmol de Patzcuaro	2.54	22	Jarrón 2	0.598
7	Coatlicuel 1	1.869	23	Jarrón 3	0.306
8	Coatlicuel 2	0.496	24	Mascara prehispánica	0.006
9	Códice maya	0.103	25	Ocelote	6.029
10	Dios Cocijo	1.709	26	Personaje de la nobleza	0.156
11	Dios del Agua	0.46	27	Representación de Quetzalcóatl	0.39
12	Dios Dos Conejo	0.225	28	Sacerdote maya	0.227
13	Diosa Cihuateteo	1.384	29	Sacerdote mexicana	0.282
14	Diosa con mascara	0.808	30	Serpiente emplumada	0.434
15	Diosa generadora de la Vid	0.03	31	Trono zoomorfeo	1.612
16	Escultura antropomórfica	0.193	32	Xipe	1.474
<i>INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM</i>					
<i>ID</i>	<i>Nombre del Objeto</i>	<i>Y_c [g] (p = 0.5)</i>	<i>ID</i>	<i>Nombre del Objeto</i>	<i>Y_c [g] (p = 0.5)</i>
1	Escultura 1	0.069	5	Escultura 5	0.0586
2	Escultura 2	0.179	6	Escultura 6	0.0246
3	Escultura 3	0.198	7	Busto Hiriart Balderrama	0.4795
4	Escultura 4	0.001	8	Escultura Torre de Ingeniería	0.648

Como se menciona en este capítulo, los datos de la tabla 3.4 y 3.5 son datos obtenidos por el método mostrado por Jaimes (2009), que parte de una simulación.

Sin embargo, si relacionamos las características geométricas (figura 3.9) con la aceleración mínima de falla media o y_f , obtenida por este método, se puede observar una tendencia a una función que bien podría ser utilizada para calcular más rápidamente la probabilidad de falla.

En la figura 3.9, C es el centroide geométrico de la cara o plano que se esté analizando y los demás parámetros se obtienen a partir de este.

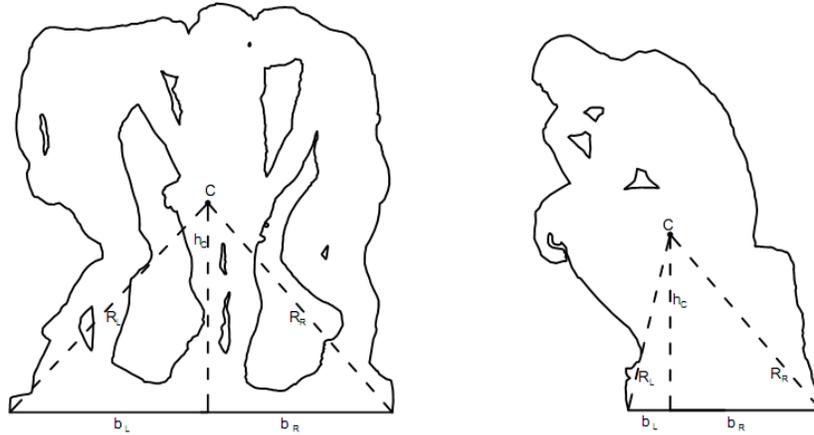


Figura 3.9 Parámetros geométricos utilizados para relacionar la aceleración mínima de falla con la geometría del cuerpo

3.4 Modelo con regresión no lineal

Utilizando información tal cual como la frecuencia del movimiento sísmico o frecuencia de Ratjhe y definiendo el parámetro que combina I_i y R_i de la siguiente manera. (Purvanche, 2008):

$$p^2 = \frac{mgR}{I_0} \quad (3.8)$$

se puede observar que existe una relación entre la geometría del objeto y la aceleración máxima del suelo a la cual el objeto tiende a volcarse.

Homogenizando la ecuación (3.8) para bloques rectangulares homogéneos, se reduce a lo siguiente:

$$p^2 = \frac{WR}{4/3 \left(\frac{W}{g} \right) R^2} = \frac{3g}{4R} \quad (3.9)$$

Despejando p de manera sencilla, la ecuación (3.9) queda de la siguiente manera:

$$p = \sqrt{\frac{3g}{4R}} \quad (3.10)$$

Donde p es la frecuencia propia del objeto al comenzar a balancearse, g es la aceleración de la gravedad, con un valor de 9.81 m/s^2 , y R es la dimensión menor entre R_R y R_L .

Definiendo un factor de relación entre ambas frecuencias se tiene:

$$r = \frac{w}{p} \quad (3.11)$$

Donde r es el factor de relación de frecuencias (adimensional), w es la frecuencia de Ratjhe (rad/s) y p es la frecuencia del objeto al comenzar a balancearse (rad/s).

Si multiplicamos este factor de frecuencias por la relación de aspecto tenemos lo siguiente:

$$f = \left(\frac{b_c}{h_c} \right)^4 \frac{w}{p} \tag{3.12}$$

Donde f es un factor de forma, b_c es el valor menor de b_R y b_L mostrados en la figura 3.9 y h_c es la altura de la base al centroide.

El exponente a la cual el factor de forma o relación de esbeltez esta elevada se obtuvo por una serie de iteraciones, en las que se comparó el comportamiento de los parámetros antes mencionados y la aceleración mínima de falla, siendo 4 el que mejor lo ajustaba a un comportamiento de función.

Graficando f vs Y_f se observa lo siguiente:

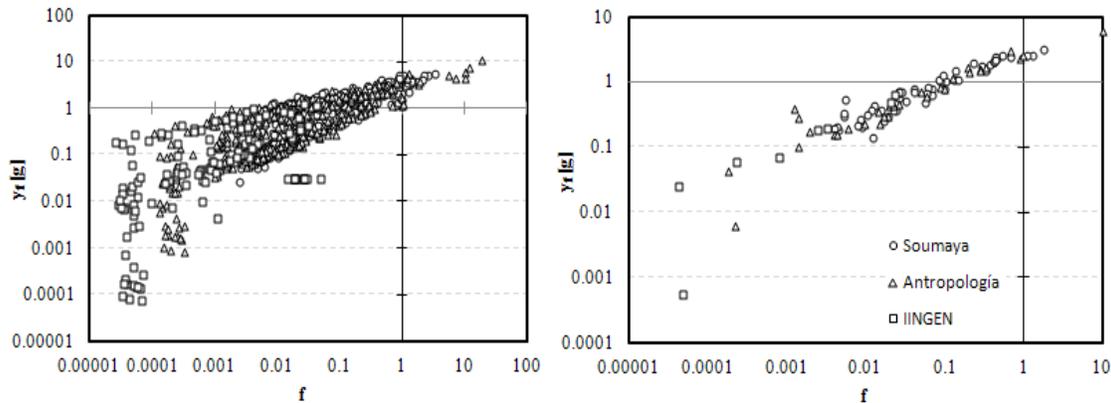


Figura 3.10 Comportamiento del factor de forma vs aceleración mínima de falla, la gráfica de la izquierda muestra el total de los contenidos analizados contra sus respectivas aceleraciones mínimas de falla para cada historia registrada, la gráfica de la derecha muestra solo los valores medios de de la gráfica de la izquierda (se grafica en una escala log. log.)

Como se puede ver en la figura 3.10 existe una tendencia directamente proporcional de los datos por lo tanto realizaron varias regresiones no lineales con la ayuda de programa *Curve Expert*, para obtener una función que describiera este comportamiento, llegando a la ecuación siguiente:

$$y_f = \left[\frac{4.435}{1 + \left(\frac{f}{0.5411} \right)^{-0.6757}} \right] \tag{3.13}$$

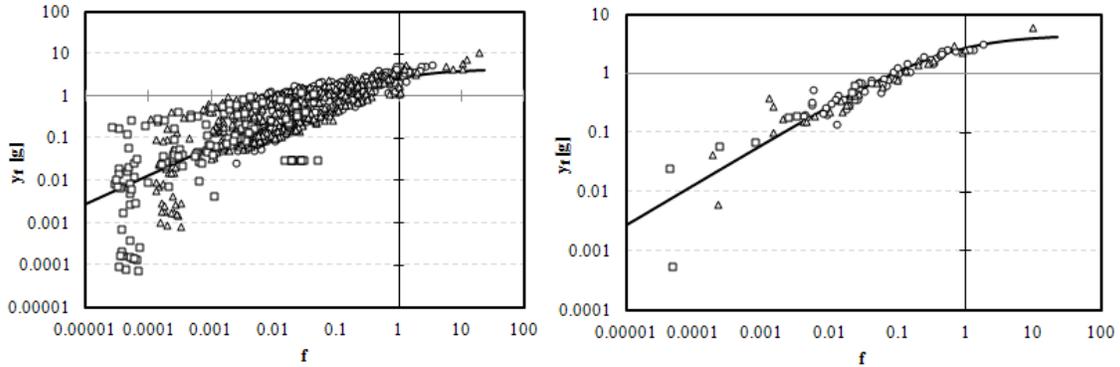


Figura 3.11 Comparación entre los datos observados y la función de correlación, totalidad de los datos (izquierda), valores medios (derecha)

La ecuación resultante se adapta muy bien al comportamiento de los datos ya que posee un factor de correlación muy cercano a uno. La figura 3.11 compara los datos observados con la función de correlación (3.13).

A partir de esta función se puede calcular el valor de la varianza de los logaritmos naturales de los registros que se muestran en la tabla 3.3. Utilizando las regresiones no lineales y utilizando la siguiente relación sobre los datos observados:

$$T = \ln(y_f) \cdot \sigma_{\ln y_f} \tag{3.14}$$

Presentando los datos observados por el método de simulación en un gráfico f vs T se observa la siguiente tendencia:

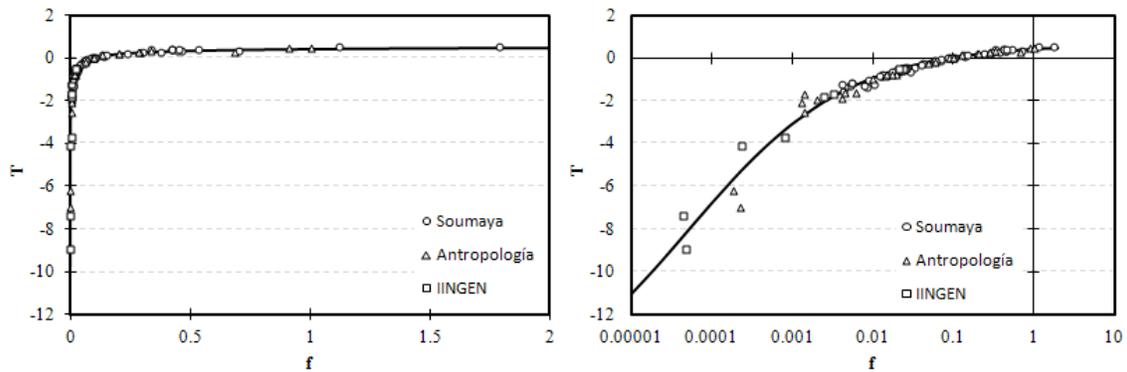


Figura 3.12 Tendencia de la relación T vs f , (izquierda) en escala decimal y (derecha) escala log.

La ecuación que describe esta tendencia es la siguiente:

$$T = \frac{0.6458 f^{0.4357} - 0.225}{0.0133 + f^{0.4357}} \tag{3.15}$$

3.4.1 Modelo aplicado a objetos regulares

Si comparamos estos objetos de forma irregular con objetos de forma regular o bloques rígidos, el comportamiento bajo estas ecuaciones deducidas empíricamente debería ser el mismo.

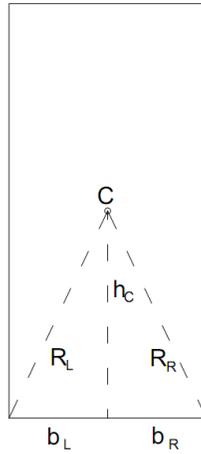


Figura 3.13 Parámetros geométricos de un bloque rígido

Utilizando el mismo método propuesto por Jaimes et al (2009), se simularon las diecinueve historias registradas en la estación CU para bloques con relación de aspecto (b_c / h_c) desde 0.05 hasta 1.00 y con dimensión R en los mismos intervalos. En la tabla 3.6 se muestran las propiedades geométricas de estos bloques y las aceleraciones mínimas de falla de cada uno, así como la varianza y media correspondiente.

Tabla 3.6 Propiedades de bloques rígidos con relación de aspecto controlada

ID	bc/hc	R [m]	Y _r [g]	μ	σ
1	0.05	5.006	0.060	-2.818	0.829
2	0.10	2.512	0.096	-2.345	0.882
3	0.15	1.684	0.140	-1.967	0.891
4	0.20	1.275	0.204	-1.592	0.853
5	0.25	1.031	0.295	-1.219	0.777
6	0.30	0.871	0.418	-0.872	0.769
7	0.35	0.757	0.597	-0.515	0.751
8	0.40	0.673	0.761	-0.273	0.710
9	0.45	0.609	1.029	0.029	0.677
10	0.50	0.559	1.159	0.148	0.658
11	0.55	0.519	1.284	0.250	0.650
12	0.60	0.486	1.545	0.435	0.634
13	0.65	0.459	1.677	0.517	0.631
14	0.70	0.436	1.825	0.601	0.614
15	0.75	0.417	1.942	0.664	0.624
16	0.80	0.401	2.073	0.729	0.623
17	0.85	0.386	2.219	0.797	0.612
18	0.90	0.374	2.342	0.851	0.615
19	0.95	0.363	2.475	0.906	0.615
20	1.00	0.354	2.621	0.963	0.605

Calculando el factor de forma f con la ecuación (3.12) y graficándolo contra la aceleración mínima de falla Y_f , se observa que poseen un comportamiento similar al de las esculturas de los museos de estudio. Graficando la función de la ecuación (3.13) deducida para estos objetos se puede observar que se adapta muy bien a los objetos regulares.

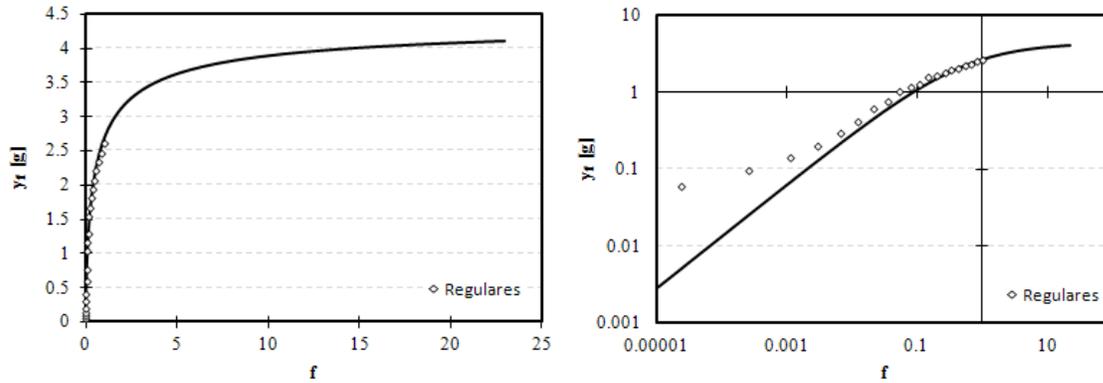


Figura 3.14 Comparación del comportamiento del factor de forma vs aceleración mínima de falla de objetos regulares (rombos) y línea de tendencia de contenidos de los museos analizados (línea continua), (izquierda) en escala decimal y (derecha) escala log. log.

Ahora utilizando la ecuación (3.14) para calcular T y graficando f vs T , se observa que el comportamiento es también el mismo para los dos tipos de objetos, en la figura 4.8 se comparan los resultados.

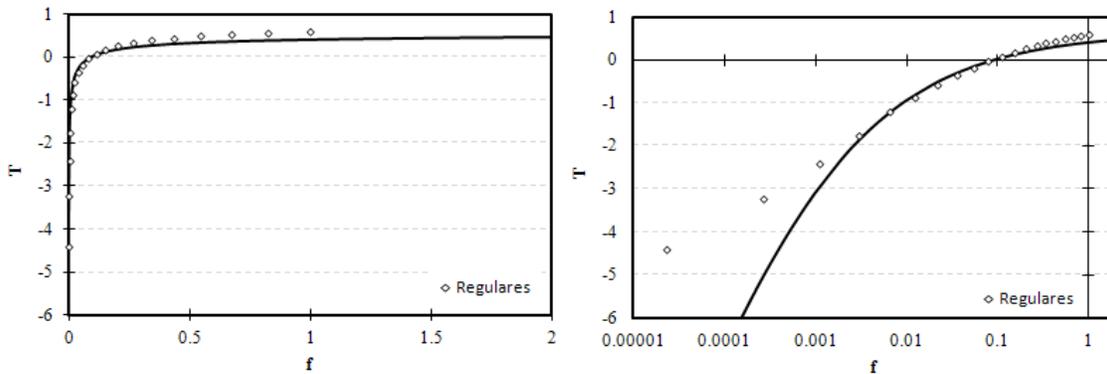


Figura 3.15 Comparación del comportamiento del factor de forma vs T de objetos regulares (rombos), también se grafica la ecuación 4.15 (línea continua) sobre los dos casos

Como se puede observar las ecuaciones (3.13) y (3.15) son válidas para modelar el comportamiento tanto de objetos regulares e irregulares bajo movimientos de suelo en terreno firme, en la figura (3.15) se observa que valores de f muy pequeños la tendencia se pierde, sin embargo son errores de aproximación de hasta cienmilésimas y se demuestra que con estas ecuaciones es posible realizar graficas de distribución de probabilidad lognormal.

3.5 Comparación entre resultados observados y resultados calculados

Como se menciona anteriormente la finalidad de haber calculado regresiones no lineales sobre los datos observados en el método propuesto por Jaimes et al, es contar con ecuaciones que puedan proporcionar datos para poder conocer la probabilidad de vuelco de los contenidos que posee un museo.

Haciendo una modificación a las ecuaciones (3.13) y (3.15) se pueden conocer los valores del valor medio y la varianza, datos necesarios para poder calcular la distribución de probabilidad lognormal. Las ecuaciones son las siguientes:

$$\mu = \ln \left\{ \frac{4.435}{1 + \left(\frac{f}{0.5411} \right)^{-0.6757}} \right\} \quad (3.16)$$

$$\sigma_{\ln} = \left(\frac{0.6458 f^{0.4357} - 0.225}{0.0133 + f^{0.4357}} \right) \left(\frac{1}{\mu} \right) \quad (3.17)$$

Utilizando las ecuaciones (3.16) y (3.17) se construyeron nuevas curvas de probabilidad de vuelco utilizando una distribución lognormal y se compararon con las observadas con el método anterior. En ellas se puede ver que las diferencias son mínimas y el comportamiento tiende a ser el mismo, más notorio en esculturas esbeltas en las cuales la pendiente de la curva de probabilidad entre 0 y 0.5 es más pronunciada.

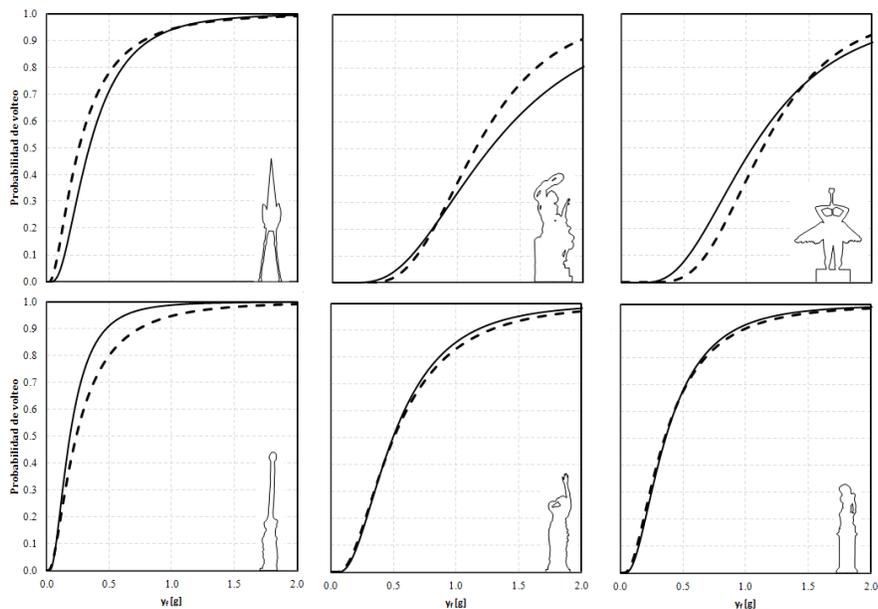


Figura 3.16 Comparación de curvas probabilidad, la línea continua representa la probabilidad observada y la línea punteada representa la probabilidad calculada.

En la figura 3.16 se puede observar la comparación de dichas curvas de probabilidad.

Debido a que el cálculo se realizó con la totalidad de la muestra del inventario de contenidos en los museos ya indicados y que fue comparada con objetos o bloques rígidos de forma prismática o regular, se concluye que estas ecuaciones se pueden utilizar para cualquier tipo de inventario de estudio que se encuentre en terreno firme y de material homogéneo, sin importar la geometría que posean los objetos que lo conformen.

3.6 Curvas de deslizamiento

Los objetos durante un movimiento sísmico, además de volcarse, pueden deslizarse. Estos deslizamientos en el peor de los casos terminan con la caída del objeto en cuestión, en la mayoría de los casos de la base donde normalmente reposa. Es por eso que las consecuencias de este mecanismo de falla también pueden causar daños a los contenidos de las edificaciones.

El deslizamiento de los objetos se produce cuando la fuerza que acciona el movimiento es mayor a la fuerza de fricción que se opone al mismo. Cuando esto sucede el movimiento se manifiesta y contrariamente, se detendrá cuando la fuerza de fricción sea igual a la fuerza que accionaba el movimiento y el cuerpo regrese al equilibrio que poseía.

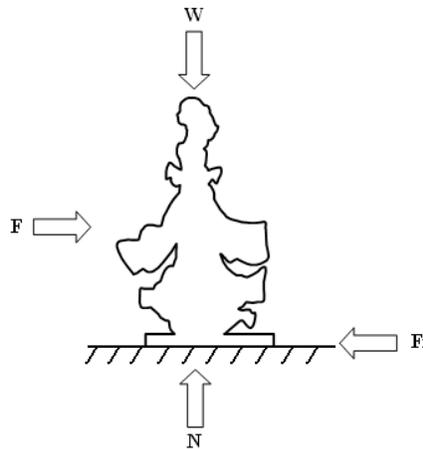


Figura 3.17 Diagrama de fuerzas en un objeto al aplicarle una fuerza externa

En la figura 3.17 se muestran las fuerzas que actúan en un cuerpo en cierto instante del movimiento, F representa la fuerza externa que provoca el movimiento, Fr representa la fuerza de fricción, que en este caso se opone a dicho movimiento, W representa la acción de la fuerza de gravedad, que se traduce en el peso del objeto y N es la fuerza normal o fuerza que ejerce el suelo sobre el objeto, en reacción al peso del mismo, en este caso el peso y la fuerza normal son iguales.

En el caso del inventario de contenidos que poseen los distintos museos de la Ciudad de México y el mundo, las esculturas se encuentran puestas sobre bases, generalmente de madera, es decir, no se encuentran apoyadas directamente sobre el suelo, esto es debido a cuestiones arquitectónicas, visuales y también de estabilidad debido a las imperfecciones que pudiera tener el suelo. Estas bases pueden ser de alturas muy variadas y van en función de la altura del objeto que reposara sobre ellas,

para un objeto pequeño, la altura de la base será mayor que la que tendría una base para un objeto más grande.

Lo anterior provoca que el mecanismo de desplazamiento que pudiera sufrir un objeto dentro de un museo pudiera terminar en una caída y por ende un daño.

En el caso de los museos de estudio se puede observar que el 95% de los objetos analizados descansa sobre bases elevadas del nivel de piso terminado. Además se observa que la distancia máxima a la cual se encuentra el borde de la base al borde de la escultura es de 0.30m por lo cual se analiza el deslizamiento hasta esa distancia.

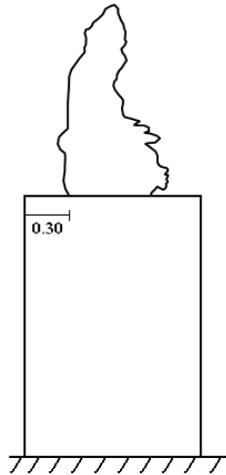


Figura 3.18 Objeto reposando en su base, la distancia máxima al borde de la base es de 0.30

3.6.1 Probabilidad de deslizamiento de hasta 0.30 m bajo la acción de movimientos sísmicos

Para calcular la probabilidad de deslizamiento en primera instancia se recurre a la metodología presentada en el anteriormente, presentada por Jaimes et al (2009) haciendo una simulación del movimiento sísmico y obtener la aceleración mínima de falla. Para este tipo de mecanismo se utiliza el factor de fricción estática correspondiente a cada pareja de materiales.

Tabla 3.7 Coeficientes de fricción estático para parejas de materiales predominantes en este estudio

Materiales	μ_k
Bronce con madera	0.4
Mármol con madera	0.75
Cerámica con madera	0.3
Roca con madera	0.7

Tabla 3.8 Valores de la media y desviación estándar de los logaritmos naturales de las aceleraciones mínimas de falla simuladas por el método de Jaimes et al aplicado a los contenidos del Museo Soumaya

<i>Piso</i>	<i>Nombre del Objeto</i>	μ	σ	<i>Piso</i>	<i>Nombre del Objeto</i>	μ	σ	
Nivel 6	Alicia en el pais de las maravillas	-2.778	0.613	Nivel 5	Vitrina 2	-1.688	1.853	
	Andrieu de Andres	-2.383	1.547		Vitrina 4	1.408	3.573	
	Angel triunfante	-2.204	1.679	Nivel 4	Busto Madame Renoir	-2.857	1.701	
	Apolo y Dafne	-2.356	1.560		Caminando	-2.414	1.510	
	Bailarina Daliniana	-1.898	1.791		Maternidad	-2.281	1.839	
	Balzac con habito de monje	-1.908	0.312		Mujer arreglandose el cabello	-2.069	1.853	
	Cabeza colosal de Pierre	-2.271	1.629		Mujer recostada	-1.455	1.855	
	Cristo de San Juan	-2.007	1.770		Venus triunfante	-2.564	1.792	
	El amor secreto	-2.402	1.517		Vitrina 2	-1.688	1.853	
	El atleta	-1.895	1.791	Nivel 3	Juan el bautista	-2.915	1.654	
	El genio de la danza	-2.373	1.547		La dolorosa	-2.763	1.750	
	El vals secreto	-2.158	1.710		Lampara con alegoria a la paternidad	-2.232	1.658	
	Elefante espacial	-2.483	1.437		San Jose con el niño	-2.750	1.752	
	Eustache de San Pierre	-2.419	1.500		San Luis Gonzaga	-2.496	1.804	
	Gabinete antropomórfico	-2.228	1.660		Vitrina 4	1.408	3.573	
	Jean de Fiennes	-2.466	1.455		Nivel 2	Busto Renoir	-2.253	1.844
	La edad de bronce	-2.457	1.462	La edad de bronce pequeña		-2.802	1.729	
	La mujer en llamas	-2.369	1.549	Niño pasionario		-2.780	1.740	
	La mujer jirafa	-2.614	1.284	Portapapeles		-2.308	1.602	
	La plegaria	-2.185	1.692	Vitrina 3		-1.488	1.853	
	La puerta del infierno	-2.363	1.551	Nivel 1	Monedas de la historia	-1.877	1.794	
	Los luchadores	-2.021	1.766		Vitrina 2	-1.688	1.853	
	Montado por el tiempo	-2.312	1.599		Vitrina 3	-1.488	1.853	
	Newton surrealista	-2.412	1.510		Vitrina 4	1.408	3.573	
	Perfil del tiempo	-1.943	1.783		Vitrina 5	-1.368	1.853	
	Perseo	-2.143	1.721	Planta Baja	El pensador	-2.043	1.762	
	Ugolino y sus hijos	-2.126	1.728		La piedad	-1.854	1.798	
					Laocoonte y sus hijos	-2.190	1.687	

Al aplicar el mismo método del capítulo anterior al inventario de contenidos se obtuvieron los siguientes resultados de la tabla 3.8.

La tabla 3.8 muestra los valores de la media y la desviación estándar de los logaritmos naturales de las aceleraciones mínimas de falla o aceleración necesaria para desplazar el objeto 0.30 m después de simular los movimientos.

Como se vio anteriormente, con esta información se pueden realizar gráficas de probabilidad, en este caso de deslizamiento a 0.30 m. La distribución de probabilidad que requiere de entrada estos dos datos es la distribución lognormal, la cual posee propiedades que facilitan los cálculos, además de que su relación con la distribución de Gumbel de valores extremos, que sería la más apropiada, es bastante alta.

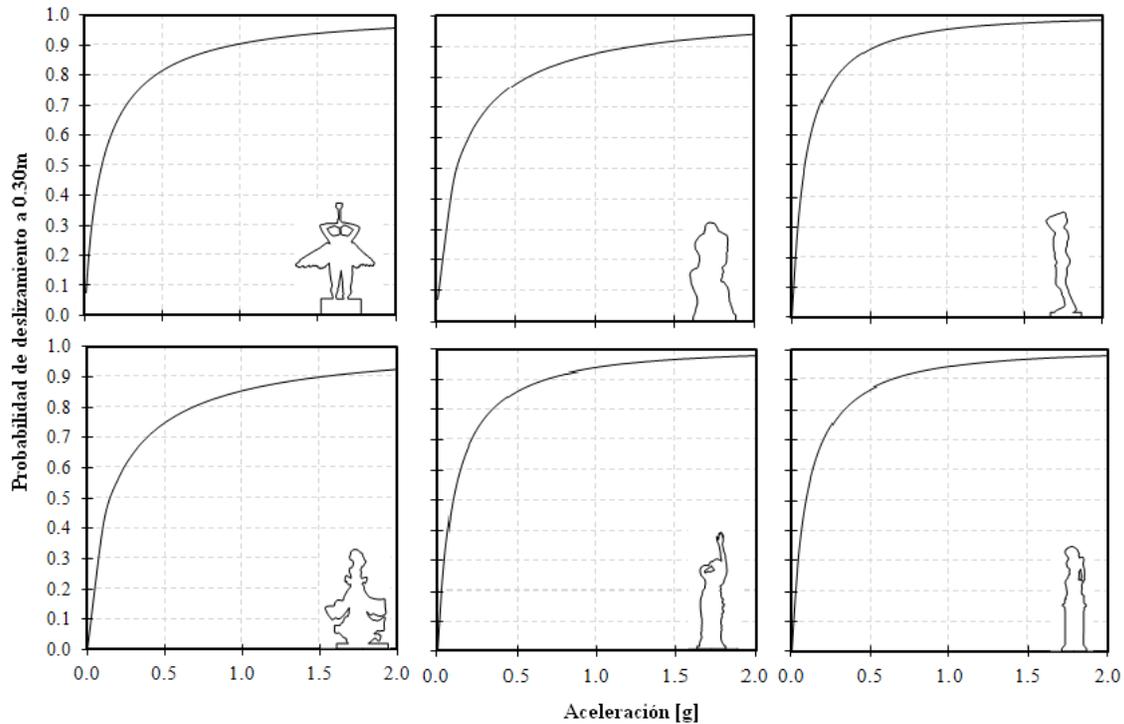


Figura 3.19 Gráficas de probabilidad de deslizamiento a 0.30 m de algunos contenidos del Museo Soumaya

Cabe mencionar que este método puede tener un grado de error mayor, ya que los objetos y materiales poseen diferentes coeficientes de fricción y estos son determinados experimentalmente, lo cual arroja que estos valores se den en un intervalo y no un valor específico debido a errores en la experimentación, lo cual asumir un valor puede generar errores. Otra cuestión es que la fuerza de fricción presenta un comportamiento diferente cuando el objeto está en reposo que cuando está en movimiento, por eso la existencia de un coeficiente de fricción estático y uno dinámico, el constante cambio entre los estados de reposo y movimiento del objeto puede generar errores en el cálculo.

Este trabajo de tesis se concentra en la falla debido al vuelco del objeto, el cual puede generar más daños que un posible deslizamiento (en el caso de los museos). Sin embargo este también se puede presentar, aislado o simultáneo a un posible vuelco del objeto y no se puede dejar de mencionar.

3.7 Fragilidad y costo del daño

Anteriormente se ha calculado la probabilidad de que un objeto se vuelque o se deslice hasta 0.30m, sin embargo, los objetos analizados son de diferentes materiales, en cuanto a su fragilidad, por ejemplo, una escultura de bronce se volcará con cierto valor de aceleración del suelo pero la probabilidad de que una vez que haya fallado se rompa es diferente a una vitrina que una vez que haya fallado se rompa también. El hecho de que un objeto se vuelque o deslice, solo es relevante si el mismo se daña o se rompe.

Actualmente no hay información disponible detallada de la fragilidad de materiales específicos ante una posible caída, sin embargo existen datos generalizados de algunos materiales de uso común, esta se muestra en la tabla 3.9 que incluye algunos ejemplos tomados de ISO,1982.

Tabla 3.9 Ejemplos de fragilidad de diferentes objetos [ISO, 1982]

Clasificación	Ejemplos	D_{max} [%]
Nula	Rollos de papel, cajas de seguridad	5
Poco vulnerable	Muebles de madera o metal	30
Vulnerable	Computadoras, radios	80
Muy vulnerable	Vidrio, arte, porcelana	100

En la tabla 3.9 se observa que el parámetro D_{max} representa el máximo porcentaje de daño que puede sufrir el contenido ante una caída, se muestra que un rollo de papel por ejemplo puede sufrir hasta un 5% de daño y un objeto de vidrio hasta un 100% de daño.

Para obtener la probabilidad de que se rompa dicho objeto con una aceleración dada basta con multiplicar las curvas de probabilidad de vuelco y/o deslizamiento obtenidas por el porcentaje de daño esperado.

En los contenidos de los museos que se analizaron se observa que los materiales que componen los objetos son básicamente: bronce, mármol, roca, cerámica, barro y acrílico. Para obtener la fragilidad o porcentaje de daño de los mismos se interpolan los valores proporcionados en la tabla 3.9, sin embargo, se considera que la geometría también es importante, ya que la mayoría de las esculturas poseen partes sobresalientes muy esbeltas como dedos o cuellos en las esculturas antropomórficas, y estas son más susceptibles a una posible ruptura que el resto del cuerpo. Tomando esto en cuenta se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 3.10 Fragilidad de los materiales de las esculturas analizadas

Material	D_{max} [%]
Acrílico	30
Barro	100
Cerámica	100
Estatuas de mármol	80
Estatuas de bronce	60
Estatuas de roca	70
Vitrinas	100

Es decir, las esculturas que están hechas de barro o cerámica al volcarse son frágiles a un nivel del 100% ya que son demasiados susceptibles a romperse. Se podría pensar que el bronce o la roca tienen una fragilidad muy baja, sin embargo, como se menciona anteriormente, la geometría juega un papel importante, dedos, cabezas y demás partes frágiles componen la mayoría de las esculturas, es por eso que el factor de fragilidad es relativamente alto, al igual que el mármol.

Una vez identificado esto se procede a multiplicar las curvas de probabilidad de vuelco y deslizamiento por el factor de fragilidad y así obtener una probabilidad de daño o ruptura. La figura 3.20 muestra los resultados.

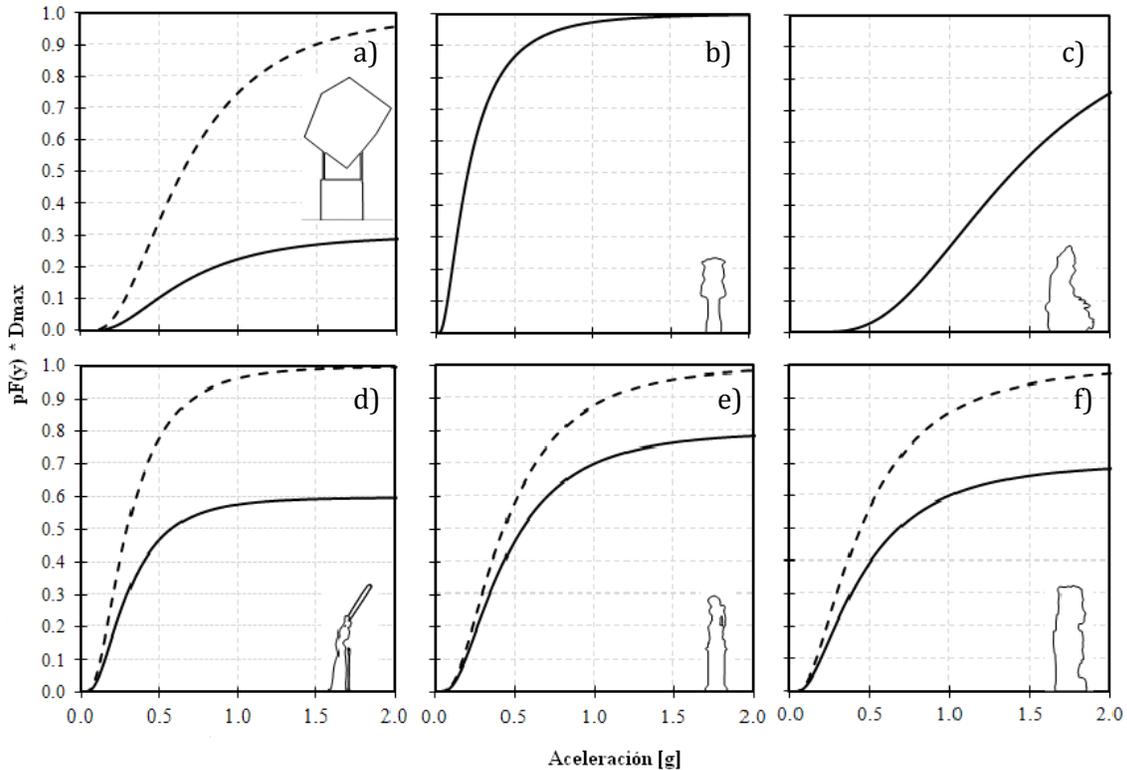


Figura 3.20 Gráficas de vuelco multiplicadas por el daño máximo (línea continua) y de vuelco original (línea punteada) en esculturas de a) acrílico, b) barro, c) cerámica, d) bronce, e) mármol y f) roca

En la figura 3.20 se puede observar, por ejemplo, que una escultura de acrílico, tal como la escultura de la Torre de Ingeniería, que la probabilidad de vuelco a una aceleración de 2 g, es de 0.95, mientras que la probabilidad de que se dañe seriamente es de 0.39, así mismo, en una escultura de cerámica, la probabilidad de que se vuelque y que se dañe es al mismo tiempo de 0.75 con una aceleración de 2 g.

En la mayoría de las ocasiones no solo hace falta conocer si se dañara la escultura, en términos más prácticos, hace falta conocer el monto monetario que generaría ese daño al repararlo o reemplazarlo.

Si multiplicamos las curvas de probabilidad por el costo relativo del objeto (calculado en el capítulo anterior) del que se quiera saber el probable costo que implicaría su caída de bajo cierta aceleración del suelo.

La figura 3.21 muestra dichas graficas afectadas por el costo relativo.

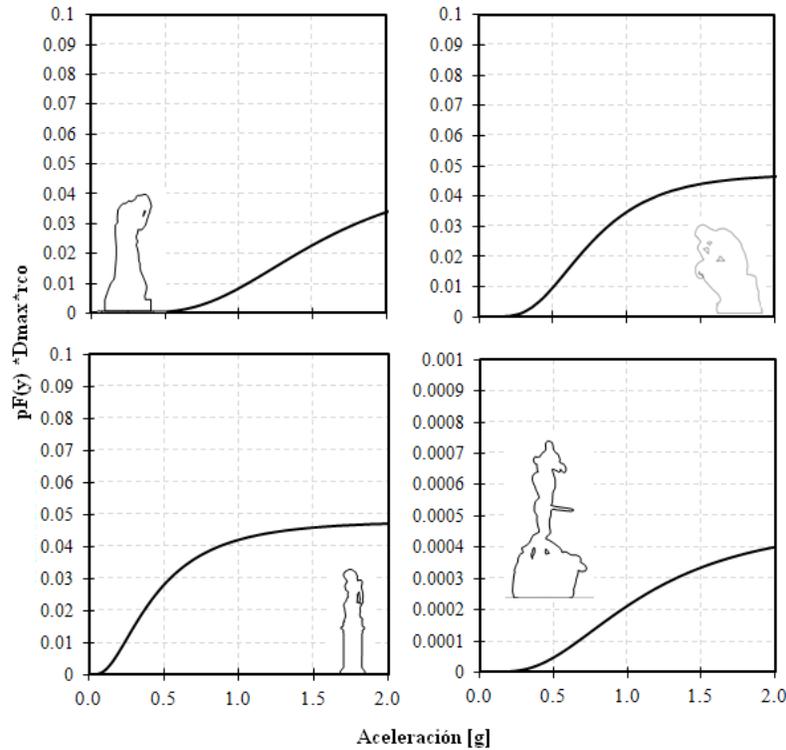


Figura 3.21 Curvas de probabilidad de vuelco multiplicadas por el daño máximo y el costo relativo

En la figura 3.21 se muestra que el costo relativo del posible daño que pudiera sufrir una escultura a causa de una caída por volcadura es dependiente de la aceleración máxima del suelo o PGA. Por ejemplo, anteriormente se observó la aceleración mínima para que un objeto se volcara en torno a uno de sus puntos extremos de apoyo, o numéricamente la aceleración a la que la probabilidad de falla sea de 0.5. Utilizando esta información, y la escultura “El amor secreto” mostrada se tiene que para una aceleración mínima de falla de 0.6 g el costo que tendría su posible reparación es de \$2,458,584.00 dólares, debido a su fragilidad y la aceleración que provocó el vuelco, y para aceleraciones menores se tendría un costo de cero debido a que no sufre la volcadura. Ahora bien, el factor de seguridad que quiera tomar el analista estará en función de la confianza que tenga, tomando aceleraciones de falla menores.

CAPITULO 4

Estimación de curvas de susceptibilidad de falla de contenidos dado un parámetro de intensidad sísmica

Anteriormente se estudio la susceptibilidad de vuelco con una distribución de probabilidad lognormal a partir de datos que se obtuvieron de simulaciones dadas por el método de Jaimes et al. Este método resultó en curvas de probabilidad de vuelco, las cuales tienen como finalidad dar a conocer la probabilidad que tienen un objeto individualmente de sufrir un vuelco sobre sus extremos en función de una aceleración del suelo. Esta aceleración representa la aceleración mínima a la que se presentaría la falla del objeto.

Otra forma de conocer esta susceptibilidad al vuelco es comparar directamente con una muestra de objetos de geometría conocida, que fueron sujetos a las aceleraciones de los sismos registrados y utilizados. Estos sismos son escalados a una aceleración deseada que generalmente es la correspondiente al periodo de retorno que se quiera analizar.

Una vez que se conoce la aceleración objetivo a la cual se escalaran las 19 historias utilizando el método PSHA (Esteve), las historias se escalan. Los objetos de prueba se someten a cada una de estas nuevas historias y se registran cuales vuelcan y sus dimensiones en cuanto a b_c , h_c y R definidas en capítulos anteriores. Una vez obtenido este conjunto de valores se grafican en un plano en el cual el eje de las abscisas contiene los valores de b_c y en el eje de las ordenadas los valores de h_c correspondientes a los objetos que sufrieron la volcadura bajo esta aceleración específica.

En edificios altos existe un fenómeno de amplificación de aceleración en los niveles superiores, debido al comportamiento similar a osciladores de varios grados de libertad en donde el periodo fundamental y el nivel de amortiguamiento de la estructura juegan un papel medular en este fenómeno, es por eso que en el caso del Museo Soumaya se aplica un método para conocer que tanto se amplifica la aceleración que sufren los pisos superiores en relación con la aceleración máxima presentada en el suelo. Esto nos permite conocer el factor al que se amplifica la aceleración de cada piso de la estructura.

Esto implica un segundo escalamiento a las aceleraciones máximas de los sismos registrados, el cual actualiza esta aceleración del suelo previamente estudiada a la aceleración experimentada en los pisos superiores. Haciendo esto, se repite el proceso anterior.

En este capítulo se presenta la elaboración de este tipo de grafico y los procesos intermedios que intervienen en la misma.

4.1 Análisis probabilista de peligro sísmico

Para poder simular las aceleraciones del suelo en diferentes periodos de retorno hace falta saber la aceleración y la historia que se presentaría en un evento de esa magnitud. Una opción práctica es escalar acelerogramas ya existentes en el sitio, al nivel de intensidad requerido y para poder realizar esto es necesario conocer la aceleración pico de escalamiento.

El objetivo de un PSHA es cuantificar la probabilidad de excedencia de varios niveles de movimiento del suelo en un sitio o conjunto de sitios, dados todos los posibles sismos. Este estudio numérico analítico fue formalizado por Esteva (1967) y Cornell (1968).

Tradicionalmente la PGA es usada para cuantificar la aceleración del suelo en un análisis PSHA, pero últimamente el espectro de respuesta en aceleración (SA), que representa la máxima aceleración experimentada por un oscilador amortiguado de un grado de libertad. El periodo del oscilador se elige de acuerdo al periodo natural de vibración de la estructura y típicamente el porcentaje de amortiguamiento es del 5%.

Sin embargo para simplificar los cálculos, en este estudio se utiliza la PGA como parámetro de aceleración del suelo.

Un PSHA implica tres pasos: 1) especificación del modelo de fuente de peligro sísmico, 2) las especificaciones del modelo de movimiento de tierra, y 3) el cálculo probabilístico. De esta manera es posible incluir todas las fuentes sísmicas posibles que podrían afectar a la zona de estudio, tomando en cuenta las magnitudes y las distancias entre la zona y el epicentro. El resultado de un PSHA es una o varias curvas para el sitio de estudio que relacionan parámetros sísmicos con periodos de retorno.

El modelo parte de una descripción de los sismos registrados, desde su ubicación, magnitud y calendario. Este conjunto puede estar compuesto por sismos de diferentes tipos de fallas.

Por ejemplo un conjunto puede estar compuesto de N escenarios sísmicos (E_n) donde cada uno tiene su propia magnitud (m_n), localización (L_n) y frecuencia de ocurrencia (r_n).

$$E_n = E(m_n, L_n, r_n) \tag{4.1}$$

El modelo de movimiento del suelo utilizado en un PSHA está referido a una relación de atenuación. Por lo general, dado el número de terremotos considerados en el análisis, las relaciones de atenuación pueden ser fáciles de calcular. La relación de atenuación más básica es una función de la magnitud y la distancia. Un ejemplo se muestra en la figura 4.1.

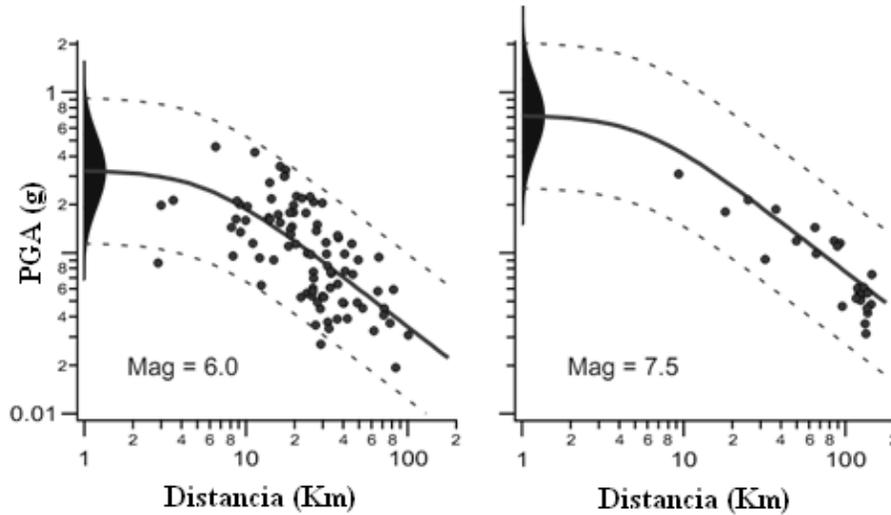


Figura 4.1 Relación de atenuación de sismos, valor de la mediana (línea continua) y 95% de nivel de confianza (línea punteada), predicha por Boore, Joyner y Fuma (1997).

La figura 5.1 muestra la relación de atenuación para sismos de tipo de desgarre para un tipo de suelo dado.

Existen varias tipos de relaciones de atenuación, sin embargo, los resultados esperados o predichos, a menudo varían significativamente, la razón principal se debe a los pocos datos con los que se podría contar en dicho estudio, entre más amplia o completa sea la muestra los resultados serán más parecidos y por ende la confiabilidad de los mismos.

Con el modelo de peligro sísmico y relaciones de atenuación definidos el cálculo de la probabilidad de riesgo es conceptualmente simple, en la práctica puede ser un poco más complicado.

Hay que considerar que el cálculo de un PSHA es para un sitio en particular. El modelo de fuente de peligro sísmico para N escenarios de terremoto E_n , está asociado a una magnitud (m_n), localización (L_n) y frecuencia (r_n). Para la localización de escenario se determina una distancia D_n de la fuente sísmica al lugar de estudio. Con una magnitud m_n y distancia D_n la relación de atenuación proporciona que una posible distribución de los niveles de movimiento del suelo para un escenario es:

$$p_n(\ln PGA) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln PGA - g(m_n, D_n))^2}{2\sigma_n^2}} \quad (4.2)$$

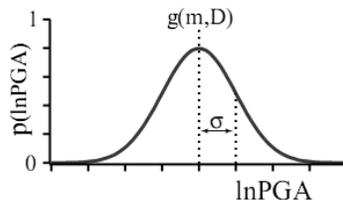


Figura 4.2 Curva que ilustra los parámetros de la ecuación (4.2)

Donde $g(m_n, D_n)$ y σ_n son la media y la desviación estándar respectivamente del $\ln PGA$ dadas por la relación de atenuación. Para saber la probabilidad de excedencia de cada $\ln PGA$ se integra como sigue:

$$p_n (> \ln PGA) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \int_{\ln PGA}^{\infty} e^{-\frac{(\ln PGA - g(m_n, D_n))^2}{2\sigma_n^2}} d \ln PGA \quad (4.3)$$

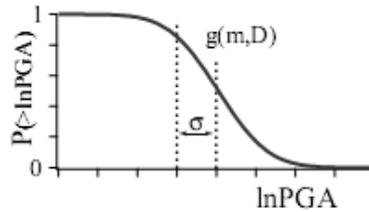


Figura 4.3 Curva que ilustra los parámetros de la ecuación (4.3)

Simplificando la ecuación 4.3 Esteva, 1968, propone lo siguiente:

$$v(y) = \sum_{i=1}^N \int_{M_0}^{M_u} \lambda_0 p(M) \cdot \Pr\langle Y > y | M, R \rangle dM \quad (4.4)$$

Donde N es el número de fuentes sísmicas, M_0 y M_u son la magnitud mínima y máxima que se puede generar en la fuente sísmica, λ_0 es la tasa de excedencia de magnitud, $M = M_0 \cdot p(M)$ es la función de densidad de probabilidad de la magnitud, $P(Y \geq y | M, R)$ es la probabilidad condicional de que la intensidad exceda el valor y en el sitio dado que sucedió la magnitud M a la distancia R .

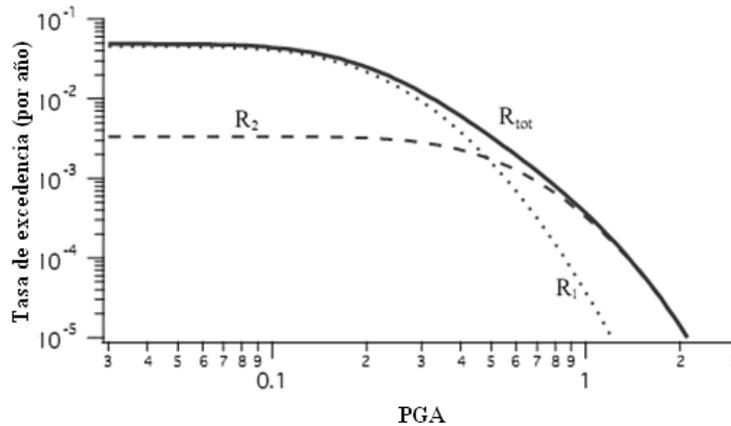


Figura 4.4 Curva de peligro sísmico o de tasa de excedencia de PGA obtenidas a través de un PSHA para dos sitios

Existen errores que pueden ser obvios, por ejemplo en la figura 4.4 se puede observar que existe una probabilidad finita para que una PGA exceda las 2g, (lo que se puede suponer físicamente imposible). De hecho la distribución normal usada en la ecuación (4.2) y (4.3) tienen una probabilidad distinta de cero para todos los casos de movimientos de tierra. Por lo tanto algunos profesionistas truncan la distribución en algún nivel superior o inferior ($\pm 3\sigma$).

4.1.1 Aplicación del modelo PSHA al caso de estudio

Aplicando el PSHA al caso de la ciudad de México, en su zona de terreno firme podemos obtener la tasa o la probabilidad de excedencia de aceleraciones pico en el sitio.

Como ya se sabe el peligro sísmico en la Ciudad de México se debe a tres fuentes: subducción, profundidad intermedia y continentales locales. Y como ya se mencionó anteriormente se utilizaron sismos registrados en la estación CU que se localiza en una zona de terreno firme y se considera como el principal sitio de referencia sísmico ya que desde 1964 ha registrado más de 30 sismos moderados e intensos ($M > 6.0$).

Se calculó la curva de peligro sísmico en terreno firme de la Ciudad de México, dadas en términos de tasas de excedencias para pseudoaceleraciones espectrales para un periodo igual al periodo del suelo (terreno firme). Se usaron las fuentes sísmicas previamente mostradas y un amortiguamiento del 5%, con el programa *CRISIS 2003*.

Como se observa en los resultados que muestran en la figura 4.5, las aceleraciones más grandes tienen un periodo de retorno muy grande o una probabilidad de ocurrencia más pequeña. Los periodos de retorno para la realización de este estudio son de 20, 125 y 475 años, obteniendo de la gráfica sus aceleraciones correspondientes: 0.40, 1.15 y 2.27 m/s^2 respectivamente.

Una vez obtenidas estas aceleraciones *PGA* (*Peak Ground Acceleration*) esperadas para estos periodos de retorno, se escala la *PGA* de cada uno de los 19 sismos registrados a estos valores, obteniendo así 19 historias simuladas para periodos de retorno diferentes. Esto nos permitirá simular el comportamiento de los contenidos de las edificaciones de estudio sometidos a los mismos.

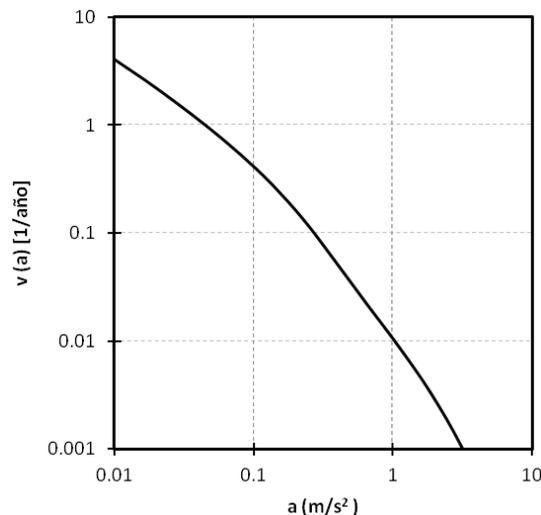


Figura 4.5 Curva de peligro sísmico que representa la *PGA* del suelo de la estación CU (terreno firme) para varios periodos de retorno, incluye todas las fuentes.

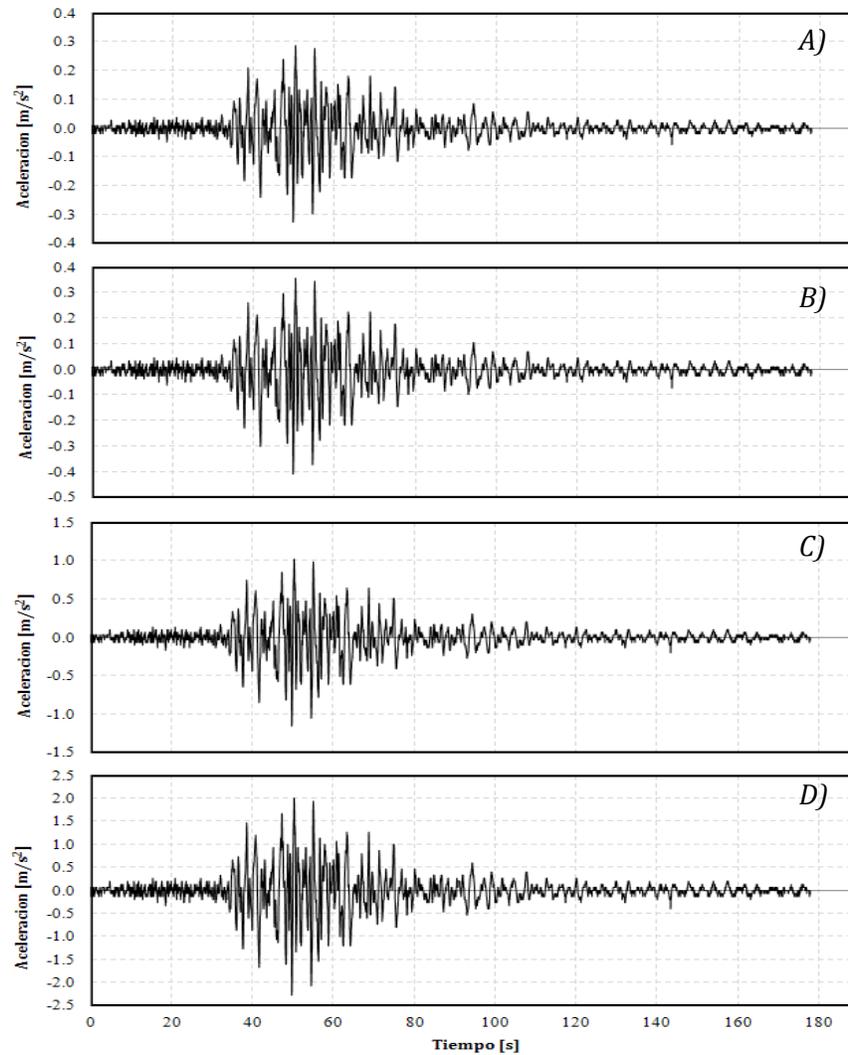


Figura 4.6 Acelerograma del sismo del 19 de septiembre de 1985 escalado a las PGA esperadas en los periodos de retorno. A) Original, B) 20 años, C) 125 años y D) 475 años.

4.2 Amplificación de la aceleración de piso respecto a la aceleración del suelo máxima

Como bien ya se sabe, las aceleraciones sísmicas producen movimientos del suelo, los cuales se pueden observar y sentir cuando ocurren; también se pueden medir con acelerómetros o acelerógrafos ubicados en las estaciones sismológicas. Estas aceleraciones tienen valores diferentes cada intervalo de tiempo, es decir no es constante. Dentro de esta gama de aceleraciones que se presentan hay una máxima, llamada PGA por sus siglas en inglés como se menciona anteriormente.

Las bases de las estructuras, al ocurrir un movimiento sísmico están sometidas a estas aceleraciones, sin embargo cada uno de los niveles de este, experimentan una aceleración diferente. Esto es debido a varios factores, tales como, la altura del edificio, su rigidez, el periodo fundamental y el nivel de amortiguamiento.

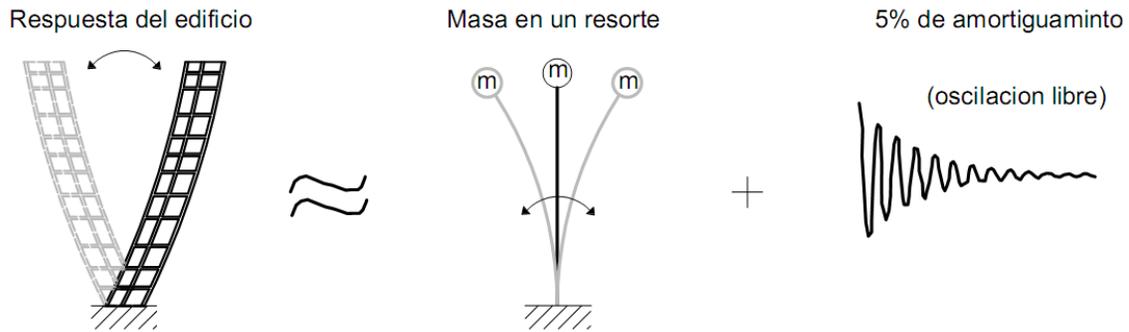


Figura 4.7 Representación de la vibración de una estructura

Para la amplificación de la aceleración máxima del suelo Miranda y Taghavi (2005) desarrollaron un modelo para el cálculo de la respuesta estructural en el artículo “Simplified Analysis Tools For Rapid Seismic Evaluation of Existing Buildings in Urban Areas”.

El modelo simplificado consiste en un modelo elástico lineal continuo. Este tipo de modelos ya han sido propuestos antes para aproximar la respuesta de edificios al viento o fuerzas sísmicas. El modelo continuo consiste en la combinación una viga en voladizo sujeta a flexión y otra viga en voladizo sujeta a cortante y deformadas por flexión y cortante respectivamente, también se asume que a lo largo de la longitud del modelo, ambas vigas sufren las mismas deformaciones laterales, además de que la distribución de masas y de esfuerzos se consideran constantes a lo largo de la altura.

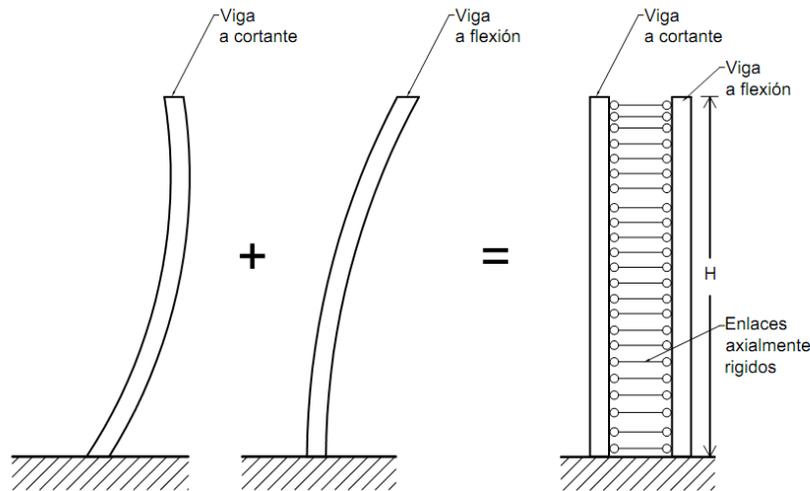


Figura 4.8 Modelo continuo simplificado para estimar la respuesta sísmica de los edificios.

4.2.1 Elaboración del modelo simplificado.

La respuesta de un modelo continuo flexión - cortante (Figura 4.8), cuando está sujeto a aceleración horizontal en la base $\ddot{u}_g(t)$ está dado por la siguiente ecuación diferencial en derivadas parciales, (Miranda y Taghavi, 2005):

$$\frac{\rho}{EI} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + \frac{c}{EI} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + \frac{1}{H^4} \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} - \frac{\alpha^2}{H^4} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = - \frac{\rho}{EI} \frac{\partial^2 u_g(t)}{\partial t^2} \quad (4.5)$$

Donde ρ es la masa por unidad de longitud, H es la altura total del edificio, $u(x,t)$ es el desplazamiento lateral y una altura adimensional $x = z/H$, (variando entre cero para la base y uno para la azotea), el tiempo t , c es el coeficiente de amortiguamiento por unidad de longitud, EI es la rigidez a la flexión de la viga a flexión, y α es la relación de rigidez lateral dada por:

$$\alpha = H \sqrt{\frac{GA}{EI}} \quad (4.6)$$

Donde GA es la rigidez al cortante de la viga sometida a cortante, la relación α es un parámetro adimensional que controla el grado de participación del total de las deformaciones producidas por cortante y flexión y las desviaciones laterales del modelo continuo. Un modelo donde α sea igual a cero representa un fenómeno de flexión pura, valores donde α tienda a infinito corresponde a un modelo de cortante puro, Los valores intermedios corresponden a edificios de múltiples pisos que combinan el total de su elementos mecánicos y deformaciones laterales.

Las formas modales del modelo simplificado están dadas por (Miranda y Taghavi, 2005):

$$\phi_i(x) = \text{sen}(\gamma_i x) - \gamma_i \beta_i^{-1} \text{senh}(x \beta_i) - \eta_i \cos(\gamma_i x) + \eta \cosh(\beta_i x) \quad (4.7)$$

Donde η_i y β_i son parámetros adimensionales para el i -ésimo modo de vibración que son dados por:

$$\beta_i = \sqrt{\alpha^2 + \gamma_i^2} \quad (4.8)$$

$$\eta_i = \frac{\gamma_i^2 \text{sen}(\gamma_i) + \gamma_i \beta_i \text{senh}(\beta_i)}{\gamma_i^2 \cos(\gamma_i) + \beta_i^2 \cosh(\beta_i)} \quad (4.9)$$

Donde γ_i es el valor propio del i -ésimo modo de vibrar correspondiente a la i -ésima raíz de la siguiente ecuación característica:

$$2 + \left(2 + \frac{\alpha^4}{\gamma_i^2 \beta_i^2} \right) \cos(\gamma_i) \cosh(\beta_i) + \left(\frac{\alpha^2}{\gamma_i \beta_i} \right) \text{senh}(\gamma_i) \text{senh}(\beta_i) = 0 \quad (4.10)$$

Los periodos de vibración correspondientes a los modos superiores pueden ser calculados como una función del periodo fundamental de vibración del edificio T_1 :

$$\frac{T_i}{T_1} = \frac{\beta_1 \gamma_1}{\beta_i \gamma_i} \quad (4.11)$$

Ya que las masas fueron supuestas como constantes, los factores modales de participación Γ_i pueden ser calculados con la siguiente expresión:

$$\Gamma_i = \frac{\int_0^1 \phi_i dx}{\int_0^1 \phi_i^2 dx} \quad (4.12)$$

Las integrales mostradas en la ecuación (4.12), pueden resolverse en solución de forma cerrada (Miranda y Akkar, 2005).

Como se muestra en estas ecuaciones, formas y modos de participación modal, que controlan la distribución espacial de las demandas sísmicas, son completamente definidas solo por un parámetro sencillo, la relación de esfuerzo lateral α .

Mientras se asume que las masas permanecen constantes a lo largo de la altura del edificio es razonable en muchos de los casos, asumir que la distribución de esfuerzos laterales permanece constante a lo largo de la altura del edificio, es tal vez una suposición razonable para edificios de uno a tres pisos. Sin embargo, Miranda y Taghavi (2004), han mostrado que el producto de las formas modales, los factores modales de participación así como los coeficientes de periodo son relativamente robustos y no están significativamente afectados por reducciones en los esfuerzos laterales. En el mismo estudio, se ha demostrado que la reducción de masas a lo largo de la altura del edificio no afectan significativamente las características dinámicas del modelo. Aunque Miranda y Taghavi (2005) proveen expresiones para edificios con características dinámicas no uniformes, se concluye en muchos casos, que usando un modelo con características dinámicas uniformes los resultados se aproximan mucho a los modelos no uniformes.

4.2.2 Demandas de aceleración por piso.

Mientras el daño estructural y muchas clases de daño no estructural son causados por las demandas de entrepiso Miranda y Taghavi (2005) mostraron que el daño en los contenidos de los edificios, plafond, lámparas, tuberías y muchos otros tipos de elementos no estructurales, se relaciona con las aceleraciones máximas de cada nivel y las ordenadas espectrales de los mismos. El modelo simplificado que se muestra en la figura 4.8, también puede ser usado para estimar esas aceleraciones en los edificios. A diferencia de los desplazamientos laterales o desviaciones de entre piso que son a menudo dominadas por el modo fundamental de vibración, las aceleraciones de entrepiso son fuertemente influenciadas por el modo de mayor respuesta.

La aceleración de cada piso puede ser calculada por un factor adimensional de altura $x = z/H$.

$$\ddot{u}^t(x, t) \cong \ddot{u}_g(t) + \sum_{i=1}^m \Gamma_i \phi_i(x) \ddot{D}_i(t) \quad (4.13)$$

Donde $D_i(t)$ es la aceleración relativa de un sistema SDOF (sistema de un grado de libertad), con un periodo de vibración igual al i -ésimo modo de vibración de la estructura. En el método propuesto el coeficiente de amortiguamiento en todos los modos es supuesto como el mismo e igual a un factor de amortiguamiento que aproximadamente caracteriza la amortiguación en el edificio. Lo que debería ser notado, que la ecuación (4.13), se extrae de la figura 5.8, solo si las formas modales reales, frecuencias de vibración, factores de participación modal son usados, y solo si la suma incluye un número infinito de modos.

Por lo tanto las principales fuentes de error en el método propuesto cuando se aplica a edificios reales que responden elásticamente son: (a) Error de truncamiento (por solo considerar hasta tres modos de vibración); (b) uso de formas modales y factores de participación aproximados; y (c) representación de un amortiguamiento simplificado en la estructura.

La ecuación 4.13, puede ser escrita en términos del modo absoluto de la historia de aceleración como sigue:

$$\ddot{u}^t(x, t) \cong \left[1 - \sum_{i=1}^m \Gamma_i \phi_i(x) \right] \ddot{u}_g(t) + \sum_{i=1}^m \Gamma_i \phi_i \ddot{D}_i^t(t) \quad (4.14)$$

Donde $D_i(t)$ es la aceleración absoluta de un sistema SDOF con un periodo de vibración igual al i -ésimo modo de vibración de la estructura ante un movimiento del suelo $u_g(t)$, m es el número de modos considerados en la respuesta, Γ_i es el factor de participación del i -ésimo modo de vibrar, $\phi_i(x)$ la amplitud de la i -ésima forma modal.

Las aceleraciones pico son calculadas con la ecuación (4.14) para cuatro edificios se muestran en la figura 4.9. En esa figura se incluyen aceleraciones medidas con instrumentos colocados en los edificios de estudio (puntos) y las calculadas con el método (línea continua). Se puede ver que el método propuesto es capaz de reproducir muy bien las demandas de aceleración que tiene el edificio. Además se puede ver que la distribución de demandas de aceleraciones difiere de una tendencia lineal que comúnmente se asume en los reglamentos de construcción.

Miranda y Taghavi (2003) demostraron que a diferencia de las recomendaciones de Estados Unidos para el diseño de elementos no estructurales que supone que las demandas de aceleración de entrepiso son independientes del periodo, esta variación está fuertemente ligada al periodo fundamental de la estructura, también pero en menos grado de la relación de esfuerzos laterales.

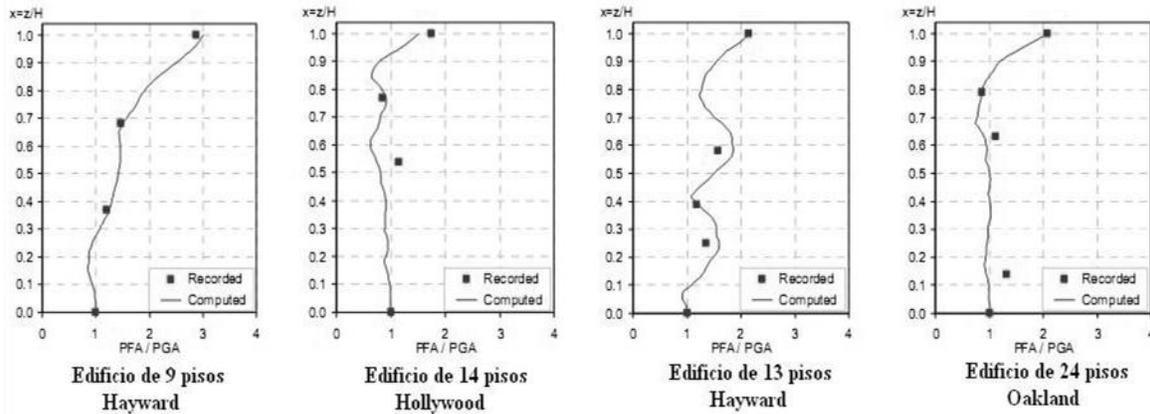


Figura 4.9 Comparación de las demandas de aceleraciones pico, calculadas y registradas, en edificios de concreto reforzado.

Mientras los cálculos de las aceleraciones pico con modelos simplificados y un limitado número de parámetros en edificios es un reto, la estimación de las historias de aceleración y ordenadas espectrales son aun mas difícil, estas dependen de la precisión en la estimación de las frecuencias de los modos superiores de vibración.

En este estudio se considero al museo Soumaya constante en sus propiedades dinámicas a lo largo de su altura ya que como se menciona anteriormente la variación no es muy significativa. El modelo de oscilación de varios grados libertad requiere de tres parámetros: T periodo fundamental, ξ el amortiguamiento crítico para las diferentes formas modales y α . En el caso de edificios, aquellos que tengan muros a cortantes para su rigidez lateral tendrán una deformación como una viga a flexión y valores bajos de α , y uno que posea marcos tenderá a deformarse como una viga a cortante y valores altos de α , (Miranda y Reyes. 2002).

4.2.3 Aplicación del modelo al Museo Soumaya

El museo Soumaya en su interior tiene seis plantas de forma irregular, conectadas mediante rampas que permiten el acceso continuo de los asistentes a las áreas de exhibición del Museo, que se soportan por un núcleo de elevadores y montacargas central, y 28 columnas de acero tubular A 572, grado 50, que se distribuyen de manera no uniforme en cada planta. A esas columnas se conectan traveses de acero que soportan un sistema de losa acero, con 12 cm de peralte de concreto ligero. Existen además algunas columnas verticales, en algunos puntos de las áreas de exhibición.

La superestructura se apoya sobre un muro perimetral en la base donde descansan las 28 columnas de acero. Ese muro perimetral, a su vez, se apoya en columnas de concreto reforzado, que apoyan sobre una losa de concreto, que forma la cimentación de todo el conjunto; en esa parte subterránea existen cinco niveles destinados a estacionamiento de vehículos.

En la parte más alta de la estructura del Museo se colocó un sistema de armaduras radiales, apoyadas en las 28 columnas perimetrales, con diversas secciones transversales e inclinaciones diferentes. Las armaduras se recubrieron con losa, acero y concreto ligero, pero en la parte central se construyó un domo central de vidrio, para proporcionar iluminación cenital.

Todo el edificio está rodeado por una estructura espacial de aluminio, que se apoya en las 28 columnas metálicas que forman la estructura portante. Esta estructura tridimensional soporta una cubierta armada, a la cual se conectan, mediante barras metálicas, 19 000 paneles de aluminio, que forman el aspecto exterior de la fachada lateral del Museo.

Resumen:

- **Ubicación:** Lago Zurich #245, Col. Ampliación Granada, Del. Miguel Hidalgo. México DF. C.P. 11320
- **Fecha de finalización de construcción:** 1 de marzo de 2010.
- **Área:** 17,000 m².
- **Altura:** 47 m
- **Niveles:** 7
 - Nivel PB: 5.00 m de altura.
 - Nivel 1: 4.00 m de altura.
 - Nivel 2: 5.50 m de altura.
 - Nivel 3: 5.50 m de altura.
 - Nivel 4: 5.00 m de altura.
 - Nivel 5: 6.50 m de altura.
 - Nivel 6: 10.00 m de altura.
- **Cimentación:** Losa de cimentación.
- **Sistema de piso:** Losacero de 12 cm de concreto ligero.
- **Estructura:** Acero A570.
- **Topología de la estructura:** 28 columnas de sección circular con diámetro de 20'' y espesor desde 5/8 a 1'', 7 anillos de acero de sección circular de 18'' de diámetro y 168 traveses de sección I

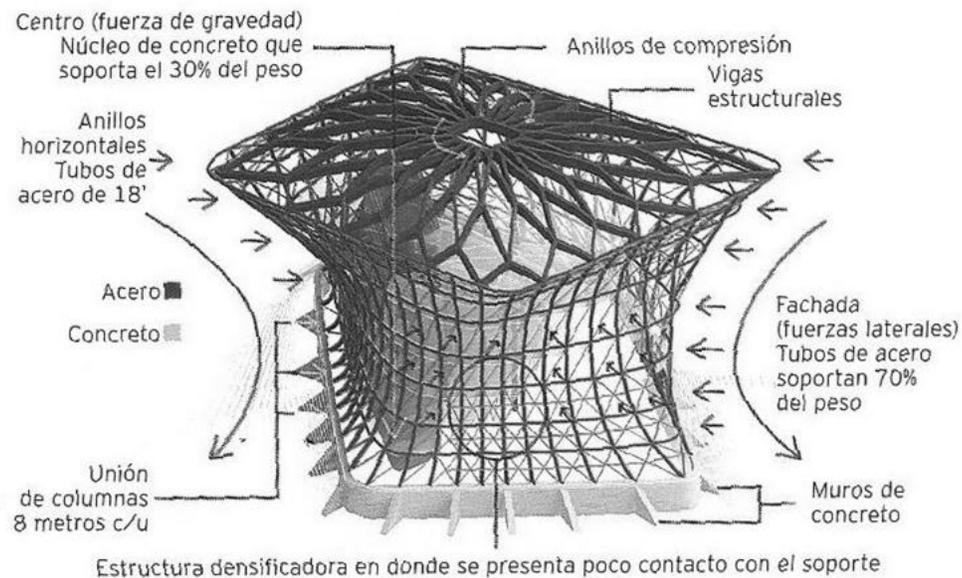


Figura 4.10 Diagrama de la estructura del museo Soumaya

- *Características dinámicas.*

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM se realizaron pruebas para conocer sus características dinámicas. Los estudios en el túnel de viento del IINGEN UNAM permitieron definir las presiones que ejercía el viento en los paneles de las fachadas y las fuerzas que afectan la estabilidad del propio museo ante la acción del viento. Debido a su forma se decidió hacer un estudio de vibración forzada de la construcción terminada, para definir sus formas modales de vibrar, sus periodos y frecuencias, así como sus porcentajes de amortiguamiento asociados a cada modo de vibrar, Rodríguez Neftalí (2010) en su presentación “Ingeniería Estructural en Obras de Gran Tamaño” presenta los resultados.

Tabla 4.1 Propiedades dinámicas del Museo Soumaya obtenidas por el ingeniero Neftalí Rodríguez

Modo de vibrar	1er modo este-oeste	1er modo norte-sur	2do modo este-oeste	2do modo norte-sur
Frecuencia [Hz]	2.16	1.80	3.6	3.6
Periodo [s]	0.463	0.555	0.218	0.218
Por ciento de amortiguamiento	2.33	4.09	1.38	2.41
Coefficiente de variación	11.94	3.21	20.08	5.30

Para fines de comparación se muestran datos publicados en Normas Europeas sobre niveles de amortiguamiento recomendados para estructuras con diferentes tipos de materiales.

- | | |
|-----------------------------------|-------|
| 1. Edificio de concreto reforzado | 1.59% |
| 2. Edificio de acero | 0.8% |
| 3. Edificios mixtos | 1.27% |

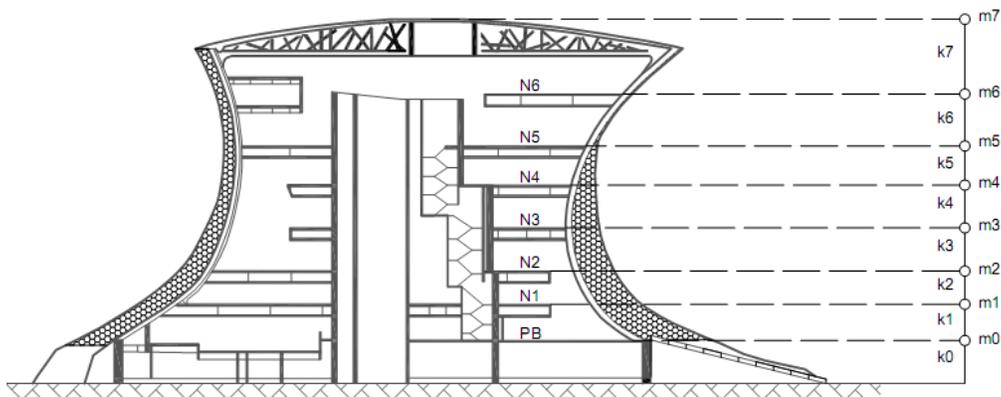


Figura 4.11 Museo Soumaya representado por osciladores de varios grados de libertad.

Se presenta la respuesta de osciladores de varios grados de libertad, figura 4.11, ante los sismos registrados en la estación CU siendo un total de diecinueve registros. Los periodos estructurales se muestran en la Tabla 4.1. Se usa el método simplificado con $\alpha = 15$ debido al arreglo estructural, el amortiguamiento crítico es el que se muestra en la tabla 4.1. Con estos tres datos se procede a calcular la amplificación de la aceleración máxima del suelo del Museo Soumaya. Utilizando el programa Microsoft Excel se pueden calcular y resolver las ecuaciones mostradas en este capítulo, lo cual acelera significativamente el procedimiento, ya que es un proceso largo y reiterativo para cada sismo utilizado.

En la figura 4.13 se presentan las graficas de amplificación entre la aceleración máxima de cada piso (PFA, *Peak Floor Acceleration*) y la aceleración máxima del suelo (PGA, *Peak Ground Acceleration*), PFA/PGA, para alturas relativas z/H . La figura 4.13 solo presenta la respuesta del museo Soumaya a seis de los diecinueve sismos, sin embargo, el método se aplicó a la totalidad de los registros.

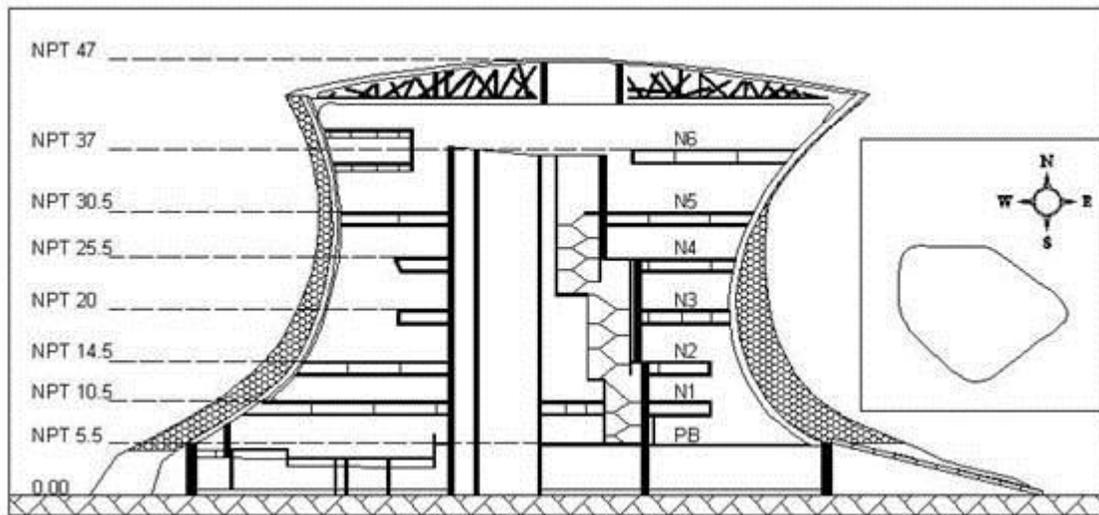


Figura 4.12 *Altura de cada nivel del museo Soumaya respecto al suelo y orientación en planta*

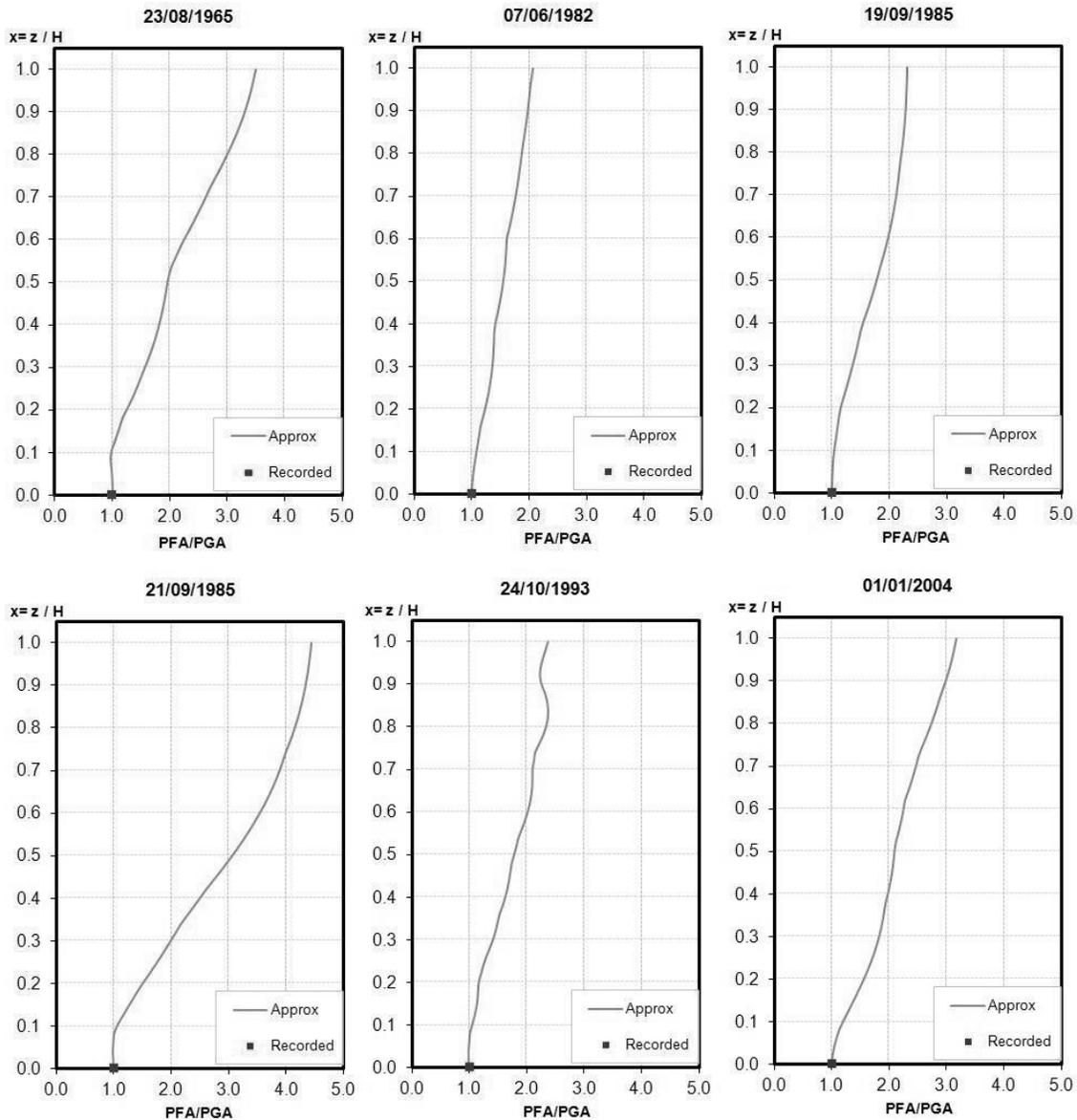


Figura 4.13 Aceleración máxima de piso respecto a la del suelo, PFA/PGA, del museo Soumaya para distintos sismos registrados en la estación CU, utilizando las propiedades dinámicas obtenidas por el profesor Neftalí Rodríguez

Para poder evaluar los resultados se aplica el modelo simplificado al total de los diecinueve registros en ambas direcciones, N-S y E-W, en la figura 4.14 se presenta la aceleración máxima de piso respecto al suelo de los diecinueve registros superpuestos así como la media correspondiente.

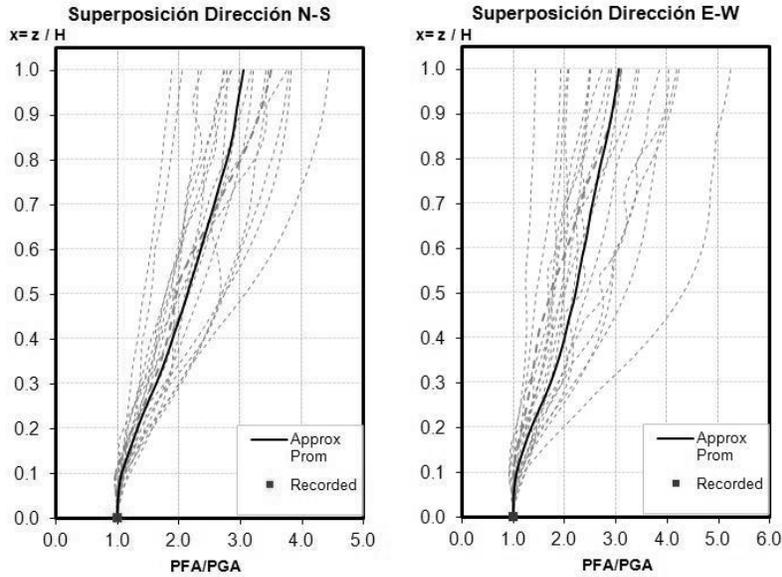


Figura 4.14 Aceleración máxima de piso respecto a la del suelo contra la altura normalizada utilizando los 19 registros sísmicos (líneas punteadas), y un valor medio de los mismos (línea continua), para las direcciones N-S y E-W

Cabe mencionar que el análisis o amplificación de esta aceleración se debe revisar en las dos direcciones, ya que es imposible predecir en qué dirección se producirán los movimientos o aceleraciones sísmicas, sin embargo la figura 4.15 presenta el valor medio de ambas direcciones superpuesto, y se puede apreciar que los valores de amplificación son muy similares entre sí, por lo que es suficiente efectuar el análisis posterior solo en una de las dos direcciones.

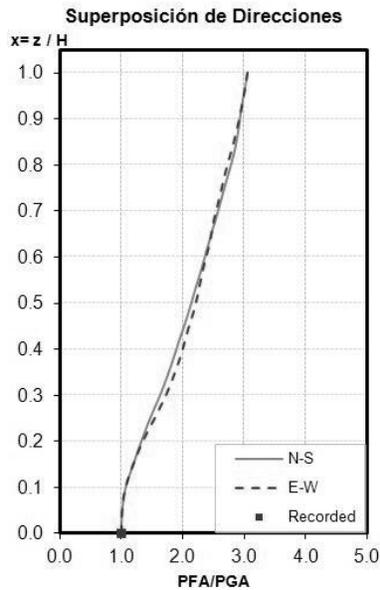


Figura 4.15 Aceleración máxima de piso respecto a la del suelo contra la altura normalizada superponiendo los valores medios de la dirección N-S (línea continua), y E-W (línea punteada)

En conclusión se obtuvo la aceleración máxima de piso respecto a la del suelo del museo Soumaya utilizando 19 registros sísmicos de la estación CU y utilizando el modelo simplificado propuesto por Miranda y Taghavi (2005), utilizando las características dinámicas obtenidas en el estudio de vibración forzada dirigido por el Ing. Neftalí Rodríguez Cuevas. Como resultado se obtuvo que la aceleración del piso se amplifica en relación con la del suelo según sea la altura de la sala en donde se encuentre. En el análisis para las direcciones N-S y E-W se demostró que los valores PFA/PGA son muy similares y que por tanto no hace falta revisar a la estructura en ambas direcciones, basta con solo una. Haciendo uso de la figura 6.15 podemos identificar los factores de amplificación que se utilizarán para cada sala y estos son los mostrados en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Factores PFA/PGA que amplifican las aceleraciones de piso del museo Soumaya según los niveles que posee

Planta	PB	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Factor de amplificación	1.10	1.40	1.60	1.95	2.20	2.45	2.70

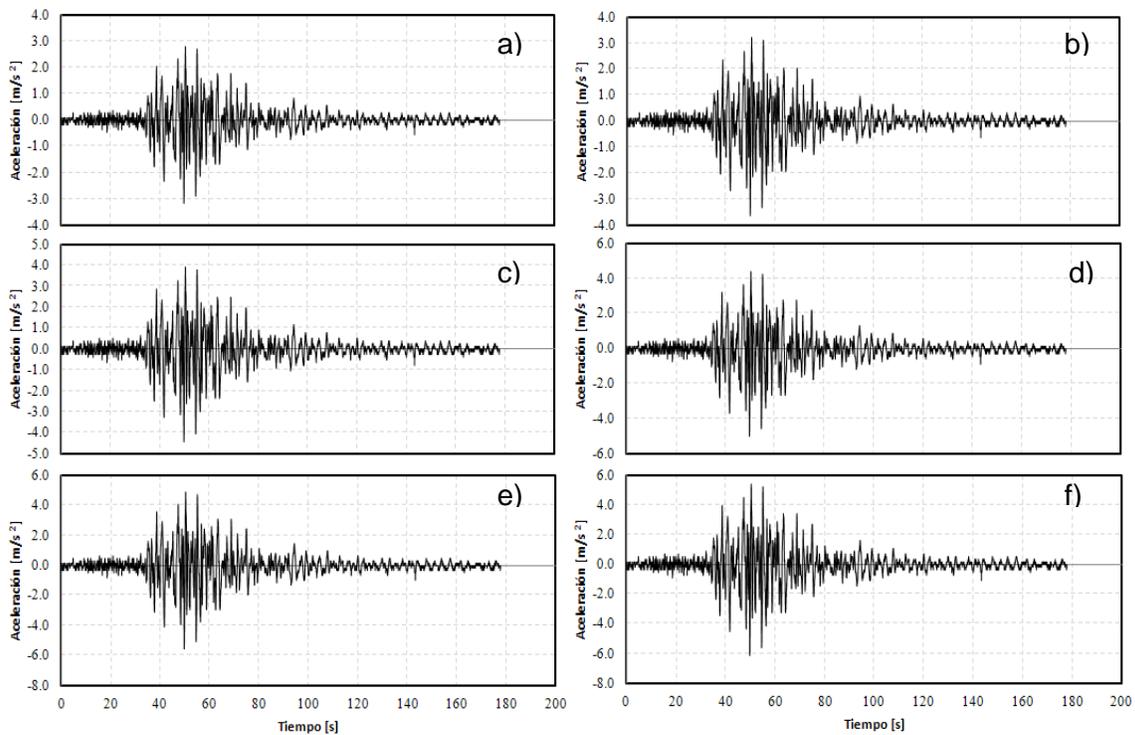


Figura 4.16 Acelerogramas del sismo del 19 de septiembre de 1985 con un periodo de retorno de 475 años amplificado para varios niveles del museo Soumaya, a) Nivel 1, b) Nivel 2, c) Nivel 3, d) Nivel 4, e) Nivel 5 y f) Nivel 6

Este método se utilizó solo para evaluar la amplificación que sufren los niveles superiores del museo Soumaya, ya que de los tres edificios que se analizan como ejemplo en este trabajo de tesis este es el que cuenta con más de un nivel.

4.3 Graficas h_c vs b_c

Como se menciona anteriormente una vez obtenidos estos factores podemos someter estos cuerpos regulares a estas nuevas historias simuladas para conocer cuales fallan por vuelco. Al conocer esto se registran las dimensiones de los cuerpos que fallaron y se pueden graficar de la siguiente manera.

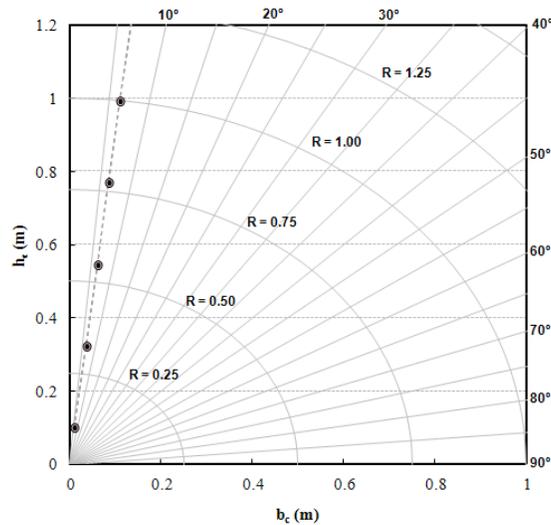


Figura 4.17 Gráfica que presenta las dimensiones de los cuerpos regulares que se volcaron con una aceleración dada, en este caso para un periodo de retorno de 20 años en el 6to nivel del Museo Soumaya

Al unirlos estos puntos se genera una línea, que bien se podría interpretar como una línea límite de falla, es decir, los elementos más esbeltos que los que forman esta línea serán mucho más propensos a volcarse que los más robustos, en lenguaje numérico se traduce como: a menor relación b_c / h_c el objeto quedara ubicado por encima de la línea limite antes descrita y por lo tanto es mas esbelto y más propenso al vuelco y viceversa para objetos robustos de relación b_c / h_c mayor que los de la línea limite.

Esta línea límite representa la aceleración máxima esperada para cierto periodo de retorno, pero solo para una historia de los sismos que se pudieran tener registrados. Para tener el resultado total se debe hacer la simulación de las 19 historias individuales actuando sobre los mismos objetos iniciales de la prueba y así conocer ahora cuales se vuelcan con cada historia. Podemos graficar cada una de estas nuevas líneas límites de falla en un solo grafico y así poder tener una línea que represente todos los sismos utilizados en el estudio, teniendo una mejor certeza de la tendencia de los objetos a volcarse dada una aceleración.

En el caso del museo Soumaya hay que resaltar que tiene seis niveles y cada objeto sufre una aceleración distinta en función del nivel donde se encuentre. Por esta razón hay que hacer una simulación con acelerogramas escalados a estas aceleraciones pico, anteriormente se muestra como efectuar dicha amplificación.

La figura 4.18 muestra el grafico con los 19 registros y su línea media correspondiente.

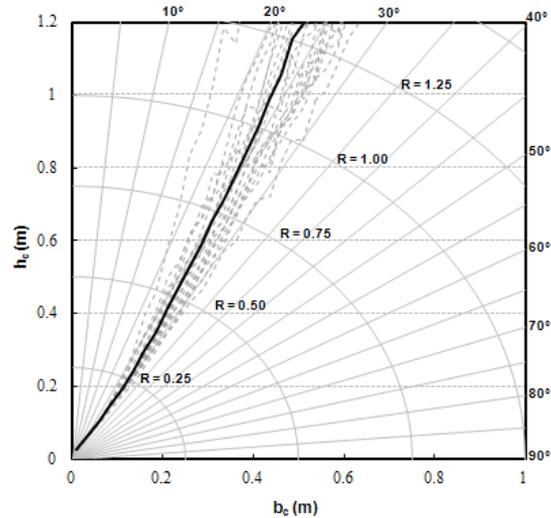


Figura 4.18 Línea de límite de falla media (línea continua) y líneas de límite de falla de cada uno de los diecinueve registros (líneas punteadas), para un periodo de retorno de 475 años en el 6to nivel del Museo Soumaya

Una vez terminado este gráfico basta con ubicar los contenidos de los que se desee saber su propensión al vuelco en las coordenadas b_c y h_c que le correspondan, estas dimensiones se especifican en el capítulo 3. El resultado se muestra en la figura 4.19.

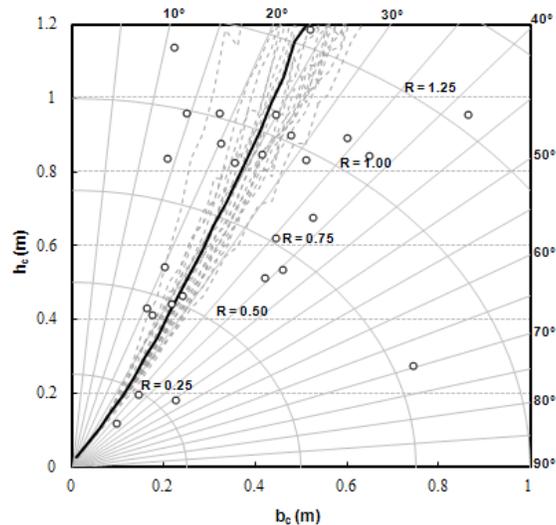


Figura 4.19 Gráfico con línea de límite falla media (línea continua) y contenidos (círculos), los círculos que están por encima de la línea son muy propensos al vuelco, mientras que los que están debajo no son propensos al vuelco bajo una aceleración dada.

Esto se hace para cada nivel y cada institución que se analizó para cada aceleración correspondiente a periodos de retorno de 20, 125 y 475 años, estas aceleraciones se obtuvieron anteriormente. A continuación se muestran las gráficas resultantes.

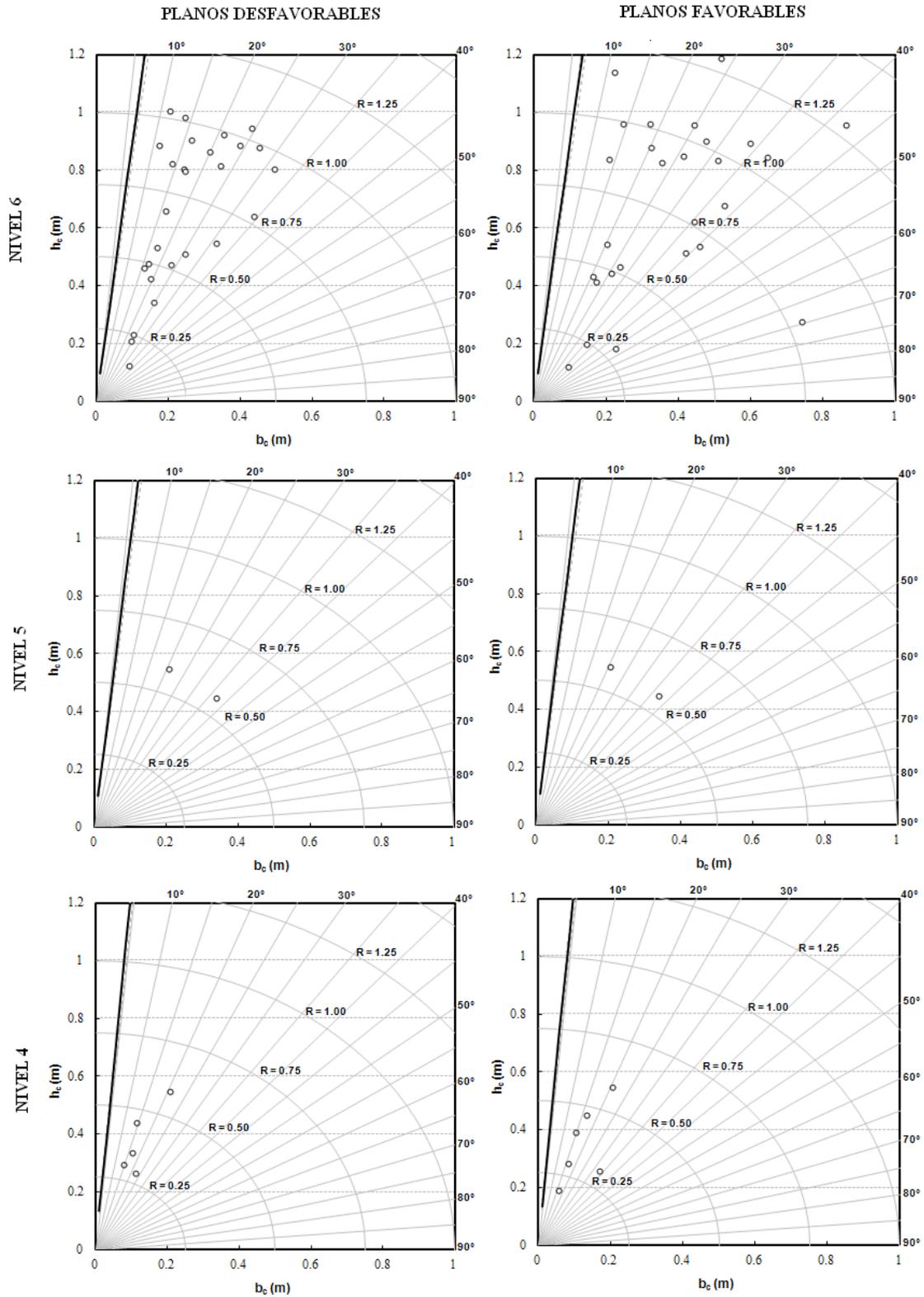


Figura 4.20 Gráficas h_c vs b_c del Museo Soumaya para un periodo de retorno de 20 años

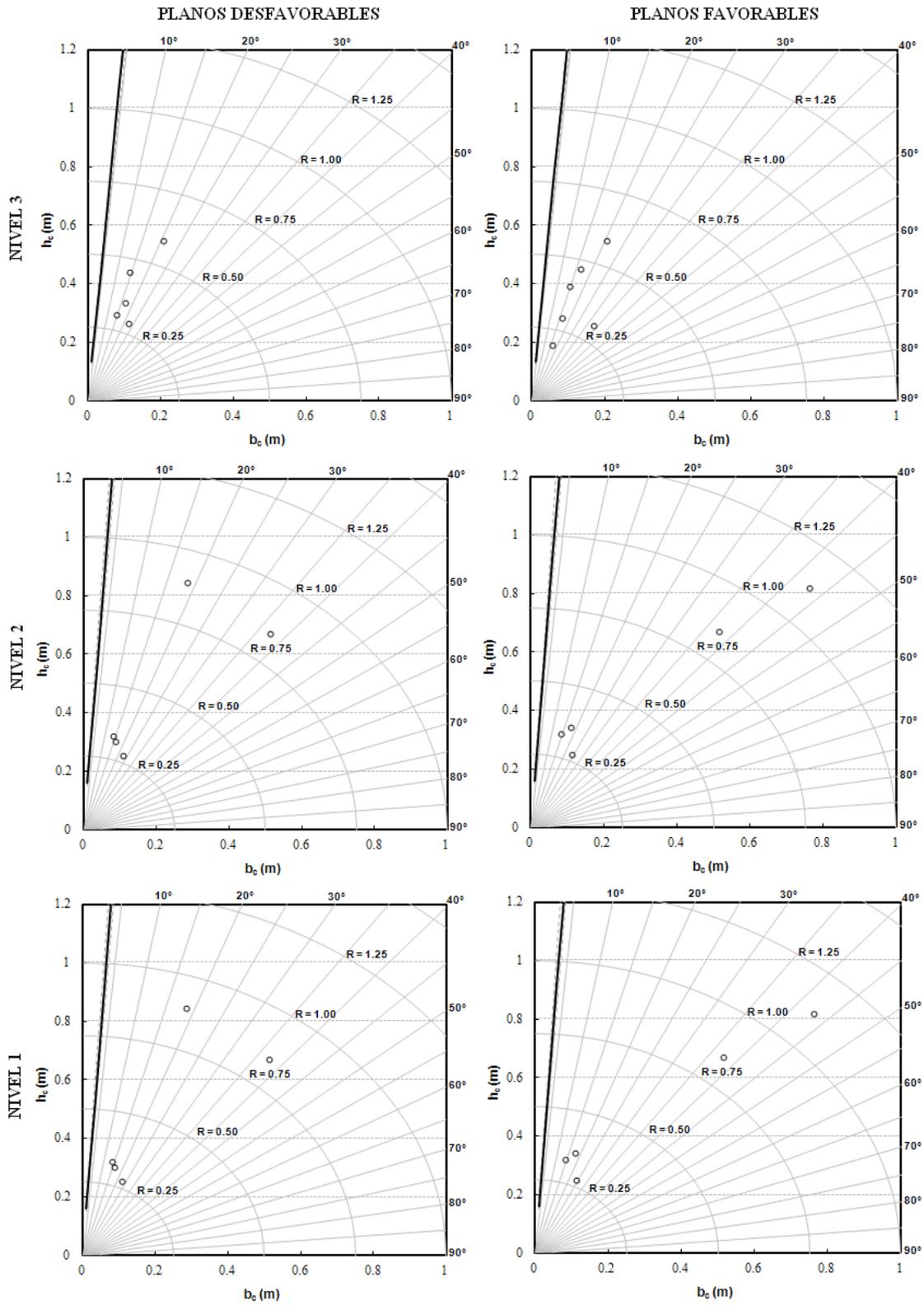


Figura 4.20 (Continuación)

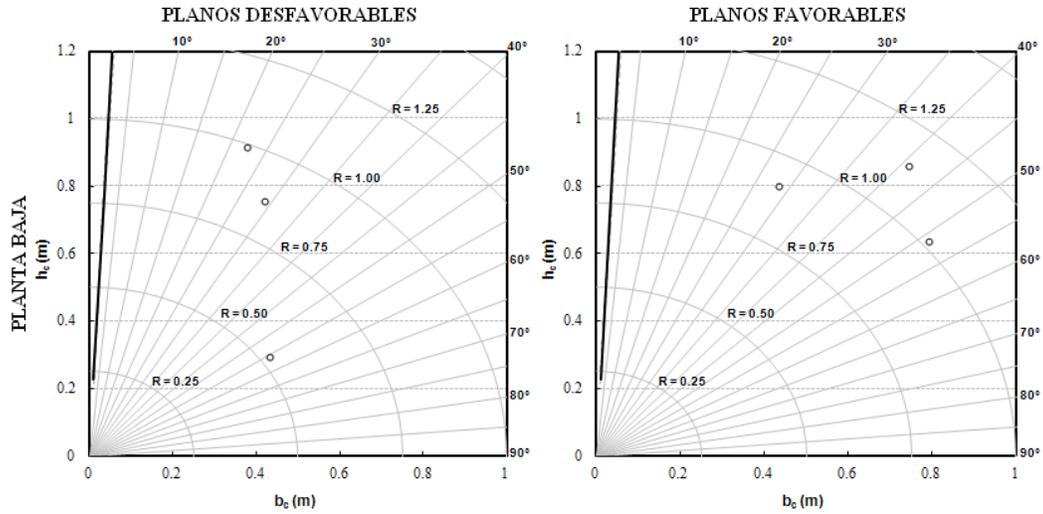


Figura 4.20 (Continuación)

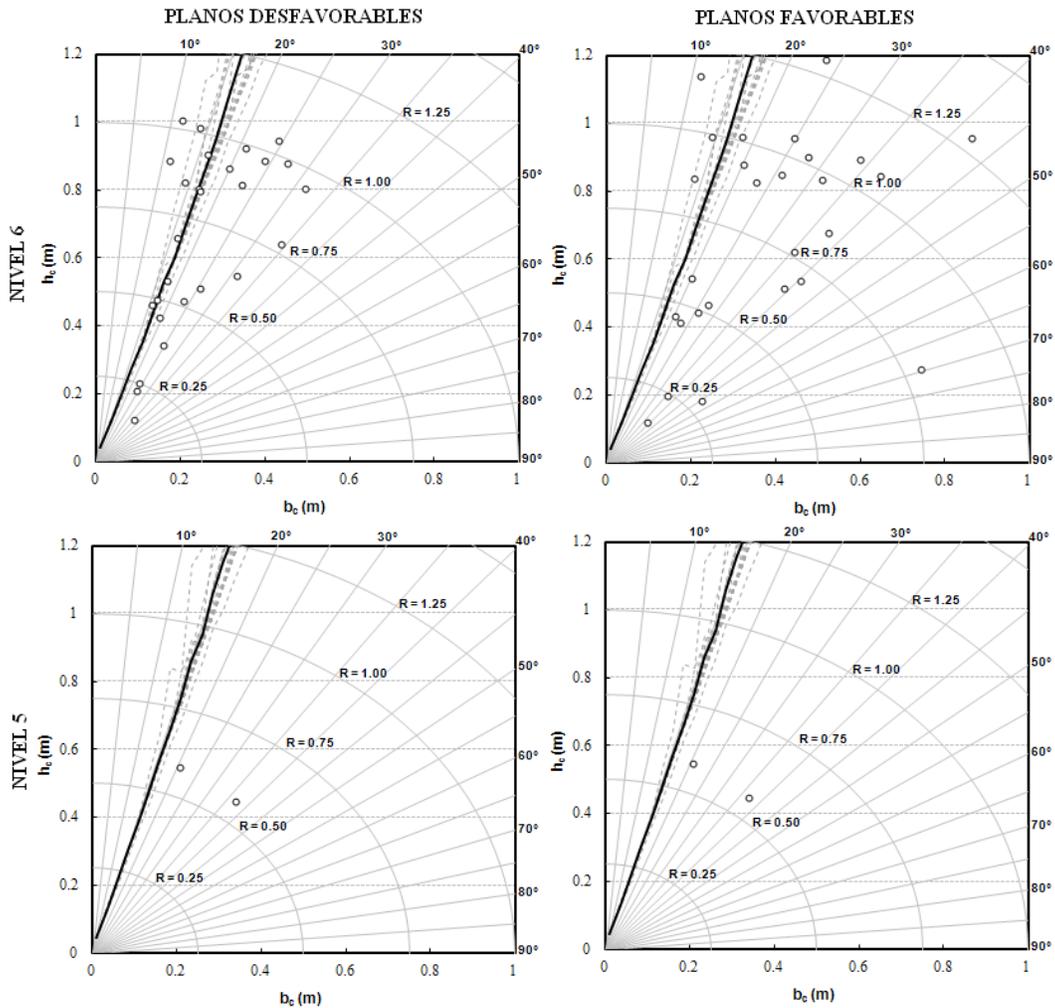


Figura 4.21 Gráficas h_c vs b_c del Museo Soumaya para un periodo de retorno de 125 años

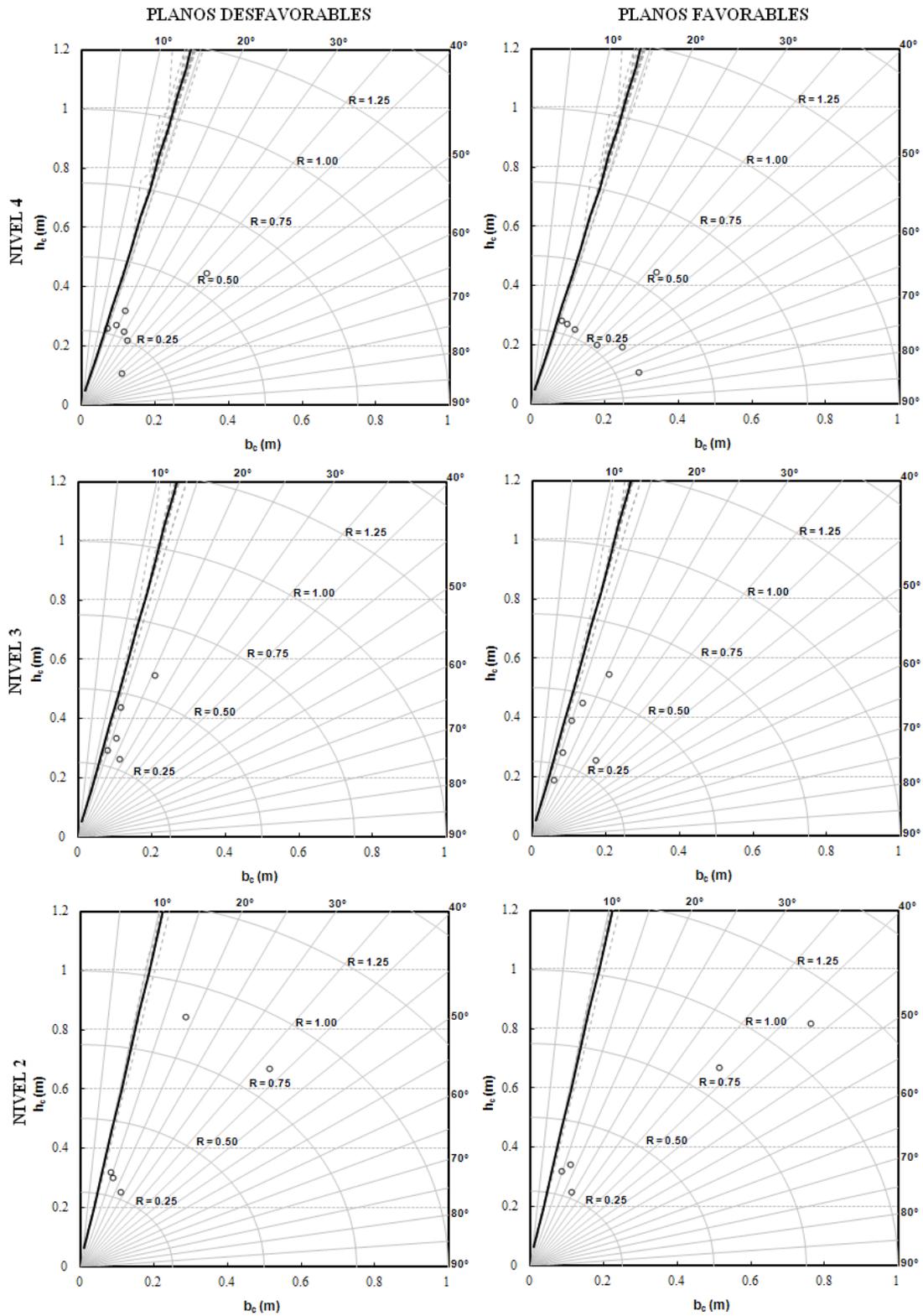


Figura 4.21 (Continuación)

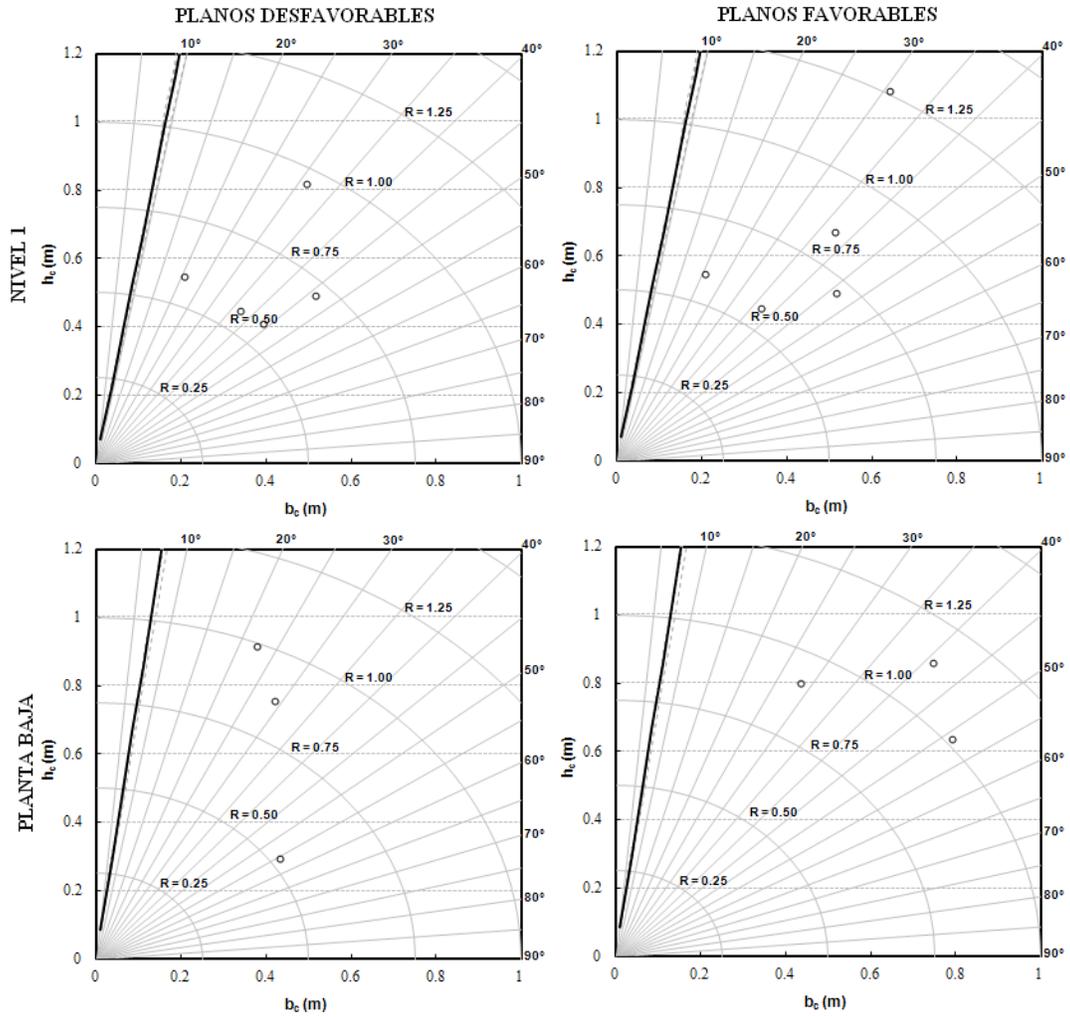


Figura 4.21 (Continuación)

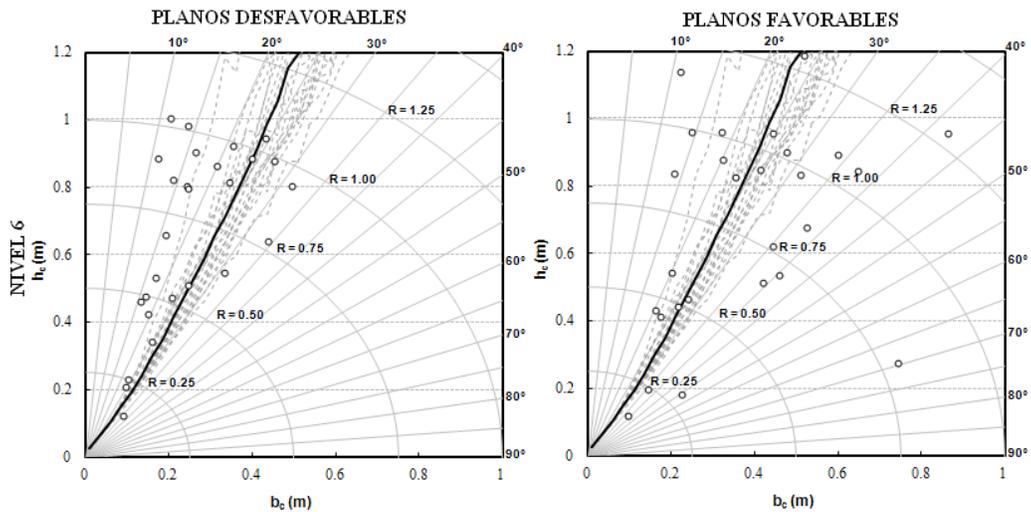


Figura 4.22 Gráficas h_c vs b_c del Museo Soumaya para un periodo de retorno de 475 años

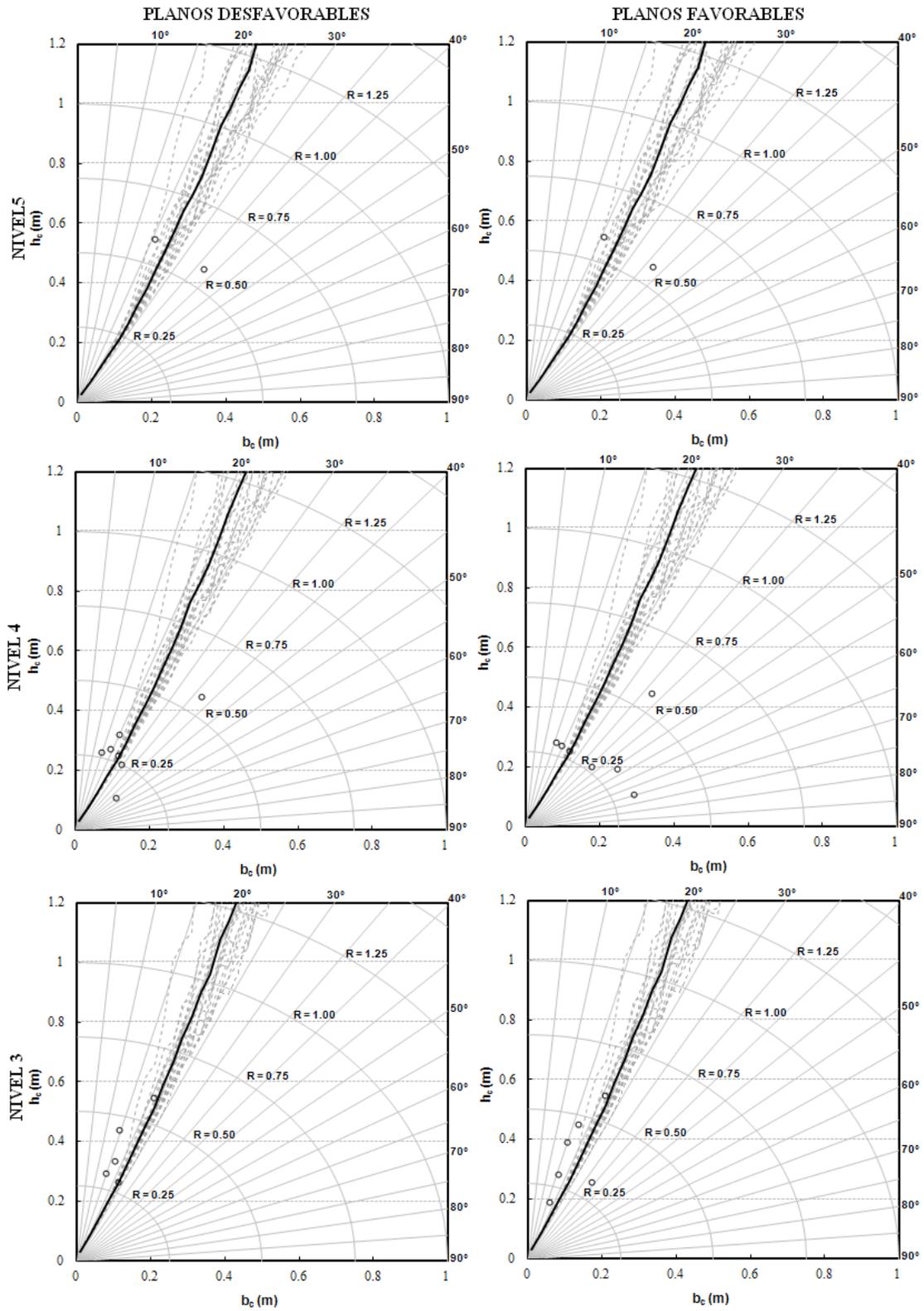


Figura 4.22 (Continuación)

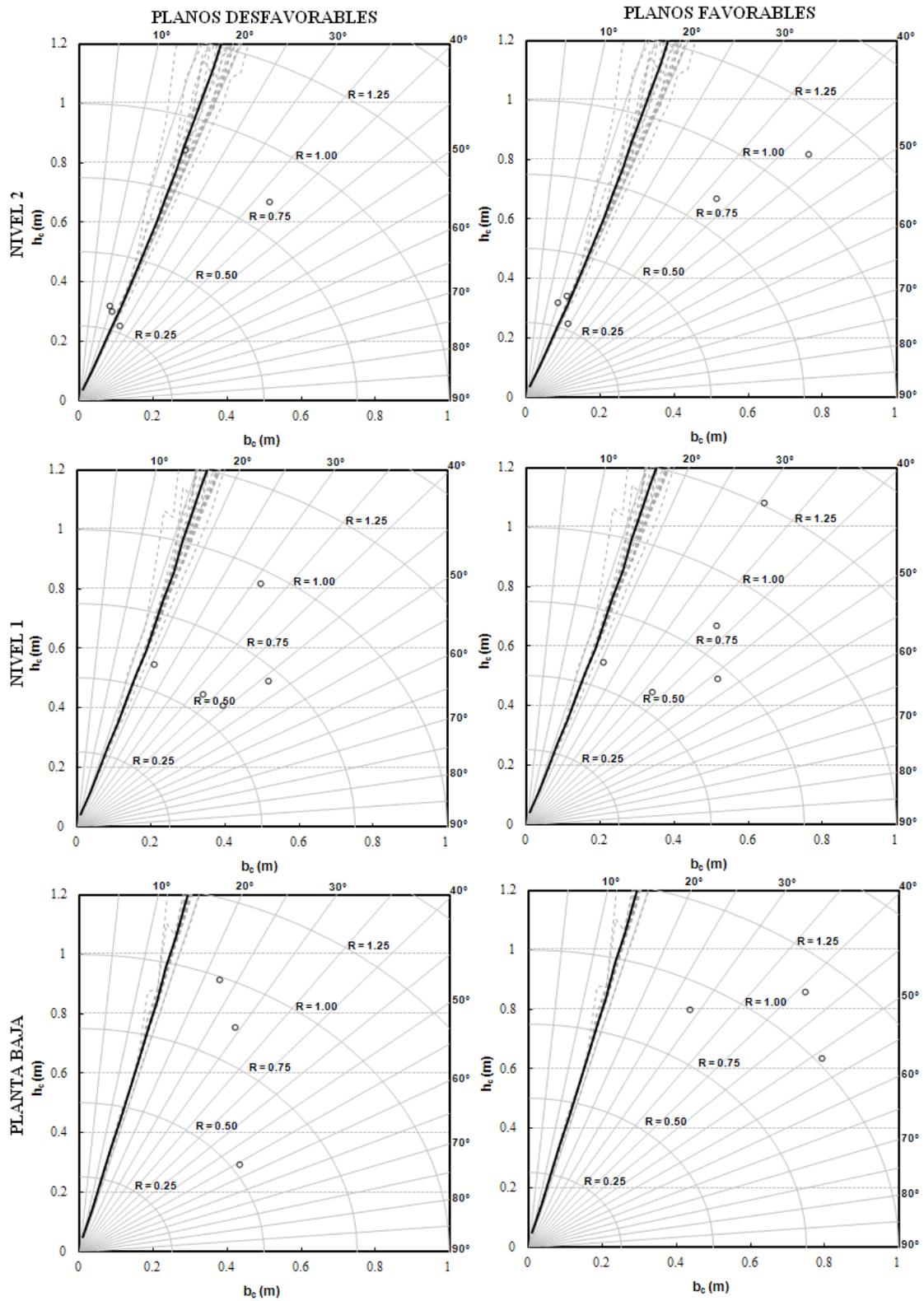


Figura 4.22 (Continuación)

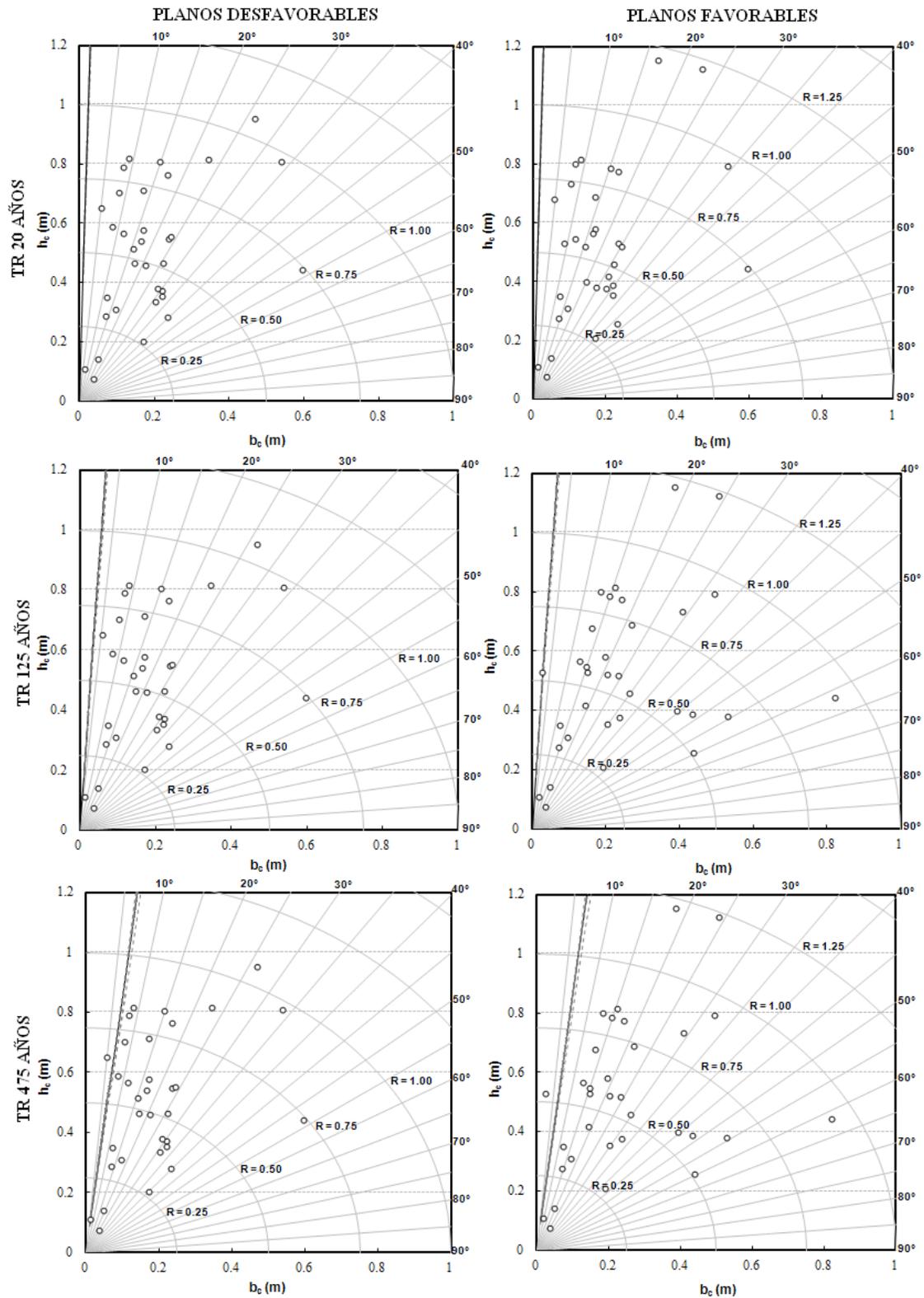


Figura 4.23 Gráficas h_c vs b_c del Museo Nacional de Antropología para periodos de retorno de 20, 125 y 475 años

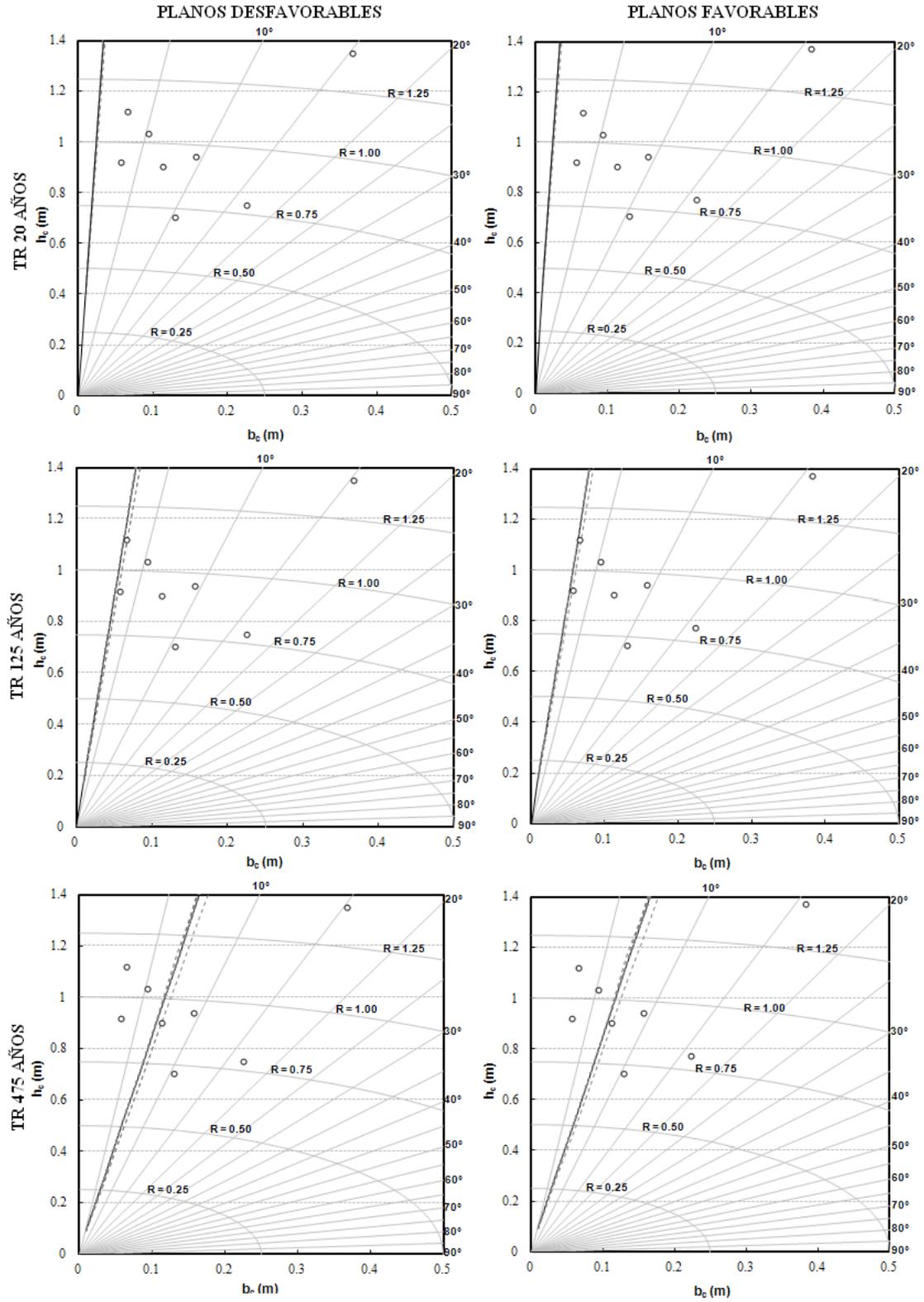


Figura 4.24 Gráficas h_c vs b_c de los objetos ubicados en el IINGEN para periodos de retorno de 20, 125 y 475 años

Como se puede ver este tipo de gráfico, es más fácil identificar que objetos son susceptibles a volcarse con una aceleración dada, lo cual en la práctica es lo usual, es decir, las edificaciones se diseñan para resistir una cierta aceleración del suelo, y obteniendo la línea límite de falla correspondiente a esta aceleración, se podrán tomar las medidas correspondientes para salvaguardar sus contenidos.

4.4 Modelo con regresión no lineal

Para poder obtener las curvas h_c vs b_c sin necesidad de hacer una simulación o utilizar un programa específico, se puede proceder de la misma manera que en el capítulo anterior, esto es, a través de regresiones no lineales que se adapten al comportamiento de los datos obtenidos de las simulaciones previas.

Para lograr esto se procede de la siguiente forma:

Para definir una función que tenga como variable dependiente a h_c y variable independiente a b_c , se propone un factor que está definido como:

$$f_2 = \frac{b_c}{y_f} \quad (4.15)$$

Donde f_2 es un factor que relaciona la dimensión b_c (m) de la base del objeto y su aceleración mínima de falla y_f (m/s^2), estos datos son obtenidos de los resultados anteriormente mostrados.

El comportamiento de este factor en relación con la dimensión h_c tiene una tendencia creciente que se muestra en la siguiente figura.

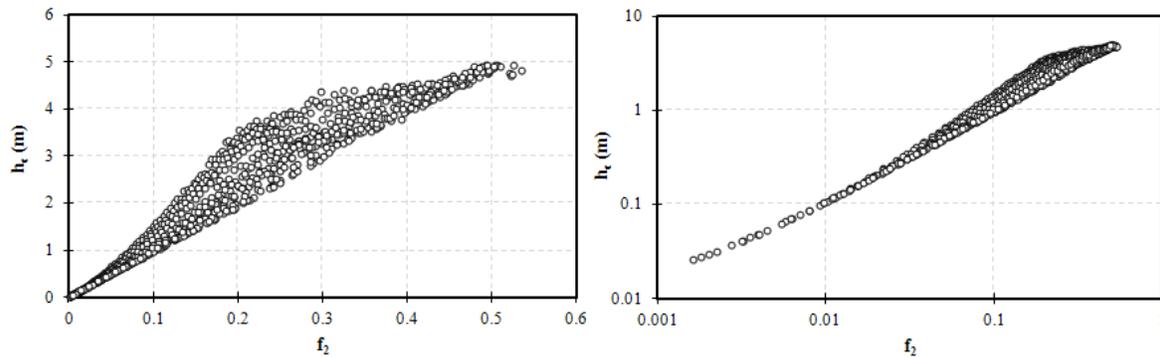


Figura 5.25 Comportamiento del factor f_2 en relación con h_c , en escala decimal (izquierda) y escala log log (derecha)

Como se puede ver en la figura 4.25 existe una relación creciente y directamente proporcional entre estos dos datos, lo cual nos permite realizar una regresión no lineal para obtener una curva de ajuste a los datos mostrados.

En la figura 4.26 se puede observar esta curva de ajuste.

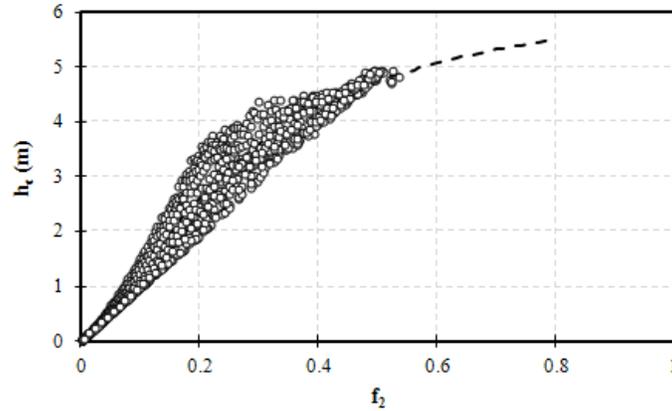


Figura 4.26 Comportamiento del factor f_2 en relación con h_c , (marcadores circulares) y la curva de ajuste correspondiente (línea discontinua)

Esta curva de ajuste se obtuvo con el programa *curve Expert*, dando como resultado la ecuación (4.16), la cual posee un factor de correlación de 0.94.

$$h_c = \frac{6.544}{1 + \left[\frac{f_2}{0.2638} \right]^{-1.504}} \quad (4.16)$$

Sustituyendo la ecuación (4.15) en la (4.16) tenemos lo siguiente:

$$h_c = \frac{6.544}{1 + \left[\frac{b_c / y_f}{0.2638} \right]^{-1.504}} \quad (4.17)$$

La ecuación (4.17) nos permite realizar curvas de susceptibilidad de vuelco sin la necesidad de una simulación o de un programa específico, haciendo más sencillo la estimación de esta susceptibilidad, siendo y_f un parámetro definido por la aceleración pico esperada en el sitio.

En la figura 4.27 se pueden observar la comparación de esta regresión con las curvas obtenidas de la simulación del movimiento.

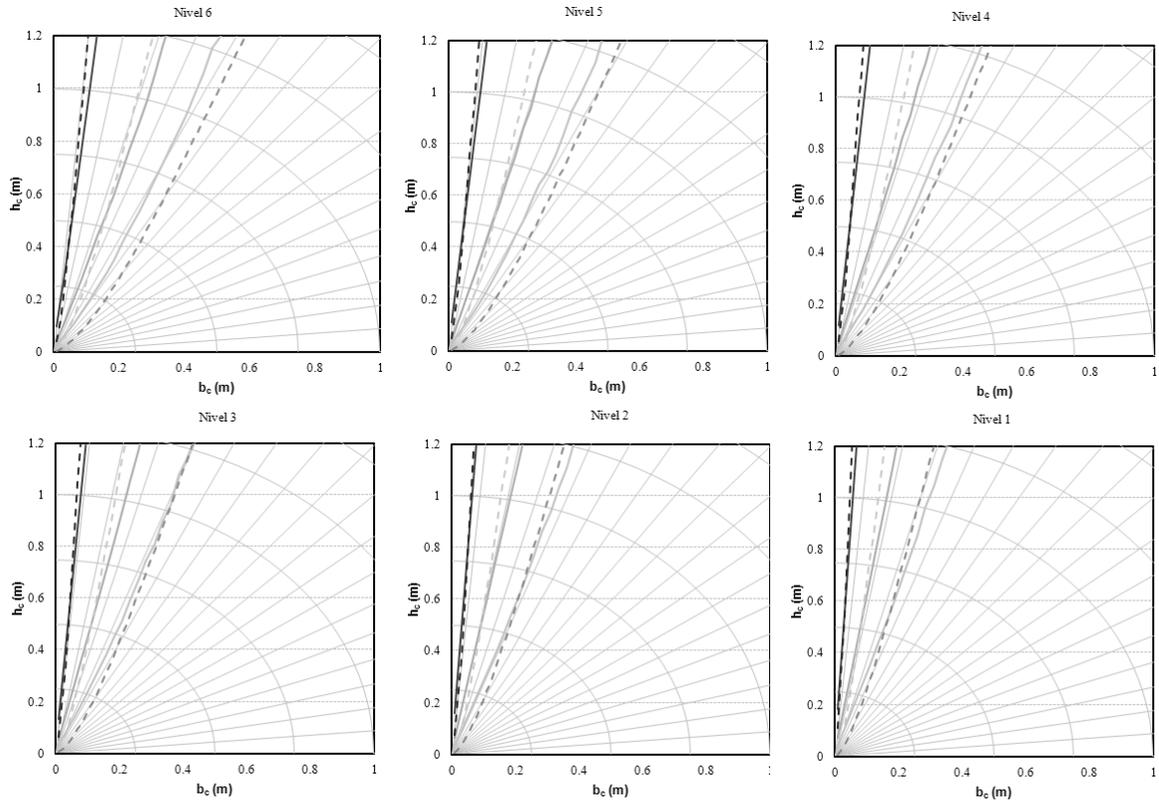


Figura 4.27 Comparación de curvas h_c vs b_c obtenidas con simulación (línea continua) y calculadas con la ecuación 4.17 (línea discontinua), para seis niveles y tres periodos de retorno

Como se puede observar en la figura 4.27 las líneas de límite de falla calculadas con la ecuación 4.17 se asemejan mucho a las obtenidas con la simulación, también se puede observar que para aceleraciones relativamente grandes, la variación aumenta poco.

Como se vio en este capítulo es posible estimar la susceptibilidad de vuelco de un objeto ante la aceleración de un sismo, previamente definida, por una simulación y con las ecuaciones deducidas en este capítulo.

CAPITULO 5

Discusión de metodologías

Anteriormente se analizaron dos métodos para estimar la probabilidad o el riesgo que tiene un objeto a volcarse al sufrir los efectos de un movimiento sísmico.

El primer método se analizó en el capítulo 4, el cual parte de una simulación del movimiento sísmico, como se explicó anteriormente en este método se simuló los 19 registros sísmicos que se utilizaron para este estudio, los cuales se fueron escalando desde una aceleración 0 hasta la mínima de falla para el objeto, en intervalos pequeños, para conocer la aceleración que necesitaría dicho sismo para volcar el objeto. Este método se repite para los 19 registros y para cada uno de los objetos de estudio, obteniendo curvas de probabilidad de vuelco particulares para cada uno. Este método es muy bueno para conocer la probabilidad que tiene un objeto en particular de volcarse en función de la aceleración a la que sea sometido. Otra virtud de este método, como se vio, es que podríamos conocer los posibles costos que tendrían una eventual reparación o reposición también en función de la aceleración a la que es sometido dicho objeto. Sin embargo, en la práctica se le da una mayor importancia al diseño de la estructura que contendrá dichos objetos, y con razón, el colapso de alguna estructura podría causar más fatalidades que la caída de los objetos que contiene.

El segundo método analizado en el capítulo 5, nos da otra perspectiva, las edificaciones se diseñan para una aceleración en particular, que depende del periodo de la estructura misma y del espectro de diseño que impera en la zona donde se construirá, tomando en cuenta esto, a diferencia del primer método, se plantea una aceleración fija, a la cual se someterán varios objetos de dimensiones variables entre sí, es decir, en este caso se simulan los 19 registros sísmicos por separado, escalados a una aceleración objetivo, el cálculo de esta aceleración se muestra en el capítulo 5. Una vez simulados los sismos escalados se registran las dimensiones de los objetos que cayeron y como resultado se puede trazar un gráfico que relacione las dimensiones de los objetos que fallaron. Este método es muy práctico para tener una idea de los objetos susceptibles a volcarse bajo una aceleración dada, sin embargo, no refleja un valor de probabilidad de falla, a diferencia del primer método, además de que los objetos que son sometidos a las historias de los sismos registrados, son prismas rectangulares, es decir objetos regulares, a diferencia de los contenidos de los museos, que en su mayoría son totalmente irregulares, aun así suponer a todos los objetos como objetos regulares es lo más conveniente en este método, debido a la gran cantidad en formas que una edificación pudiera contener.

Como se puede ver ambos métodos proporcionan información relevante que puede ser tomada en cuenta al diseñar una edificación o en su defecto el interior de la misma, pero también se observa que por sí solos están un tanto sesgados. Para solucionar este problema en este capítulo se propone una relación que permita ir de un método al otro y así unificarlos.

5.1 Análisis de curvas h_c vs b_c

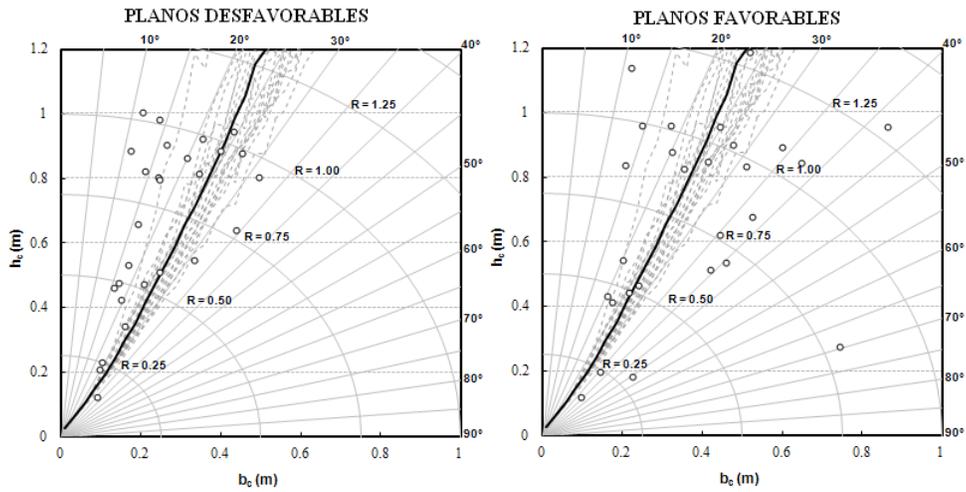


Figura 5.1 Curvas h_c vs b_c

Haciendo una relación de esbeltez de los objetos que caen bajo la acción de aceleración dada se observa que el comportamiento es el siguiente.

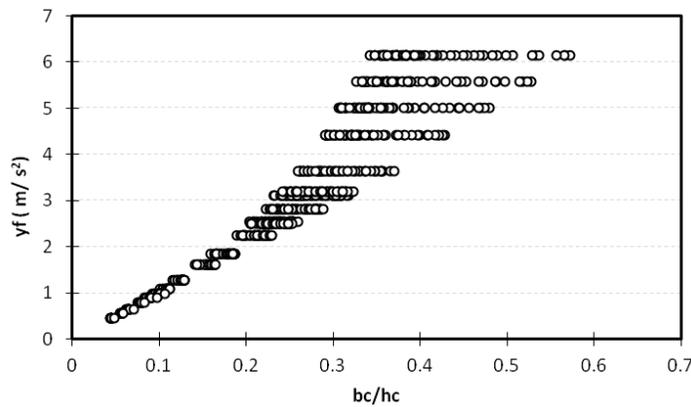


Figura 5.2 Comportamiento de la relación de esbeltez vs la aceleración de falla

Como se puede observar en la figura 5.2 la variación de la relación de esbeltez (h_c / b_c) tiene una variación creciente y directamente proporcional, es decir, para relaciones de esbeltez altas se necesita una aceleración mayor para volcarlos. También se observa que la dispersión de los datos aumenta con la aceleración de falla.

Obteniendo el valor medio de estos puntos se puede tener una relación más específica que describa el comportamiento de estos parámetros.

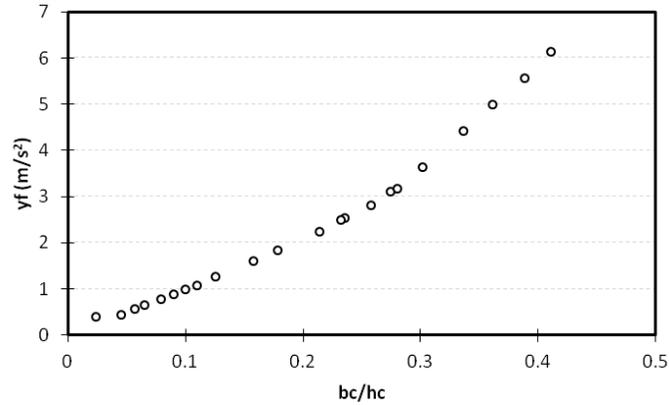


Figura 5.3 Comportamiento de la relación de esbeltez vs la aceleración de falla (valores medios)

Anteriormente en el capítulo 3, el comportamiento de las esculturas se compara con el de objetos regulares utilizando el mismo método, sí se grafica el comportamiento de los mismos parámetros mencionados anteriormente se observa un comportamiento similar.

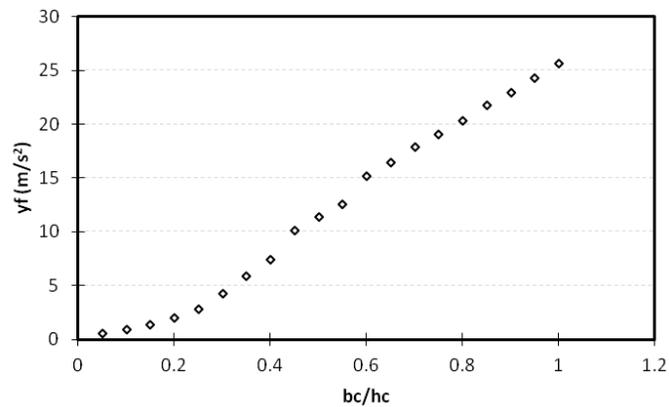


Figura 5.4 Comportamiento de la relación de esbeltez vs la aceleración de falla de los objetos regulares vistos en el capítulo 3

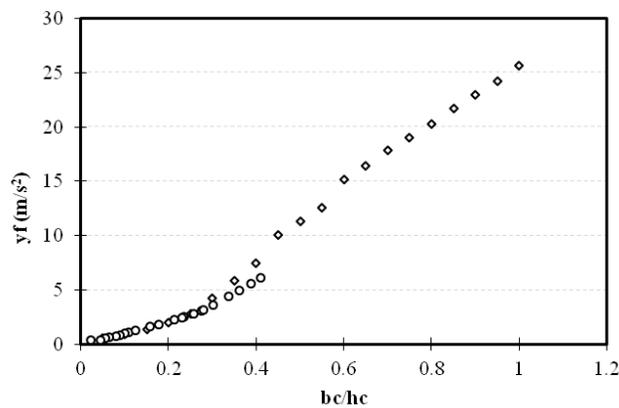


Figura 5.5 Superposición de los comportamientos observados para ambos conjuntos de objetos

En la figura 5.5 se puede apreciar que el comportamiento de los objetos sujetos a aceleraciones dadas (capítulo 4), es similar al de los objetos sometidos a aceleraciones variables (capítulo 3), lo cual nos permite inferir que existe una relación entre ambos métodos.

En el capítulo 3 se observó que la probabilidad de vuelco de una escultura u objeto irregular no solo dependía de su relación de esbeltez, sino que también de otros parámetros tales como la distancia del centroide al punto extremo de la base más cercano, llamado R y de la frecuencia Rathje llamada w . Sin embargo en los objetos regulares como los mostrados en las figuras anteriores, el parámetro de esbeltez está directamente relacionado con la aceleración de falla.

Para verificar lo anterior dicho, se aplicó el método propuesto por Jaimes et al visto anteriormente a objetos con la misma relación de aspecto, pero diferente parámetro R , y calculando la curva de probabilidad de falla correspondiente de cada uno de estos objetos, se observó que la diferencia entre cada una de ellas es mínima, prácticamente es la misma curva. La figura 5.6 muestra lo anterior mencionado.

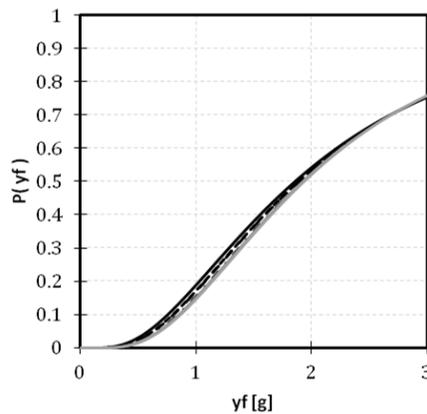


Figura 5.6 Curva de probabilidad de vuelco para objetos con la misma relación de esbeltez pero diferente parámetro R

La figura 5.6 presenta curvas de probabilidad de vuelco para relaciones de esbeltez constante pero diferente parámetro R , esto muestra que este parámetro no tiene una influencia significativa en la probabilidad que tiene un objeto de volcarse.

Basados en esto podemos asumir que en objetos regulares, en función de su geometría, los parámetros h_c y b_c son los que determinan un posible vuelco.

Utilizando objetos regulares se puede encontrar una relación que permita ir de un método a otro con una ecuación y así poder conocer tanto la probabilidad de vuelco de un objeto determinado y a la vez poder conocer las dimensiones que tendrían los objetos que se volcarían bajo una aceleración dada.

5.2 Relación entre ambos métodos

A partir de los gráficos y comparaciones anteriores, se hizo una regresión no lineal para obtener una curva que se adaptara al comportamiento de la aceleración de falla y la relación de esbeltez.

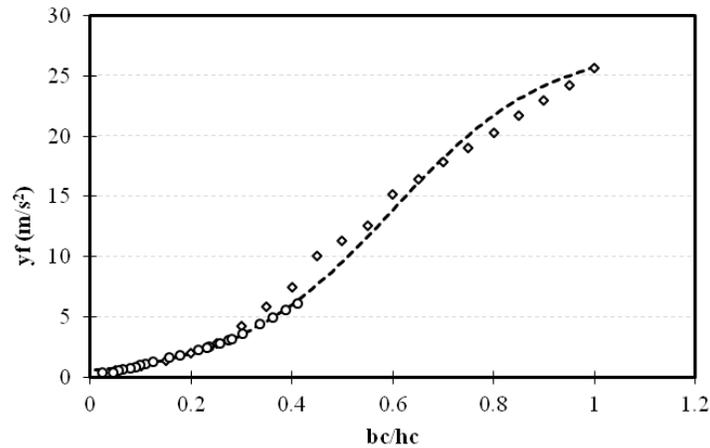


Figura 5.7 Resultado de la regresión no lineal al comportamiento de los parámetros de forma y aceleración mínima de falla

En la figura 5.7 se observa la línea de ajuste a los puntos mostrados, se puede ver que para valores de aceleración menores a los 5 m/s² se ajusta perfectamente, para aceleraciones mayores se desvía un poco, aun así el factor de correlación es superior a 0.9.

La ecuación de esta curva de ajuste es la siguiente:

$$y_f = \frac{27.623}{1 + 47.57e^{-6.455b_c/h_c}} \quad (5.1)$$

En donde y_f es la aceleración mínima de falla, b_c y h_c son la distancia del centroide al extremo más cercano en la dirección horizontal, y la altura de la base al centroide respectivamente.

En las graficas h_c vs b_c , son funciones que tienen como variable dependiente a h_c e independiente a b_c , la ecuación (5.1) reacomodada queda de la siguiente manera.

$$h_c = \frac{-6.455b_c}{\ln \left[\frac{\left(\frac{27.623}{y_f} - 1 \right)}{47.57} \right]} \quad (5.2)$$

La ecuación (5.2) nos permite fabricar curvas h_c vs b_c para diferentes aceleraciones esperadas, ya sea en el suelo o en entresijos.

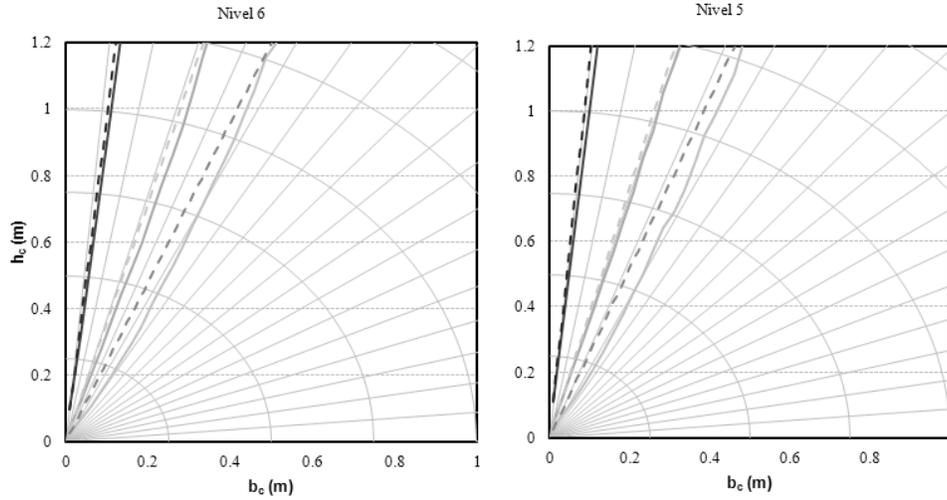


Figura 5.8 Se presenta en línea continua la línea límite de falla obtenida de la simulación y en línea punteada la obtenida con la regresión no lineal (ecuación 5.2).

De la misma manera utilizando la ecuación (5.1) se pueden graficar curvas de probabilidad de vuelco en función de la geometría, de la misma manera vista en el capítulo 3, estas ecuaciones se modifican debido a que el factor f , al tratarse de objetos regulares se simplifica, es decir, el factor f_2 solo depende del factor de esbeltez, lo cual hace que el resultado varíe.

Así de esta forma las ecuaciones que permiten crear curvas de probabilidad de vuelco a partir de las curvas h_c vs b_c son las siguientes:

$$\mu_{\ln y_f} = \ln(y_f) \tag{5.3}$$

Donde y_f es la aceleración mínima de falla obtenida con la ecuación (5.1) y:

$$\sigma_{\ln y_f} = \frac{6.17\left(\frac{b_c}{h_c}\right) - 0.5369}{1 + 0.9379\left(\frac{b_c}{h_c}\right) + 0.8965\left(\frac{b_c}{h_c}\right)^2} \left(\frac{1}{\mu_{\ln y_f}}\right) \tag{5.4}$$

Como se puede ver estas ecuaciones son diferentes a las obtenidas en el capítulo 3, esto es debido al cambio de parámetros que las definen, sin embargo el resultado es el mismo. Si observamos la figura 5.9, se puede observar que las curvas de probabilidad de vuelco son muy parecidas a las obtenidas con el proceso de simulación.

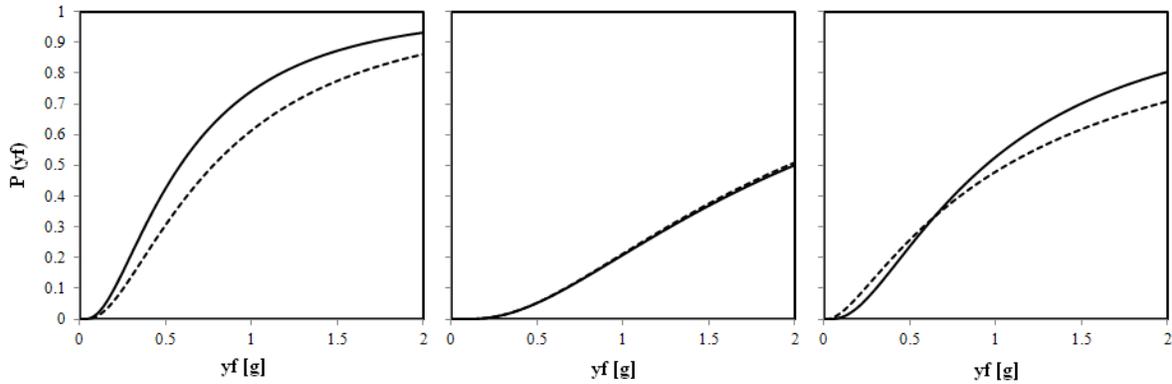


Figura 5.9 Curvas de probabilidad de vuelco de objetos regulares, obtenidas con simulación (línea continua) y obtenidas con las ecuaciones (5.3) y (5.4) (línea discontinua)

Estas tres ecuaciones en conjunto nos permiten trasladarnos de un método al otro de un modo rápido y sencillo, dándonos una certeza de más del 90%, utilizando solo dimensiones medibles directamente sobre el objeto. Sin embargo como se menciona anteriormente se encuentran limitadas a su uso solo en objetos regulares. Para conocer la probabilidad de vuelco de objetos más complejos se recomienda utilizar las ecuaciones obtenidas en el capítulo 3 de la presente tesis, que al involucrar más parámetros son más precisas en su cálculo.

Capítulo 6.

Conclusiones

Como se observó en este trabajo de tesis, existen muchos riesgos durante la ocurrencia de un sismo, que involucran la pérdida de vidas y la pérdida de bienes materiales.

En este caso las pérdidas materiales fueron el caso de estudio, de estas probablemente los contenidos que pudiera tener un museo o una galería son los más costosos y como se menciona anteriormente pueden rebasar el costo del mismo edificio. Existen muchos casos alrededor del mundo en el que mucho del acervo cultural y artístico de la humanidad ha sido dañado por las consecuencias de un movimiento sísmico. En muchos de estos casos las pérdidas fueron irrecuperables o repararlas fue muy costoso para el gobierno de los países que sufrieron estos fenómenos. Sin embargo actualmente las compañías de seguros ofrecen primas que involucran los sismos, desde pérdidas materiales dentro del edificio en cuestión hasta daños o colapso de una edificación. El costo de estas primas en el caso de los contenidos de las edificaciones, por lo general se basan en el costo del objeto propio y la zona sísmica donde se encuentra la edificación que lo contiene, sin embargo como se observo en este estudio, cada objeto se comporta diferente ante un evento sísmico, y la geometría del mismo es el parámetro medular de este comportamiento, además de la aceleración máxima que produce el sismo.

Para hacer el estudio se debe acudir personalmente al sitio, en este caso ambos museos, para hacer un levantamiento del inventario que posee cada uno, así como de las características estructurales del mismo que se puedan observar a simple vista, esta información se vacía en los formatos incluidos en el capítulo 2. Para cada objeto se definieron dos áreas significativas para el estudio, las cuales se definieron como *Área favorable* y *área desfavorable*, basándose en la susceptibilidad observada a simple vista que un objeto pudiera volcar en cierta dirección, más adelante se conocería si en verdad esa área era favorable o desfavorable a la estabilidad del objeto. Respecto a la información necesaria de cada objeto están las dimensiones de la base del objeto y la altura del mismo, el material del que está hecho, el autor, y el material de la base sobre la que esta puesto el objeto. Como conclusión de esta primera etapa se conoció que en el caso del museo Soumaya las esculturas más representativas son de bronce y de los autores Rodín y Dalí, las cuales se encuentran en el 6to nivel, y en el caso del museo Nacional de Antropología la cerámica y la roca como materiales predominantes, además de que los autores son anónimos personalmente pero se les asigna el nombre de la cultura a la cual pertenecieron. A través del programa *Autocad* y el programa *Excel* se calcularon las propiedades geométricas necesarias para el estudio, tales como las dimensiones de b_c , h_c , R , y C , entre otras, las cuales se definen en el capítulo 3. Para conocer el comportamiento de los objetos bajo la acción de un sismo se recopiló información de la estación CU, obteniendo un total de 19 registros para el estudio. Se observó que en el caso de estos museos el 100% de su inventario de exhibición son figuras irregulares y de un solo material, es decir, son homogéneas.

Los costos que pudieran tener los objetos que se encuentran en exhibición de un museo pueden ser muy variados pero casi siempre elevados, como se observó en el capítulo 3, el costo de una escultura o cuadro depende del autor que realizó la obra, además de la época en la que vivió, la técnica que utilizó y el número de piezas que produjo, entre otros aspectos. Para poder cuantificar estos aspectos hay que ser un experto en historia del arte y tener un amplio recorrido por galerías y subastas de arte alrededor del mundo. Es por eso que se propone un método cuantitativo que permita estimar el costo que pudieran tener las obras de arte. Este método está basado en la geometría del objeto del cual se quiera conocer su costo, el parámetro geométrico utilizado es el área del objeto que si bien se adapta muy bien al análisis de cuadros, las esculturas al ser objetos tridimensionales pueden tener una infinidad de áreas posibles. En este caso se eligieron las dos áreas definidas anteriormente al ser las más representativas para el estudio, utilizando un valor medio entre ambas. Si bien una unidad de volumen sería más apropiada, por políticas de los museos mismos, es difícil tener acceso directo a las esculturas y poder calcular su volumen. Así bien se puede obtener una unidad de costo por unidad de área. Como se menciona, el costo de una obra de arte depende del autor que la realiza y por tanto los contenidos tendrán un costo diferente en función del autor también, al ser un museo existen muchos contenidos de diferentes autores así que se optó por analizar solo a los autores más representativos de los museos en estudio. Como resultado del estudio se obtuvieron curvas de tendencia de costos en función de las dimensiones de la obra para cada autor, basados en datos de casas de subastas. Estas ecuaciones solo son para estimar un costo aproximado, además de que el mercado del arte siempre está en constante cambio, así que las mismas solo son útiles para el momento de esta investigación, sin embargo el método podría ser válido, dependiendo de la certeza que se desee tener.

Un sismo puede provocar que un objeto vuelque sobre los extremos de la base sobre la cual reposa llamada b_c , y muchas veces se puede esperar o suponer que objetos pudieran volcarse ante un evento de esta naturaleza, pero puede quedar como una mera especulación. Un valor numérico de esta suposición de vuelco de un objeto, es la probabilidad de vuelco que como se vio en el capítulo 4 depende principalmente de la geometría del objeto en cuestión y de la aceleración de suelo. Para obtener esta probabilidad se utilizó el método propuesto por *Reinoso et al (2009)*, el cual, como se menciona, parte de la simulación de sismos registrados escalados a intensidades diferentes, obteniendo las aceleraciones pico del suelo a los cuales los objetos en cuestión se volcaban y a partir de estos datos se pudieron realizar curvas de probabilidad de vuelco para cada uno de estos contenidos. Sin embargo una forma más sencilla de obtenerlas, sería a través de una ecuación. En este mismo capítulo se obtuvieron estas ecuaciones, en las que se observó que el comportamiento de estos objetos (esculturas), al ser de una forma totalmente irregular, no solo dependía de las dimensiones de la base y de la altura, sino de otros parámetros tales como la frecuencia de Rathje y del radio del objeto, que relacionado con la aceleración de la gravedad, influye directamente en la probabilidad de vuelco del mismo. Estas ecuaciones nos proporcionan los parámetros necesarios para graficar estas curvas de probabilidad con una distribución lognormal, así conociendo o deduciendo los parámetros geométricos y sísmicos podemos, conocer la probabilidad que tiene un objeto de volcarse cuando la aceleración del suelo va en aumento. Sin embargo aunque la correlación entre lo observado y lo calculado es alta, siempre será necesario tener un factor de seguridad en función del criterio del asegurador y/o propietario del objeto en cuestión. También se observó que no solo basta con conocer si un objeto se vuelca o no, estas pérdidas tienen una unidad de medida, la cual es el dinero, este dinero puede ser utilizado para una eventual reparación o

reposición después de una caída y como se menciona anteriormente una escultura o pieza de arte la mayoría de las veces es costosa. Las esculturas pueden estar hechas de diversos materiales lo cual hace que su fragilidad sea diferente y por tanto su propensión al daño también, se observó que los materiales predominantes en los museos analizados van desde cerámica y vidrio hasta roca y bronce lo cual muestra una gama de fragilidades muy variada, estas fragilidades son medidas desde 0 a 1, siendo 0 un material muy resistente y 1 uno muy frágil, estas clasificaciones fueron obtenidas de la organización ISO. Así conociendo el costo de la escultura en relación al total de la muestra analizada y la fragilidad de la misma se pueden graficar curvas de probabilidad de costo ante una posible caída, lo cual ya es una medida más práctica para aseguradores, gobiernos que podrían planificar y asignar mejor los recursos para fondos contra contingencias de este tipo o equipos que se encarguen de la seguridad de estas piezas.

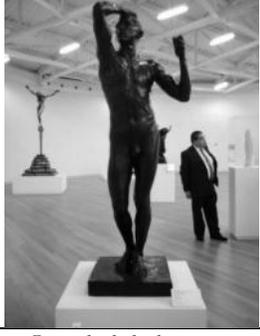
Otra forma de estudiar el riesgo que tiene un objeto a volcarse, a diferencia de lo visto en el capítulo 4, en el cual parten de la geometría del objeto y aceleraciones pico variables, es obtener una aceleración de diseño o aceleración pico esperada en el sitio, que converge con los métodos de diseño utilizados actualmente, en el cual se diseñan las estructuras para resistir una aceleración dada. Para obtener esta aceleración se utilizó el método *PSHA*, el cual se define en el capítulo 5, este método que parte de un análisis estadístico arroja que las aceleraciones pico esperadas para un periodo determinado de 20, 125 y 425 años serían de 0.40, 1.15 y 2.27 m/s^2 respectivamente. Un fenómeno importante que se presenta en las estructuras de más de un nivel es la amplificación de la aceleración que se presenta en los pisos superiores respecto a la que se presenta en el suelo. Como se vio el profesor Miranda establece una forma de conocer esa relación, como resultado, esta amplificación la aceleración se ve plasmada en un gráfico que relaciona el factor de amplificación con la altura relativa a la altura total del edificio. Este factor correspondiente a una altura de entrepiso definida multiplica a la aceleración del suelo, obteniendo la aceleración que sufre ese piso en particular. Esto es muy importante ya que la posible caída de un objeto, como se dijo anteriormente, depende también de la aceleración a la que es sometida. Una vez obtenido esto los registros sísmicos se escalaron a estas nuevas aceleraciones, para poder someter objetos de dimensiones conocidas a estas, a diferencia del método visto en el capítulo 4, aquí la aceleración no es la que varía, sino las dimensiones de los objetos, obteniendo como resultado gráficos que expresan las dimensiones que tuvieron los objetos que se volcaron con tal aceleración, para después obtener líneas límite de falla ante una aceleración dada. Al estudiar su comportamiento y hallar relaciones entre los parámetros se pudo obtener una ecuación, que al igual que las obtenidas en el capítulo 4, sirve para poder fabricar estas gráficas sin necesidad de simulación o de un programa de computadora. Sin embargo estos resultados están sesgados a objetos que a diferencia de las esculturas, son de forma regular, pero nos da una aproximación de la susceptibilidad de vuelco que a diferencia de la probabilidad no arroja un valor numérico o medible.

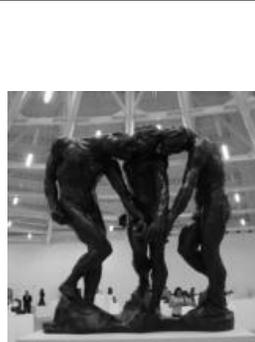
Por eso comparar ambos métodos es importante para tener un punto de equilibrio entre los dos, si bien hallar esta relación, puede bajar el nivel de confianza de las ecuaciones presentadas en los capítulos anteriores, puede ser necesaria. Al tener diferentes parámetros entre ambos métodos los factores las ecuaciones se modifican respecto a las obtenidas en los capítulos anteriores sin embargo los resultados son los mismos. Estas ecuaciones permiten obtener curvas de susceptibilidad de vuelco así como de probabilidad de vuelco de objetos regulares.

Sin duda estas ecuaciones podrían utilizarse para cualquier tipo de edificación, pero tomando en cuenta las consideraciones correspondientes, tales como, que el estudio se hizo con objetos de materiales homogéneos. En conclusión las ecuaciones obtenidas en este trabajo de tesis predicen, basados en el comportamiento observado de los objetos ante un evento sísmico, que objetos pueden volcar con una aceleración determinada, así como la probabilidad que existe de que suceda, sin embargo estas ecuaciones al ser empíricas tienen un grado de confiabilidad, que aun siendo superior al 90%, posee pocos casos en que las diferencias con la realidad podrían ser significativas, esto significa que en el futuro se deberán seguir haciendo investigaciones para tener una mayor certeza en describir el comportamiento aquí presentado, ya que de ello dependerá, en primera instancia, minimizar el número de víctimas en sismos, debido a la caída de objetos, y como segunda instancia poder salvaguardar las pertenencias de la población.

Anexo A

Inventario analizado en los museos de estudio

			
Alicia en el país de las maravillas	Andrieu de Andrés	Angel triunfante	Apolo y Dafne
			
Balzac con habito	Cabeza colosal de Pierre	Cristo de San Juan	El amor secreto
			
El atleta	El genio de la danza	El vals secreto	Elefante espacial
			
Eustache de Saint Pierre	Gabinete antropomórfico	Jean de Fiennes	La edad de bronce

			
La mujer en llamas	La mujer jirafa	La plegaria	La puerta del infierno
			
Los luchadores	Montado por el tiempo	Newton surrealista	Perseo
			
Ugolino y sus hijos	Vitrina 2	Vitrina 3	Vitrina 4
			
Vitrina 5	Busto Madame Renoir	Caminando	Maternidad

			
Mujer arreglándose el cabello	Mujer recostada	Venus triunfante	Juan el bautista
			
La dolorosa	Lámpara con alegoría a la paternidad	San José con el niño	San Luis Gonzaga
			
Busto Renoir	La edad de bronce	Niño pasionario	Portapapeles
			
Monedas de la historia	El pensador	Laocoonte y sus hijos	La piedad

			
Ahuizotl	Atlante mexicana	Atlante maya	Cabeza colosal
			
Chacmol	Chacmol de Patzcuaro	Coatlicue A	Coatlicue B
			
Códice maya	Dios Cocijo	Dios del Agua	Dios Dos Conejo
			
Diosa Cihuateteo	Diosa con mascara	Diosa generadora de la vid	Escultura antropomórfica

			
Escultura en piedra	Escultura mexicana	Estela de Acapulco	Guerrero águila
			
Jarrón 1	Jarrón 2	Jarrón 3	Mascara prehispánica
			
Ocelote	Personaje de la nobleza	Representación de Quetzalcóatl	Sacerdote maya
			
Sacerdote mexicana	Serpiente emplumada	Trono zoomorfo	Xipe

			
Busto Hiriart Balderrama	Escultura 1	Escultura 2	Escultura 3
			
Escultura 4	Escultura 5	Escultura 6	Escultura Torre

Tabla A 1.1 Resumen de información obtenida en visita al Museo Soumaya I

MUSEO SOUMAYA						
PLANO FAVORABLE						
ID	[NIVEL]	OBJETO	MATERIAL	BASE [m]	ALTURA [m]	AUTOR
1	6	Alicia en el país de las maravillas	Bronce	0.92	2.00	Dalí
2		Andrieu de Andrés	Bronce	1.20	2.00	Rodín
3		Ángel triunfante	Bronce	0.71	1.90	Dalí
4		Apolo y Dafne	Mármol	0.43	1.05	Bernini
5		Bailarina Daliniana	Bronce	1.05	1.70	Dalí
6		Balzac con habito de monje	Bronce	0.48	1.10	Boulangier
7		Cabeza colosal de Pierre	Bronce	0.35	0.80	Rodín
8		Cristo de San Juan	Bronce	0.95	2.60	Dalí
9		El amor secreto	Mármol	0.41	1.80	Rodín
10		El atleta	Bronce	0.19	0.30	Rodín
11		El genio de la danza	Bronce	0.33	1.00	Rodín
12		El vals secreto	Bronce	0.84	1.20	Rodín
13		Elefante espacial	Bronce	0.89	2.50	Dalí
14		Eustache de Saint Pierre	Bronce	0.40	1.10	Rodín
15		Gabinete antropomórfico	Bronce	1.26	0.70	Dalí
16		Jean de Fiennes	Bronce	0.64	1.90	Rodín
17		La edad de bronce	Bronce	0.50	1.80	Rodín
18		La mujer en llamas	Bronce	0.65	1.85	Dalí
19		La mujer jirafa	Bronce	1.10	2.40	Dalí
20	6	La plegaria	Mármol	0.45	0.55	Rodín
21		La puerta del infierno	Bronce	1.73	1.90	Rodín
22		Los luchadores	Mármol	0.89	2.00	Rodín
23		Montado por el tiempo	Bronce	1.29	1.60	Dalí
24		Newton surrealista	Bronce	0.83	1.80	Dalí
25		Perfil del tiempo	Bronce	0.89	1.30	Dalí
26		Perseo	Bronce	0.44	2.70	Dalí
27		Ugolino y sus hijos	Bronce	0.29	0.50	Carpaux
28	5	Vitrina 2	Aluminio	0.70	1.70	Varios
29		Vitrina 4	Aluminio	0.40	1.90	Varios
30	4	Busto Madame Renoir	Bronce	0.16	0.65	Renoir
31		Caminando	Mármol	0.48	0.48	Botero
32		Maternidad	Bronce	0.22	0.16	Renoir
33		Mujer arreglándose el cabello	Bronce	0.36	0.50	Anónimo
34		Mujer recostada	Mármol	0.68	0.25	Botero
35		Venus triunfante	Bronce	0.20	0.60	Anónimo
36		Vitrina 2	Aluminio	0.70	1.70	Varios

Tabla A 1.2 Resumen de información obtenida en visita al Museo Soumaya II

MUSEO SOUMAYA						
PLANO FAVORABLE						
ID	[NIVEL]	OBJETO	MATERIAL	BASE [m]	ALTURA [m]	AUTOR
37	3	Juan el bautista	Cerámica	0.26	0.90	Anónimo
38		La dolorosa	Cerámica	0.20	0.90	Anónimo
39		Lámpara con alegoría a la paternidad	Bronce	0.35	0.60	Anónimo
40		San José con el niño	Cerámica	0.16	0.60	Anónimo
41		San Luis Gonzaga	Cerámica	0.12	0.42	Anónimo
42		Vitrina 4	Aluminio	0.40	1.90	Varios
43	2	Busto Renoir	Bronce	0.22	0.50	Renoir
44		La edad de bronce pequeña	Bronce	0.16	0.60	Rodín
45		Niño pasionario	Cerámica	0.20	0.70	Anónimo
46		Portapapeles	Madera	1.52	1.80	Anónimo
47		Vitrina 3	Aluminio	1.02	0.90	Varios
48	1	Monedas de la historia	Aluminio	1.29	1.80	Varios
49		Vitrina 2	Aluminio	0.70	1.70	Varios
50		Vitrina 3	Aluminio	1.02	0.90	Varios
51		Vitrina 4	Aluminio	0.40	1.90	Varios
52		Vitrina 5	Aluminio	1.02	1.50	Varios
53	PB	El pensador	Bronce	0.87	1.70	Rodín
54		Laocoonte y sus hijos	Bronce	1.50	2.20	Rodín
55		La piedad	Bronce	1.58	1.70	Rodín

Tabla A 1.3 Resumen de información obtenida en visita al Museo Soumaya III

MUSEO SOUMAYA						
PLANO DESFAVORABLE						
ID	[NIVEL]	OBJETO	MATERIAL	BASE [m]	ALTURA [m]	AUTOR
1	6	Alicia en el país de las maravillas	Bronce	0.38	2.00	Dalí
2		Andrieu de Andrés	Bronce	0.80	2.00	Rodín
3		Ángel triunfante	Bronce	0.69	1.90	Dalí
4		Apolo y Dafne	Mármol	0.29	1.05	Bernini
5		Bailarina Daliniana	Bronce	0.88	1.70	Dalí
6		Balzac con habito de monje	Bronce	0.41	1.10	Boullanger
7		Cabeza colosal de Pierre	Bronce	0.30	0.80	Rodín
8		Cristo de San Juan	Bronce	0.99	2.60	Dalí
9		El amor secreto	Mármol	0.42	1.80	Rodín
10		El atleta	Bronce	0.18	0.30	Rodín

Tabla A 1.3 Resumen de información obtenida en visita al Museo Soumaya IV

MUSEO SOUMAYA						
PLANO DESFAVORABLE						
ID	[NIVEL]	OBJETO	MATERIAL	BASE [m]	ALTURA [m]	AUTOR
11	6	El genio de la danza	Bronce	0.27	1.00	Rodín
12		El vals secreto	Bronce	0.49	1.20	Rodín
13		Elefante espacial	Bronce	0.45	2.50	Dalí
14		Eustache de Saint Pierre	Bronce	0.34	1.10	Rodín
15		Gabinete antropomórfico	Bronce	0.03	0.70	Dalí
16		Jean de Fiennes	Bronce	0.63	1.90	Rodín
17		La edad de bronce	Bronce	0.53	1.80	Rodín
18		La mujer en llamas	Bronce	0.49	1.85	Dalí
19		La Mujer jirafa	Bronce	0.35	2.40	Dalí
20		La plegaria	Mármol	1.92	0.55	Rodín
21		La puerta del infierno	Bronce	0.71	1.90	Rodín
22		Los luchadores	Mármol	0.91	2.00	Rodín
23		Montado por el tiempo	Bronce	0.49	1.60	Dalí
24		Newton surrealista	Bronce	0.49	1.80	Dalí
25		Perfil del tiempo	Bronce	0.67	1.30	Dalí
26		Perseo	Bronce	0.86	2.70	Dalí
27		Ugolino y sus hijos	Bronce	0.20	0.50	Carpaux
28	5	Vitrina 2	Aluminio	0.68	1.70	Varios
29		Vitrina 4	Aluminio	0.40	1.90	Varios
30	4	Busto Madame Renoir	Bronce	0.22	0.65	Renoir
31		Caminando	Mármol	0.14	0.48	Botero
32		Maternidad	Bronce	0.23	0.16	Renoir
33		Mujer arreglándose el cabello	Bronce	0.24	0.50	Anónimo
34		Mujer recostada	Mármol	0.21	0.25	Botero
35		Venus triunfante	Bronce	0.18	0.60	Anónimo
36		Vitrina 2	Aluminio	0.68	1.70	Varios
37	3	Juan el bautista	Cerámica	0.22	0.90	Anónimo
38		La dolorosa	Cerámica	0.20	0.90	Anónimo
39		Lámpara con alegoría a la paternidad	Bronce	0.22	0.60	Anónimo
40		San José con el niño	Cerámica	0.15	0.60	Anónimo
41		San Luis Gonzaga	Cerámica	0.12	0.42	Anónimo
42			Vitrina 4	Aluminio	0.40	1.90

Tabla A 1.4 Resumen de información obtenida en visita al Museo Soumaya V

MUSEO SOUMAYA						
PLANO DESFAVORABLE						
ID	[NIVEL]	OBJETO	MATERIAL	BASE [m]	ALTURA [m]	AUTOR
43	2	Busto Renoir	Bronce	0.20	0.50	Renoir
44		La edad de bronce pequeña	Bronce	0.18	0.60	Rodín
45		Niño pasionario	Cerámica	0.16	0.70	Anónimo
46		Portapapeles	Madera	0.57	1.80	Anónimo
47		Vitrina 3	Aluminio	0.80	0.90	Varios
48	1	Monedas de la historia	Aluminio	0.99	1.80	Varios
49		Vitrina 2	Aluminio	0.68	1.70	Varios
50		Vitrina 3	Aluminio	0.80	0.90	Varios
51		Vitrina 4	Aluminio	0.40	1.90	Varios
52		Vitrina 5	Aluminio	1.02	1.50	Varios
53	PB	El pensador	Bronce	0.84	1.70	Rodín
54		Laocoonte y sus hijos	Bronce	0.76	2.20	Rodín
55		La piedad	Bronce	0.86	1.70	Rodín

Tabla A 1.4 Resumen de información obtenida en visita al Museo Nacional de Antropología I

ID	[NIVEL]	OBJETO	MATERIAL	BASE [m]	ALTURA [m]	CULTURA
1	PB	Chacmol	Roca	1.06	1.00	Del norte
2		Chacmol de Pátzcuaro	Roca	0.88	0.70	Del norte
3		Escultura antropomórfica	Roca	0.14	0.70	Del norte
4		Escultura en piedra	Roca	0.15	0.60	Del norte
5		Estela de Acapulco	Roca	0.45	1.60	Del norte
6		Jarrón 1	Cerámica	0.10	0.30	Del norte
7		Jarrón 2	Cerámica	0.07	0.15	Del norte
8		Jarrón 3	Cerámica	0.19	0.60	Del norte
9		Mascara prehispánica	Cerámica	0.04	0.20	Del norte
10		Trono zoomorfeo	Roca	0.89	0.70	Del norte
11		Vitrina con objetos	Vidrio	0.77	2.30	Del norte
12		Atlante maya	Roca	0.41	1.00	Maya
13		Códice maya	Roca	0.82	1.50	Maya
14		Sacerdote maya	Roca	0.42	1.60	Maya
15		Serpiente emplumada	Roca	0.79	0.90	Maya
16		Cabeza colosal	Roca	0.99	1.70	Del Golfo
17		Dios del Agua	Cerámica	0.49	1.50	Del Golfo

Tabla A 1.4 Resumen de información obtenida en visita al Museo Nacional de Antropología II

MUSEO NACIONAL DE ANTROPOLOGÍA						
PLANO FAVORABLE						
ID	[NIVEL]	OBJETO	MATERIAL	BASE [m]	ALTURA [m]	CULTURA
18	PB	Dios Dos Conejo	Roca	0.54	1.40	Del Golfo
19		Diosa Cihuateteo	Cerámica	0.29	1.00	Del Golfo
20		Diosa generadora de la vid	Roca	0.32	1.30	Del Golfo
21		Representación de Quetzalcóatl	Roca	0.30	1.20	Del Golfo
22		Dios Cocijo	Cerámica	0.41	0.80	De Oaxaca
23		Diosa con mascara	Cerámica	0.05	1.20	De Oaxaca
24		Xipe	Cerámica	0.47	0.80	De Oaxaca
25		Ahuizotl	Roca	0.38	0.50	Mexica
26		Atlante mexicana	Roca	0.40	1.20	Mexica
27		Coatlicuel 1	Roca	1.02	2.20	Mexica
28		Coatlicuel 2	Roca	0.26	1.10	Mexica
29		Escultura mexicana	Roca	0.53	1.10	Mexica
30		Guerrero águila	Cerámica	0.47	1.10	Mexica
31		Ocelote	Roca	1.19	1.00	Mexica
32		Personaje de la nobleza	Roca	0.29	1.10	Mexica
33	Sacerdote mexicana	Cerámica	0.38	1.50	Mexica	

Tabla A 1.4 Resumen de información obtenida en visita al Museo Nacional de Antropología III

MUSEO NACIONAL DE ANTROPOLOGÍA						
PLANO DESFAVORABLE						
ID	[NIVEL]	OBJETO	MATERIAL	BASE [m]	ALTURA [m]	CULTURA
1	PB	Chacmol	Roca	0.35	1.00	Del norte
2		Chacmol de Pátzcuaro	Roca	0.47	0.70	Del norte
3		Escultura antropomórfica	Roca	0.14	0.70	Del norte
4		Escultura en piedra	Roca	0.15	0.60	Del norte
5		Estela de Acapulco	Roca	0.26	1.60	Del norte
6		Jarrón 1	Cerámica	0.10	0.30	Del norte
7		Jarrón 2	Cerámica	0.07	0.15	Del norte
8		Jarrón 3	Cerámica	0.19	0.60	Del norte
9		Mascara prehispánica	Cerámica	0.21	0.20	Del norte
10		Trono zoomorfo	Roca	0.45	0.70	Del norte
11		Vitrina con objetos	Vidrio	0.69	2.30	Del norte
12		Atlante maya	Roca	0.29	1.00	Maya
13		Códice maya	Roca	0.21	1.50	Maya

Tabla A 1.4 Resumen de información obtenida en visita al Museo Nacional de Antropología IV

MUSEO NACIONAL DE ANTROPOLOGÍA						
PLANO DESFAVORABLE						
ID	[NIVEL]	OBJETO	MATERIAL	BASE [m]	ALTURA [m]	CULTURA
14	PB	Sacerdote maya	Roca	0.38	1.60	Maya
15		Serpiente emplumada	Roca	0.29	0.90	Maya
16		Cabeza colosal	Roca	1.08	1.70	Del Golfo
17		Dios del Agua	Cerámica	0.47	1.50	Del Golfo
18		Dios Dos Conejo	Roca	0.34	1.40	Del Golfo
19		Diosa Cihuateteo	Cerámica	0.42	1.00	Del Golfo
20		Diosa generadora de la vid	Roca	0.12	1.30	Del Golfo
21		Representación de Quetzalcóatl	Roca	0.17	1.20	Del Golfo
22		Dios Cocijo	Cerámica	0.44	0.80	De Oaxaca
23		Diosa con mascara	Cerámica	0.47	1.20	De Oaxaca
24		Xipe	Cerámica	0.40	0.80	De Oaxaca
25		Ahuizotl	Roca	0.34	0.50	Mexica
26		Atlante mexicana	Roca	0.34	1.20	Mexica
27		Coatlicuel 1	Roca	0.94	2.20	Mexica
28		Coatlicuel 2	Roca	0.33	1.10	Mexica
29		Escultura mexicana	Roca	0.45	1.10	Mexica
30		Guerrero águila	Cerámica	0.49	1.10	Mexica
31		Ocelote	Roca	1.19	1.00	Mexica
32		Personaje de la nobleza	Roca	0.23	1.10	Mexica
33		Sacerdote mexicana	Cerámica	0.24	1.50	Mexica

Tabla A 1.4 Resumen de información obtenida en visita al Instituto de Ingeniería UNAM

INSTITUTO DE INGENIERÍA						
AMBOS PLANOS						
ID	[NIVEL]	OBJETO	MATERIAL	BASE [m]	ALTURA [m]	AUTOR
1	PB	Busto Fernando Hiriart	Bronce y marmol	0.45	1.8	Desconocido
2		Escultura 1	Barro y engobe	0.23	1.7	Pórtela
3		Escultura 2	Barro y engobe	0.31	1.5	Pórtela
4		Escultura 3	Barro y engobe	0.26	1.3	Pórtela
5		Escultura 4	Barro y engobe	0.11	1.5	Pórtela
6		Escultura 5	Barro y engobe	0.19	1.9	Pórtela
7		Escultura 6	Barro y engobe	0.13	1.7	Pórtela
8	1	Escultura Torre de Ingeniería	Acero y acrílico	0.77	2.5	Desconocido

Anexo B

Curvas de probabilidad de vuelco de los contenidos de estudio en el Museo Soumaya

Las siguientes curvas de distribución de probabilidad son las calculadas en el capítulo 4. En el presente anexo se incluye la totalidad de la muestra recogida en el Museo Soumaya.

En las figuras la línea continua representa la curva de probabilidad obtenida con el método de *Reinoso et al* y la línea punteada la curva de probabilidad calculada con las ecuaciones obtenidas con la regresión no lineal mostradas en el capítulo 4. (*Nota: las figuras de referencia a las esculturas no están a escala entre sí*).

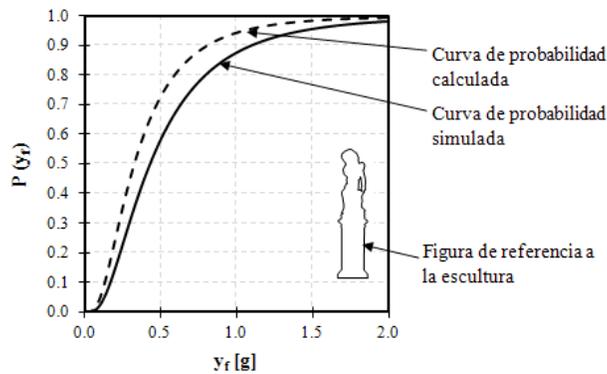
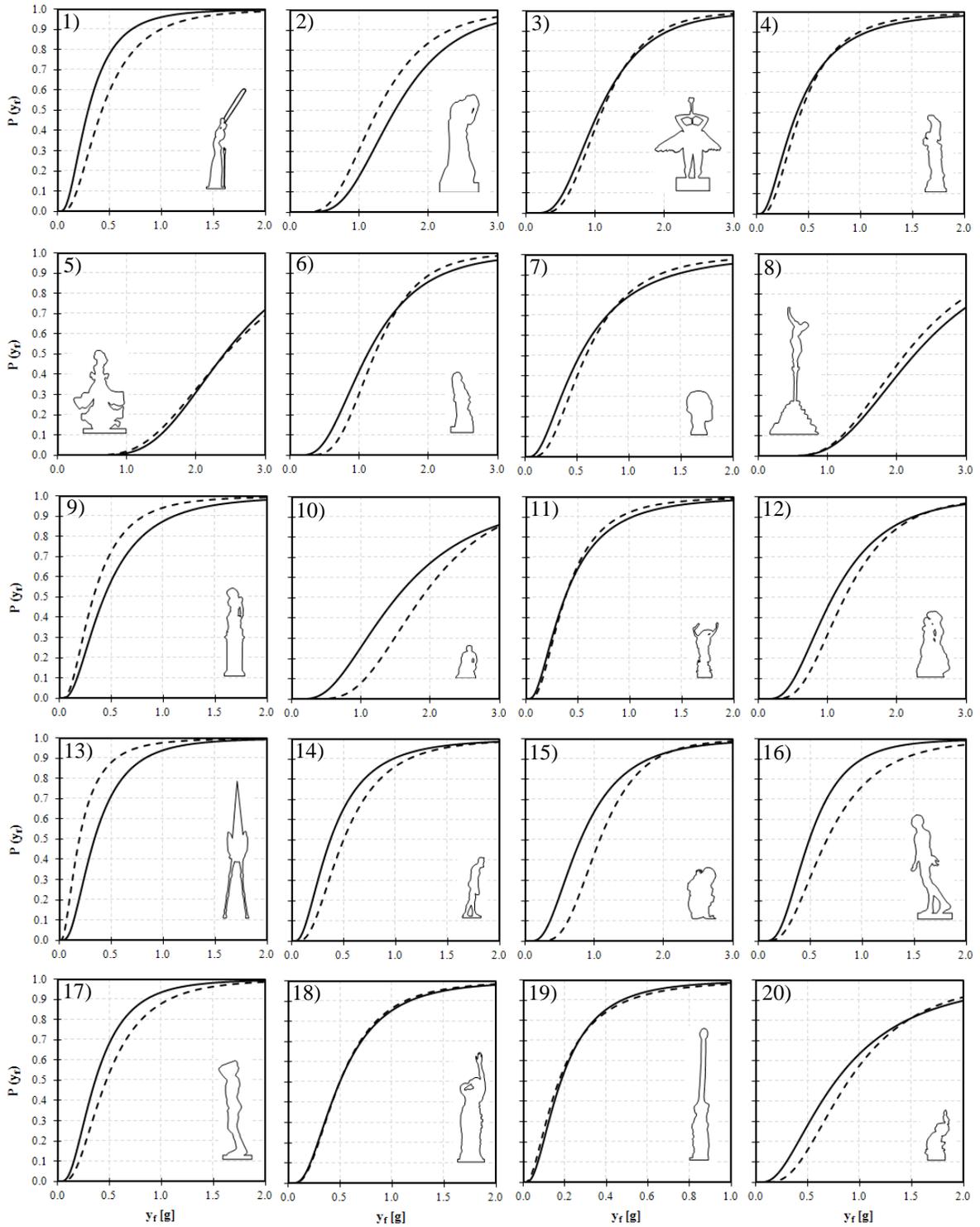
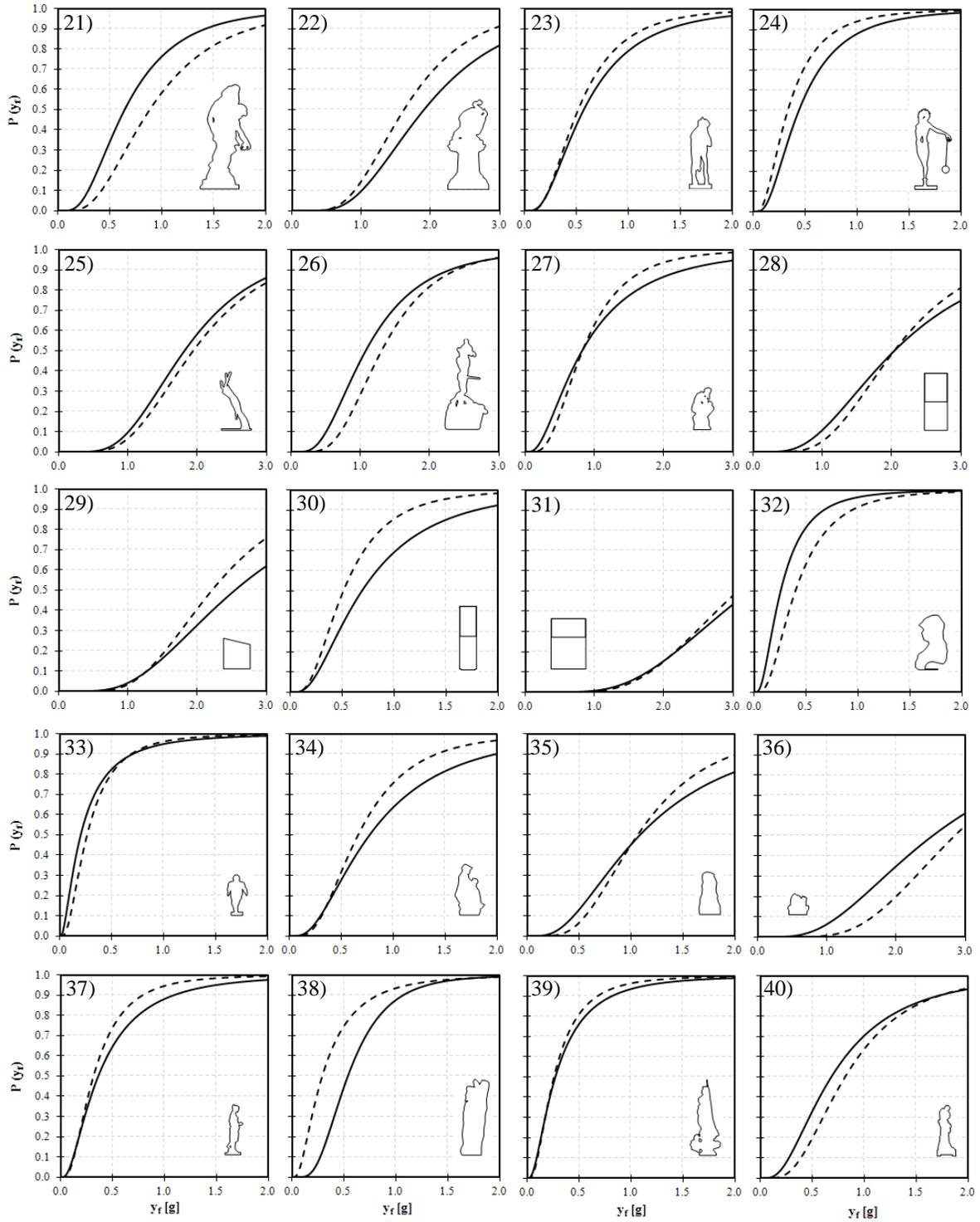
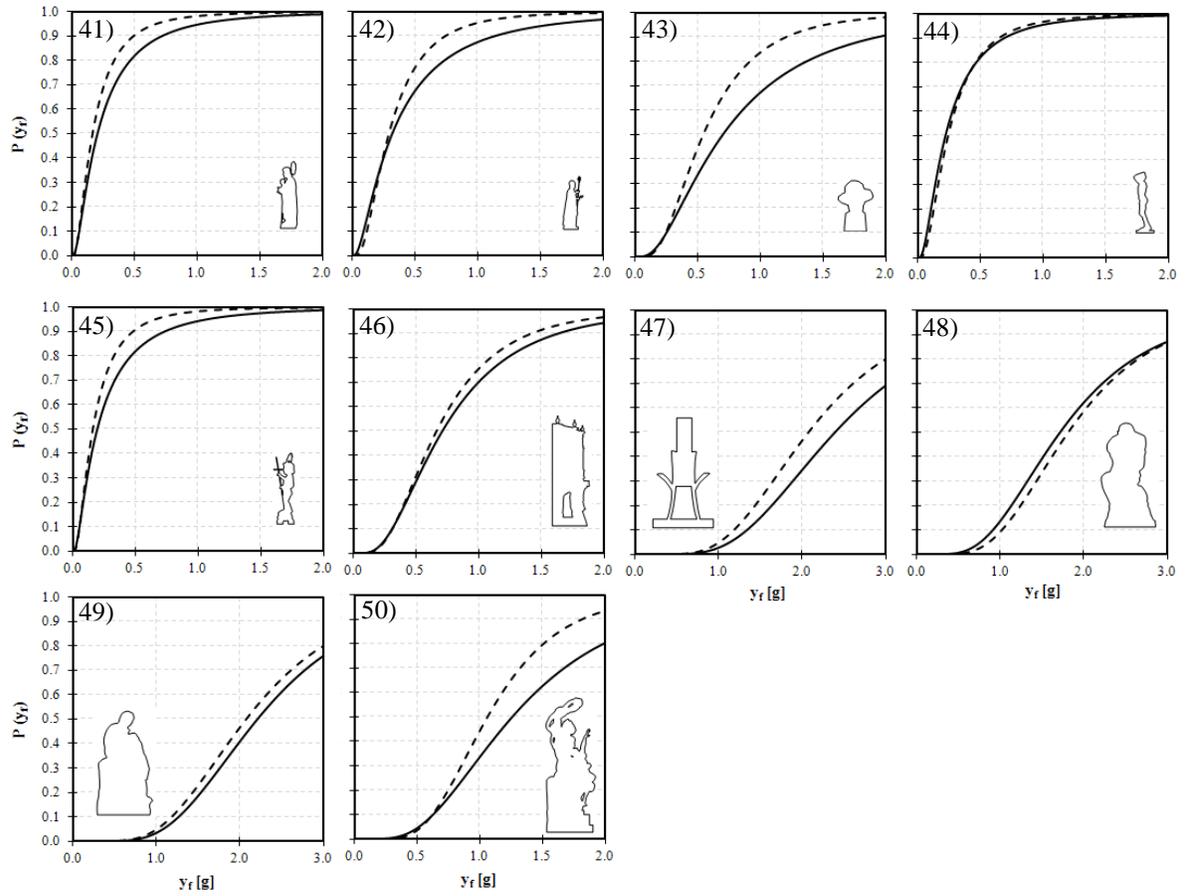


Figura A2.1 Información mostrada en los gráficos

Índice de esculturas		
1) Alicia en el país de las maravillas	18) La mujer en llamas	35) Mujer arreglándose el cabello
2) Andrieu de Andrés	19) La mujer jirafa	36) Mujer recostada
3) Angel triunfante	20) La plegaria	37) Venus triunfante
4) Apolo y Dafne	21) La puerta del infierno	38) Juan el bautista
5) Bailarina Daliniana	22) Los luchadores	39) La dolorosa
6) Balzac con habito de monje	23) Montado por el tiempo	40) Lámpara con alegoría a la paternidad
7) Cabeza colosal de Pierre	24) Newton surrealista	41) San José con el niño
8) Cristo de San Juan	25) Perfil del tiempo	42) San Luis Gonzaga
9) El amor secreto	26) Perseo	43) Busto Renoir
10) El atleta	27) Ugolino y sus hijos	44) La edad de bronce pequeña
11) El genio de la danza	28) Vitrina 2	45) Niño pasionario
12) El vals secreto	29) Vitrina 3	46) Portapapeles
13) Elefante espacial	30) Vitrina 4	47) Monedas de la historia
14) Eustache de San Pierre	31) Vitrina 5	48) El pensador
15) Gabinete antropomórfico	32) Busto Madame Renoir	49) La piedad
16) Jean de Fiennes	33) Caminando	50) Laocoonte y sus hijos
17) La edad de bronce	34) Maternidad	



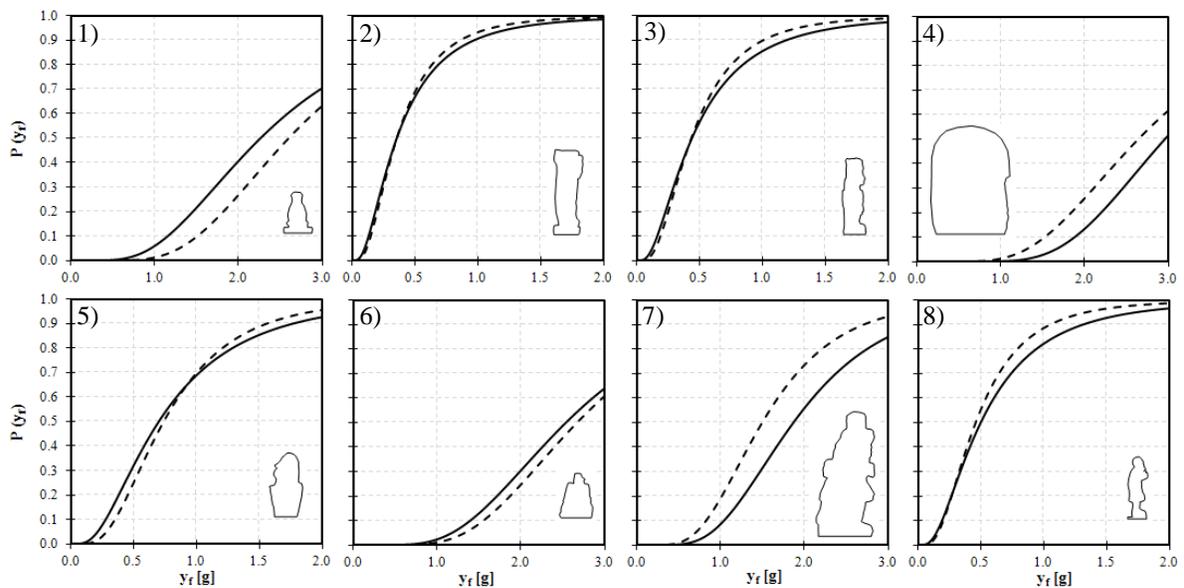


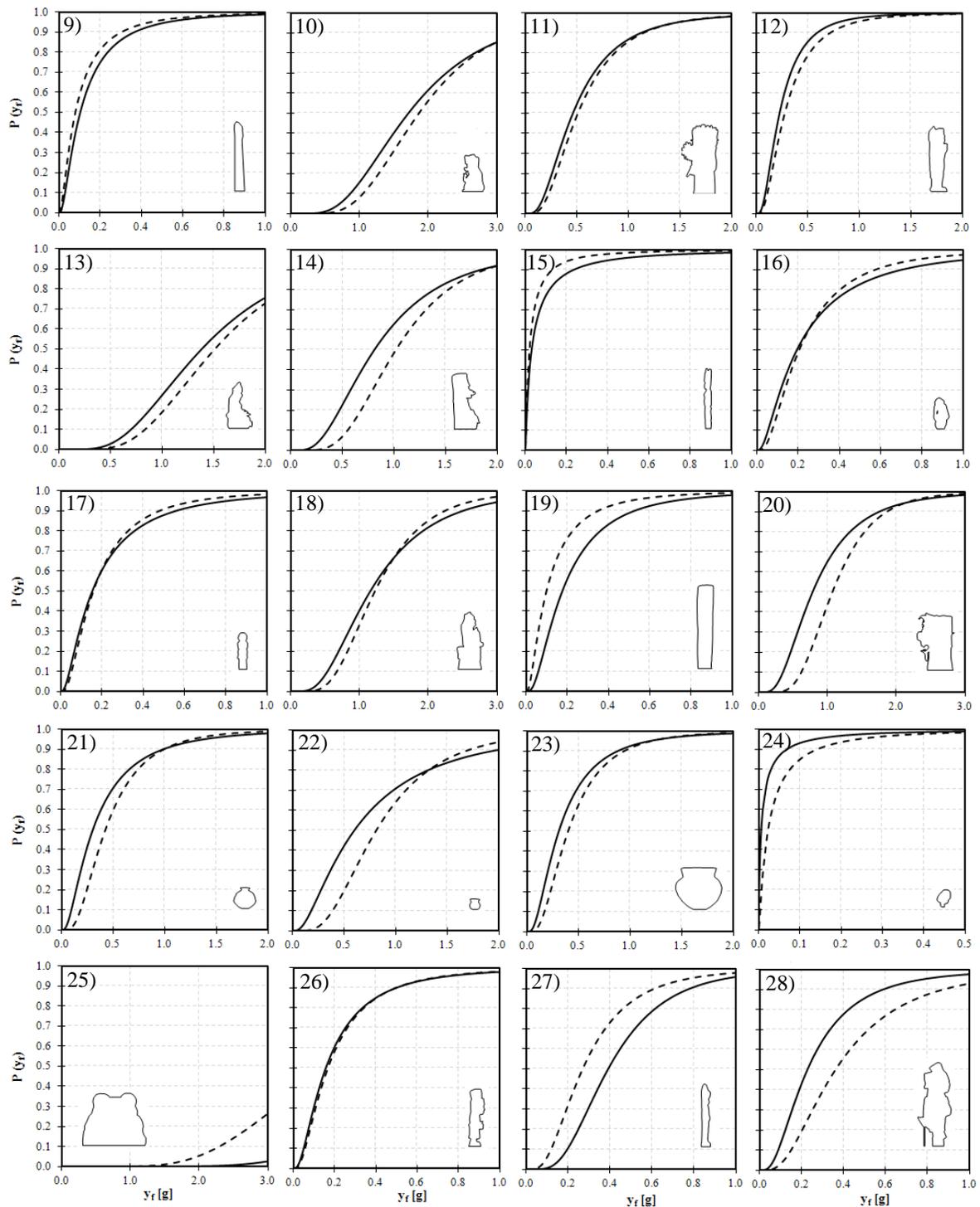


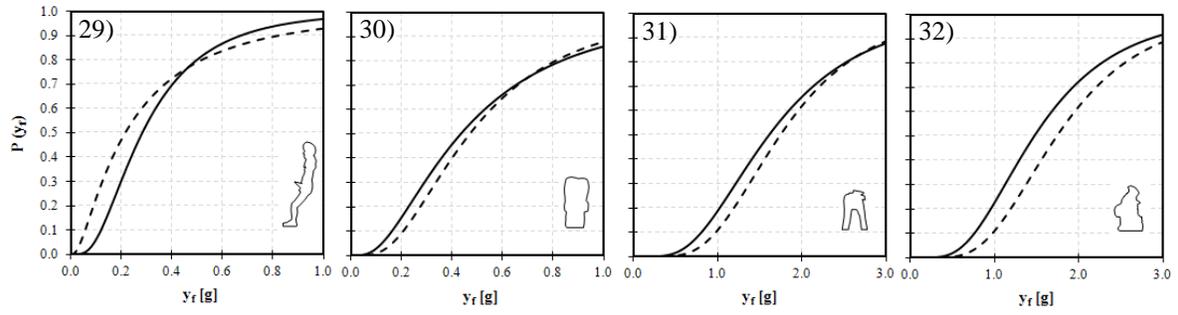
Anexo C

Curvas de probabilidad de vuelco de los contenidos de estudio en el Museo Nacional de Antropología

Índice de esculturas	
1) Ahuizotl	18) Escultura mexicana
2) Atlante maya	19) Estela de Acapulco
3) Atlante mexicana	20) Guerrero águila
4) Cabeza colosal	21) Jarrón 1
5) Chacmol	22) Jarrón 2
6) Chacmol de Patzcuaro	23) Jarrón 3
7) Coatlicue 1	24) Mascara prehispánica
8) Coatlicue 2	25) Ocelote
9) Códice maya	26) Personaje de la nobleza
10) Dios Cocijo	27) Representación de Quetzalcóatl
11) Dios del Agua	28) Sacerdote maya
12) Dios Dos Conejo	29) Sacerdote mexicana
13) Diosa Cihuateteo	30) Serpiente emplumada
14) Diosa con mascara	31) Trono zoomorfeo
15) Diosa generadora de la vid	32) Xipe
16) Escultura antropomórfica	
17) Escultura en piedra	



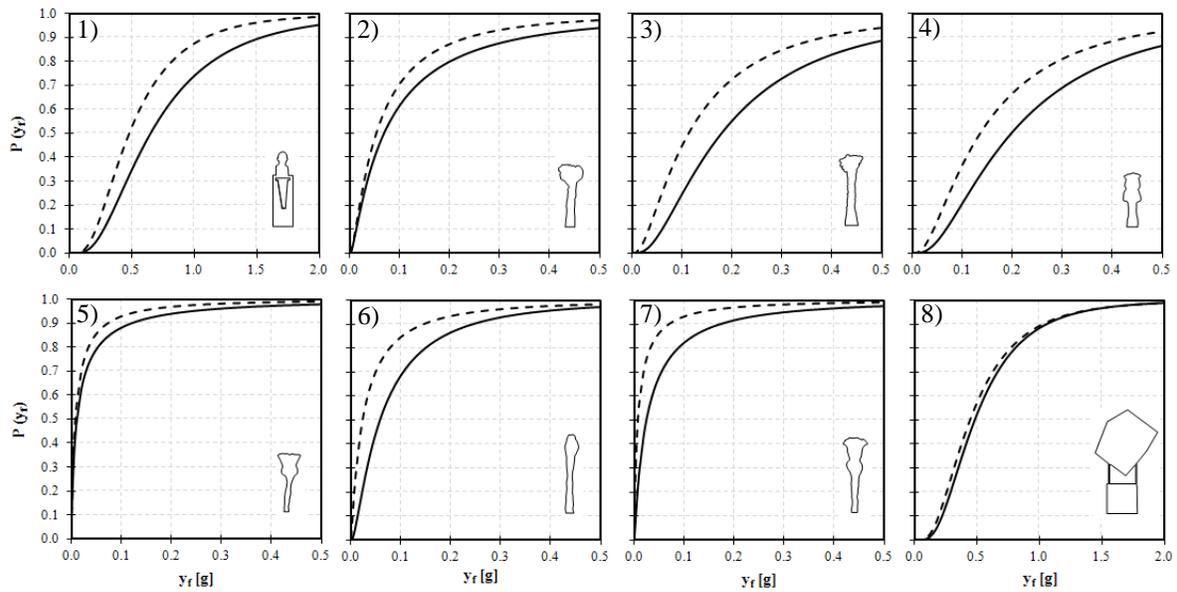




Anexo D

Curvas de probabilidad de vuelco de los contenidos de estudio en el Instituto de Ingeniería UNAM

Índice de esculturas	
1) Busto Hiriart Balderrama	5) Escultura 4
2) Escultura 1	6) Escultura 5
3) Escultura 2	7) Escultura 6
4) Escultura 3	8) Escultura Torre



Referencias

Bibliográficas

1. Aguayo Joaquín y Trapaga Roberto (1996), “**Geodinámica de México y minerales del mar**”, La ciencia para todos
2. Aparicio Francisco (1991), “**Fundamentos de hidrología de superficie**”, Limusa, pp.263-270
3. Bedford Anthony, Fowler Wallace (2000), “**Mecánica para ingeniería: Estática**”, Pretince Hall, pp. 334-343
4. Comisión Federal de Electricidad (2008), “**Manual de Obras Civiles de CFE**”
5. Field Edward (1999), “**Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) a primer**”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics
6. Gobierno del Distrito Federal (2004), “**Reglamento de Construcciones del Distrito Federal**”
7. Hibbeler Rusell, (2004), “**Mecánica para ingenieros: Estática**”, CECSA, pp 365-413
8. Hibbeler Rusell, (2004), “**Mecánica para ingenieros: Dinamica**”, CECSA, pp 624-630
9. Jaimes Miguel y Reinoso Eduardo (2006), “**Comparación del comportamiento de edificios en el Valle de México ante sismos de subducción y falla normal**”, Revista de Ingeniería Sísmica, pp. 1-12
10. Jaimes Miguel, Niño Mauro y Reinoso Eduardo (2008), “**Estimación de mapas de desplazamiento traslacional de laderas a nivel regional inducido por sismos**”, Instituto de Ingeniería UNAM
11. Mena Hernández Ulises (2002), “**Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas**”, Universidad Politécnica de Cataluña, pp. 9-11
12. Miranda Eduardo (2006), “**Simplified analysis tools for rapid seismic evaluation of existing buildings in urban areas**” Stanford University
13. Montero Muradas Isabel (1994), “**Un modelo de valoración de obras de arte**”, Tesis Doctoral, Universidad de la Laguna, pp. 106-130
14. Novaro Ocatavio, “**México-Tenochtitlan, Septiembre 19 de 1985**”, El Colegio Nacional, pp. 233-250
15. Purvance, M, Anooshehpour, A., and Brune, J. (2008) “**Freestanding block overturning fragilities: Numerical simulation and experimental validation**” Earthquake Engineering and Structural Dynamics 37, pp. 791–808
16. Raevent Juan (2000), “**Flujo de vaciado de sólidos**”, Manual de vaciado de tolvas, pp 11
17. Reinoso Eduardo, Jaimes Miguel y Esteva Luis (2009), “**Seismic vulnerability of an inventory of overturning objects**”, Journal of Earthquake Engineering, pp. 1008-1021
18. Reinoso Eduardo y Jaimes Miguel (2009) “**Criterios para obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas usando como ejemplo el caso de terreno firme de la Ciudad de México**”, Instituto de Ingeniería UNAM

19. Revista *News in conservation* (Septiembre 2007), “**Peruvian Earthquake damages museums and sites**”, Institute for the conservations of historic and artistic works
20. Rodríguez Neftalí, “**Ingeniería estructural en obras de gran tamaño**” Instituto de Ingeniería UNAM, pp 88-89
21. Walpole Myers (1999), “**Probabilidad y estadística para ingenieros**”, Pretince Hall, pp. 51-75
22. Yim, C. S., Chopra, A. K., and J. Penzien (1980) “**Rocking response of rigid blocks to earthquake,**” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 8(6), pp. 565–587

Páginas de internet

1. Periódico “La visión de Maule”, Chile, (consultada el 12 de marzo de 2012), disponible en: <http://www.visiondelmaule.cl/?p=9088>
2. Periódico “La otra voz”, Chile, (consultada el 12 de marzo de 2012), disponible en: <http://www.laotrazvoz.cl/comenzo-restauracion-de-estatuas-del-palacio-vergara-danadas-por-el-terremoto/>
3. Periódico “Cooperativa”, Chile, (consultada el 12 de marzo de 2012), disponible en: http://www.cooperativa.cl/prontus_notas/site/artic/20080605/pags/20080605101327.html
4. Periódico “El Universal”, México, (consultada el 12 de marzo de 2012), disponible en: www.eluniversal.com.mx/notas/628682.html
5. Periódico “La provincia”, España, (consultada el 13 de marzo de 2012), disponible en: <http://www.lasprovincias.es/v/20110706/castellon/castellon-restaurara-varias-esculturas-20110706.html>
6. Universidad del Bio Bio, Chile, (consultada el 13 de marzo de 2012), disponible en: http://www.ubiobio.cl/miweb/webubb.php?id_pagina=3999
7. Noticias Canal Patrimonio, Italia, (consultada el 13 de marzo de 2012), disponible en: <http://www.canalpatrimonio.com/es/noticias/?iddoc=51621>
8. Reporte de daños en la Ciudad de los Muertos, Chile, (consultada el 13 de marzo de 2012), disponible en: <http://www.laciudaddelosmuertos.org/wp-content/uploads/2011/07/denuncia-bidema-castro-vergara-balmaceda-timbrada.pdf>
9. Alianz Seguros, Estados Unidos, (consultada el 16 de marzo de 2012), disponible en: <http://www.allianz.es/Prensa/Temas-de-Interes/Prevencion-Gestion-Riesgos/AZS-N-Qu%C3%A9-pasar%C3%ADa-si-en-San-Francisco>
10. Normas de seguridad en museos, Venezuela, (consultada el 16 de marzo de 2012), disponible en: http://museosdevenezuela.org/Documentos/Normativas/Normativa4_4.shtml
11. PreveINAH, México, (consultada el 19 de marzo de 2012), disponible en: <http://www.gobiernodigital.inah.gob.mx/mener/index.php?id=5>
12. La columna de la Independencia, México, (consultada el 22 de marzo de 2012), disponible en: <http://www.mexicomaxico.org/ParisMex/resumen.htm>
13. Sismo de Chile en 2010, Estados Unidos, (consultada el 23 de marzo de 2012), disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_de_Chile_de_2010
14. Visita México, México, (consultada el 23 de marzo de 2012), disponible en: <http://www.visitingmexico.com.mx/blog/conozca-el-angel-de-la-independencia-en-ciudad-de-mexico.htm>

15. México desconocido, México, (consultada el 1 de abril de 2012), disponible en:
<http://www.mexicodesconocido.com.mx/memorias-de-la-construccion-del-museo-nacional-de-antropologia-de-la-ciudad-de-mexico.html>
16. Museo Nacional de Antropología, México, (consultada el 1 de abril de 2012), disponible en: www.mna.inah.gob.mx/
17. Museo Soumaya Polanco, México, (consultada el 1 de abril de 2012), disponible en: [es.wikipedia.org/wiki/Museo_Soumaya_\(Plaza_Carso\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Museo_Soumaya_(Plaza_Carso))
18. Museo Soumaya Polanco, México, (consultada el 1 de abril de 2012), disponible en: www.soumaya.com.mx
19. Museo Soumaya Polanco, México, (consultada el 1 de abril de 2012), disponible en: www.edemx.com/citymex/edificios/Soumaya.html
20. Instituto de Ingeniería UNAM, México, (consultada el 1 de abril de 2012), disponible en: <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/Paginas/default.aspx>
21. *Sismo de España 2011, Estados Unidos*, (consultada el 5 de abril de 2012), disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_de_Lorca_de_2011
22. *Terremoto de Italia 2009, Estados Unidos*, (consultada el 5 de abril de 2012), disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_de_L'Aquila_de_2009
23. *Terremoto de China 2011, Estados Unidos*, (consultada el 5 de abril de 2012), disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_de_Sichuan_de_2008
24. *Terremoto de México 1957, Estados Unidos*, (consultada el 5 de abril de 2012), disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_de_M%C3%A9xico_de_1957
25. *ArteSpain, España*, (consultada el 29 de abril de 2012), disponible en: <http://www.artespain.com/11-01-2010/escultura/subasta-de-dali-en-francia>
26. *Cultura Ande, Bolivia*, (consultada el 5 de abril de 2012), disponible en: <http://www.culturande.org/Noticia.aspx?IdNoticia=68>
27. *Noticias Hola24, España*, (consultada el 5 de abril de 2012), disponible en: <http://hola24h.hola.com/noticia/2011120215157/record-en-una-subasta-de-una-escultura-de-rodin-4-6-millones-de-euros/>
28. *Casa de subastas Arcadja, España*, (consultada el 6 de abril de 2012), disponible en: <http://www.arcadja.com>
29. *Periódico "El Universal", México*, (consultada el 6 de abril de 2012), disponible en: <http://www.eluniversal.com.mx/notas/809114.html>
30. *Periódico "El País", España*, (consultada el 6 de abril de 2012), disponible en: http://cultura.elpais.com/cultura/2009/11/18/actualidad/1258498801_850215.html
31. *Periódico "El Universal", México*, (consultada el 6 de abril de 2012), disponible en: http://www2.eluniversal.com.mx/pls/impreso/noticia.html?id_nota=35584&tabla=cultura
32. *Periódico "El Universal", México*, (consultada el 6 de abril de 2012), disponible en: <http://www.eluniversal.com.mx/notas/753326.html>
33. *Banco de la Republica, Colombia*, (consultada el 6 de abril de 2012), disponible en: <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/museobotero/listabot.htm>
34. Pagina de Maribel Pórtela, México, (consultada el 7 de abril de 2012), disponible en: <http://www.maribelportela.com/>
35. *Coeficientes de fricción, Estados Unidos*, (consultada el 2 de mayo de 2012), disponible en: http://es.wikibooks.org/wiki/F%C3%ADsica/Est%C3%A1tica/Rozamiento#Valores_de_los_coeficientes_de_fricci.C3.B3n