

29
4/29



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

MODELO NUMERICO DEL ACUIFERO DE LA
CUENCA DE ORIENTAL

T E S I S

Que para obtener el titulo de :

INGENIERO CIVIL

presenta

HECTOR LEONARDO CISNEROS ITURBE



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D.F.

ABRIL 1991



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 está 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.

INDICE

INTRODUCCION	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
2. GEOLOGIA DE LA ZONA	7
2.1 Revisión de estudios geológicos y geofísicos	7
2.2 Resumen y procesamiento para el modelo del acuífero	18
3. GEOHIDROLOGIA DE LA CUENCA	24
3.1 Revisión de estudios geohidrológicos	24
3.2 Nueva información disponible	28
4. APLICACION DE UN MODELO NUMERICO PARA SIMULAR EL FLUJO EN EL ACUIFERO	31
4.1 Procesamiento de la información disponible	31
4.2 Región modelada y fronteras	33
4.3 Malla y condiciones internas	33
4.4 Condiciones iniciales	34
4.5 Calibración	37
4.6 Predicciones	39
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
GRAFICAS	43
SERIE 4.5.1	43
SERIE 4.5.2	75
SERIE 4.5.3	78

SERIE 4.3.4

71

FIGURA 4.3.1

72

APENDICE

73

1. Modelo DAS para el comportamiento de acuíferos

74

2. Características del modelo

75

3. Datos de entrada y salida de resultados

76

AGRADECIMIENTOS

85

REFERENCIAS

86

PLANOS

INTRODUCCION

La demanda de agua en el país aumenta día con día, tanto para el consumo por la población como para procesos de producción agrícolas, pecuarios e industriales, lo que ha preocupado lo mismo a dependencias del gobierno que a la sociedad en general. Debido a ello, la utilización y el estudio de los recursos hidrológicos han tomado un importante papel para conocer su disponibilidad.

La cuenca de Oriental en el estado de Puebla ha sido objeto de estudio desde hace poco más de 30 años. En ella, la mayor parte del agua que se

ha utilizado en diversas actividades es extraída del acuífero de la cuenca a través de pozos, norias y manantiales; en esta tesis se aplica un modelo numérico para la simulación del flujo en el acuífero. El capítulo primero se refiere a cómo, cuándo y por quiénes ha sido abordado el problema de la explotación del acuífero.

En el estudio de un acuífero es vital conocer la geología de la zona para determinar a través de qué formaciones geológicas existe flujo subterráneo y qué otras representarán barreras impermeables. En el capítulo dos se hace un resumen de la información de las publicaciones que tratan el tema de la geología del lugar; en él puede verse que la complejidad geológica de la cuenca es muy grande y que aún falta mucho por conocerse de ese aspecto. Se presenta también una evaluación hidrogeológica de las formaciones geológicas en la que se indica cuáles de ellas tienen propiedades que las hacen aptas para permitir el flujo del agua.

También es necesario conocer la geohidrología de la cuenca, por lo que en el capítulo tercero se hace una recopilación de toda la información geohidrológica con la que se pudo contar. Aparecen allí caudales de extracción de censos de pozos, espesores de estratos permeables, transmisividades, infiltración, volúmenes anuales de extracción y datos geohidrológicos en general.

En el capítulo cuarto se procesa toda la información disponible para alimentar al modelo matemático, se definen una malla geométrica y las condiciones iniciales de la modelación, se calibra el modelo y se simula la historia de las extracciones hasta el año 1990. Se continúa la simulación a partir de ese año y hasta el año 2010 bajo otras condiciones

de explotación para predecir el comportamiento del acuífero. Las conclusiones y recomendaciones se presentan en el capítulo quinto, donde se ve que se ha llegado a la sobreexplotación del acuífero.

CAPITULO PRIMERO

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con el fin de aprovechar los recursos geohidrológicos de la cuenca de Oriental, se han llevado a cabo diversos estudios tendientes a cuantificar el volumen potencial de explotación de la zona a fin de utilizarlo sin afectar el desarrollo de la región y poder conducir económicamente algún volumen a las ciudades de México o Puebla.

Dentro de esos estudios se encuentran los hechos por dependencias

gubernamentales, tales como la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México (C.H.C.V.M.), la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) y la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (S.A.R.H.), así como de empresas privadas a las que se encargó la obtención y evaluación de diferentes datos de carácter geohidrológico.

Así pues, para el presente estudio se contó con diversos estudios geohidrológicos y geológicos en los que se fundamentó su desarrollo. Dentro de ellos, cuatro son las más importantes: el geohidrológico que hiciera en 1966 la C.H.C.V.M., el estudio geológico con el fin de evaluar las posibilidades geotérmicas de la zona de 1980 por la C.F.E., el de tipo geohidrológico que desarrolló la compañía Investigaciones Técnicas del Subsuelo S.A. en 1985 con contrato de la S.A.R.H., y la revisión de la geohidrología de 1988 a cargo de la misma Secretaría.

En el primero de ellos se estima que por debajo de la sierra de Soltepec, y que por la franja noreste de la cuenca, entre la ciudad de Perote y la caldera de los Humeros existían salidas subterráneas, que sumadas a las salidas por evaporación de los lagos se alcanzaba un total de $17 \text{ m}^3/\text{s}$ ó más, y que podrían ser aprovechables mediante bombeo; sin embargo, la desecación de pozos y norias de regiones altas han preocupado a la población de la cuenca por la pérdida de sus recursos, por lo que en 1988 encargaron al Instituto de Ingeniería una evaluación crítica de la información a fin de mediar en el asunto.

Cruickshank [1989] realizó la modelación matemática del acuífero de la cuenca de Oriental. Esta tesis pretende hacer una modelación más precisa, afinando y adecuando la malla a las condiciones geológicas y reevaluando

la transmisividad y los espesores permeables del acuífero.

La complejidad del marco geológico que resulta del análisis de los estudios, la escasa o nula información, y hasta la contradicción entre unos y otros hicieron que la evaluación de la veracidad de algunos datos tomara un papel importante.

La cuenca de Oriental se localiza en los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz, sobre 29 municipios pertenecientes a ellos. En ella se asientan, entre otras poblaciones, Huamantla de Juárez, Tlax., Ciudad Serdán, Pue. y Perote, Ver. Se encuentra además entre los paralelos $19^{\circ} 03'$ y $19^{\circ} 43'$ y entre los meridianos $97^{\circ} 15'$ y $97^{\circ} 25'$ longitud oeste con una superficie aproximada de $5,000 \text{ km}^2$. Entre sus rasgos principales cabe mencionar que el parteaguas de la cuenca pasa por tres de las elevaciones volcánicas más importantes del país; ellas son el Cofre de Perote, el Volcán la Malinche y el Pico de Orizaba, que es la cumbre más alta del País. Se presenta con fines introductorios el plano 1.1. en el que se observa el aspecto topográfico de la cuenca.

CAPITULO SEGUNDO

GEOLOGIA

2.1 Revisión de estudios geológicos y geofísicos

El estudio "Las aguas subterráneas del sistema Apan - Oriental" del año de 1966, al tratar la geología correspondiente a la cuenca de Oriental, hace referencia al "Estudio de viabilidad del sistema regional Apan - Oriental" realizado en el año de 1962 para la C.H.C.V.M. por el Ing. Federico Moser. A continuación se hace un resumen de tal descripción.

La cuenca se encuentra en el extremo este del Eje Volcánico en la unión de las fajas de fracturas terrestres Clarión y Chapala Acambay, lo que es corroborado por la presencia de enormes conos volcánicos como la Malinche, el Cofre de Perote y el Pico de Orizaba, así como conos recientes diseminados en el área. Debajo de los restos de esta actividad existen, casi totalmente sepultados, los restos erosionados de un sistema de plegamientos calizos formados a principios del Terciario. Los ejes de los pliegues corren en dirección SE - NW, y entre los más importantes se cuenta con 5 que son los anticlinales Chicomquihuitl, Aljojuca, Chantilco, Preciosa y Limón.

Los sedimentos calizos plegados que afloran en la cuenca se depositaron en el Cretácico Superior. Es posible que en los sinclinales de tales plegamientos existan lutitas y areniscas que se conservaron en su posición al no estar expuestos a la erosión.

Los complejos volcánicos más antiguos se componen de rocas andesíticas y los conforman la Sierra de las Animas y el basamento sobre el que descansan el Cofre de Perote y el Pico de Orizaba; esta descripción coincide con la que se encuentra en la referencia 2.

Durante el Plioceno aparecieron el Cofre de Perote y La Malinche, formándose de lavas y brechas andesíticas. En el Cuaternario se formó la multitud de conos en la planicie, los cuales muestran haber sufrido pocos efectos erosivos; entre éstos se cuenta con los cerros El Pinto y Las Derrumbadas. La referencia 2 presenta una descripción más detallada de estas elevaciones; aquélla se tratará posteriormente.

En el Cuaternario Superior aparecieron el Pico de Orizaba y la formación

basáltica que limita la cuenca hacia el norte. También existen hacia el centro de la cuenca vestigios de fenómenos de sumergencia, como calderas y cráteres de explosión que sepultaron el área de la cuenca y zonas vecinas con sus arenas y conglomerados.

A los pies de las elevaciones Terciarias se extienden amplios abanicos aluviales hasta la época del Cuaternario Reciente, mientras que los depósitos que rellenan las partes bajas son producto de erupciones volcánicas recientes, resaltando su consistencia arenosa. El estudio menciona que debido a la formación de la sierra volcánica de Tezihutlán, la cuenca quedó como un vaso endorréico y que además data de relativamente corto tiempo.

Existen también pequeñas lagunas, producto de la combinación kárstica y volcánica, con diámetros de no más de 1.5 km, algunas de ellas rodeadas de bordos elevados y otras como simples hondanadas abruptas llamadas regionalmente Xalapaxcos, como lo son las lagunas de Alchichica, Preciosa, Quechulac, Atexcac y Aljojuca. Además de las lagunas someras de Tepeyahualco (que es de tipo temporal) y de Totolcingo (de carácter permanente, también conocida como laguna del Carmen.)

El mapa geológico de las unidades litológicas de ese estudio menciona 13 diferentes formaciones geológicas, así como la época de su formación, pero sin detallar sus edades. Tampoco se reporta una descripción detallada de sus características. Ese mapa presenta una idea general de la ubicación de las formaciones, aunque el mapa geológico de la referencia 2 es más completo y la descripción de las formaciones geológicas de la cuenca es más detallada.

Del "Informe Geológico del Proyecto Geotérmico Los Humeros Las Derrumbadas" elaborado por la Comisión Federal de Electricidad, se extrajo la información más completa en cuanto a geología se refiere. El estudio se realizó en el año de 1980 con el fin de encontrar y aprovechar de manera comercial las manifestaciones geotérmicas para la generación de energía eléctrica. En él se describe de manera cronológica cómo ha sido la evolución y procesos de formación de las unidades litológicas, y como ya se dijo, se presenta un plano geológico de la zona estudiada. A continuación se hace un resumen de la información que resulta más relevante para este estudio.

El complejo basal (Pz) sobre el que descansan los sedimentos del Mesozoico datan del Pérmico tardío o del Jurásico temprano; afloran fuera y al norte del perímetro de la Cuenca y se compone de rocas ígneas y metamórficas tales como granitos y esquistos. Sobre ellas existen algunas otras formaciones de conglomerados, areniscas y lutitas (ésta última con un espesor de hasta 400 metros) que se van superponiendo hasta llegar a la formación Tamán (Jt), que data del Jurásico superior y que está formada por lutitas y calizas; tiene una facie arcillosa y otra calcárea que afloran en una franja también al norte y fuera del perímetro de la cuenca. Al finalizar el Jurásico aparece la formación Pimienta (Jp), que consta de calizas, dolomitas y calizas arcillosas; sus afloramientos se ubican al norte de la cuenca, en donde se destacan grandes plegamientos.

Dentro del sistema Cretácico inferior, la formación Tamaulipas inferior (Kt1) presenta tres miembros: el calcarenítico, el bentonítico y el calcilutítico; este último se encuentra hacia la cima de la formación. Los tres afloran indistintamente en la zona del Río Apulco, al norte de la Sierra de Tlaxco y se compone principalmente de calizas arrecifales.

Esta formación cubre y es cubierta de manera concordante por las formaciones Pimienta y Tamaulipas Superior respectivamente.

La formación Tamaulipas superior (Kts) , constituida de sedimentos calizos ligeramente arcillosos de calizas criptocristalinas, y que aflora principalmente en las Sierras de Yolotepec y Tenextepec, se extiende al oriente para aparecer en una pequeña sierra cercana al poblado de Maravillas y después quedar sepultada por las rocas andesíticas del Cofre de Perote.

La formación Orizaba (Kor), que junto con la anterior formación apareció durante el Cretácico medio, consta de calizas arrecifales, se presenta en forma masiva y aflora unos 8 kilómetros al norte del poblado de Alchichica; constituye la franja norte de la Sierra de Tenextepec, además de emerger de manera sumamente importante a lo largo de la Sierra de Soltepec.

Poco después, la formación Guzmantla (KgZ) fue constituida de rocas calizas microcristalinas en espesores muy potentes, aflorando en la zona sureste del cerro de las Derrumbadas para formar la sierra de la Ventana, y más al sur la sierra de Tlalchichuca. Esta formación y la anterior (Orizaba) presentan características de porosidad primaria y secundaria, lo que las hace buenas receptoras de fluidos. Toca a la formación Orizaba de modo transicional, mientras que su contacto con la formación San Felipe es claramente identificable debido al rápido cambio de composición mineral.

La formación Maltrata (Kmt), que apareció al inicio del Cretácico

Superior se constituye de caliza arcillosa; sólo aflora aproximadamente a 4 km al oeste del poblado de Aljojuca en la Sierrita de Loma Virgen; cubre y es cubierta concordantemente por las formaciones Orizaba y Mezcala respectivamente.

Más tarde apareció la formación Agua Nueva (Kan), consistente de calizas arcillosas con pedernal. Se apoya en las formaciones Tamaulipas superior y Orizaba, mientras que sirve de base a la formación San Felipe. Sus afloramientos se encuentran distribuidos alrededor del cerro de las Derrumbadas y en las sierras de Tepeyhualco y Yolotepec.

La formación San Felipe (Ksf) está constituida de calizas arcillosas. Sus afloramientos son muy reducidos, y se encuentran al frente de la laguna de Alchichica, en el extremo norte de la Sierra de Tepeyhualco, a 1 ó 2 km al oeste de la laguna de Aljojuca.

Al finalizar el Cretácico superior aparecieron las formaciones Méndez (Km) y Mezcala (Kmx). La primera consta de margas, calizas y lutitas alineadas de NW a SE, y con afloramientos al este y sus de la laguna de Alchichica, en la Sierra de Tepeyhualco y unos dos km al norte del poblado de San Andrés Payuca; descansa sobre la formación San Felipe y está muy relacionada con la formación Mezcala, la cual se compone de areniscas y lutitas que emergen de sedimentos lacustres entre los poblados de Ignacio Zaragoza y El Carmen, y a unos 4 ó 5 km al sureste de ese afloramiento.

Durante el Terciario, a partir de mediados del Eoceno y hasta finalizar el Mioceno Inferior, se desarrolló una serie de rocas ígneas intrusivas (Ti) que con alineación NE-SW aprovecharon los intensos plegamientos,

fractura y fallas de las formaciones anteriores para irrumpir a través de ellas. Este mecanismo se compone de cuatro diferentes tipos de rocas, una de ellas es la Granodiorita (Tigd) que se ubica y aflora principalmente al NE de Perote, fuera del parteaguas hidrológico de la Cuenca; la sierra de Tepeyehualco esta constituida casi en su totalidad por Microgranito (Tig) que supuestamente fue despejado de su capa confinante por procesos posteriores de intemperismo; unos 3 km al SW de esta sierra existe un afloramiento de Alpita (Tia). Por último, según una sección geológica del mismo estudio, un gran bloque de Sienita (Tis) se ubica al sur de la laguna de Alchichica y hacia el cerro de las Derrumbadas y logra emerger en algunos puntos, representando una barrera impermeable por abajo de la superficie, aunque por su profundidad, no afecta el funcionamiento del acuífero, constituido en esa zona por aluvión. Con motivo de la irrupción de éstas rocas, se produjeron otras de tipo metamórfico a partir de las rocas sedimentarias, afectándolas en un grado bajo para formar skarns y mármoles, ubicadas en las cercanías de las rocas intrusivas.

La formación Cruz Blanca (Tccb), que apareció en los inicios del Mioceno está constituida de conglomerados, arenas y arcillas que descansan directamente sobre calizas y rocas ígneas intrusivas preexistentes.

Durante el Plioceno y el Pleistoceno fue creada la formación Teziutlán (Tpan), compuesta de rocas andesíticas, andesitas basálticas y basaltos, la cual ocupa una zona muy extensa y que constituye las sierras altas sobre las que se localizan los volcanes Cofre de Perote, Pico de Orizaba, la sierra de Tlaxco y la sierra Negra. Se ubica también en el cerro Buenavista, al norte de la ciudad de Perote y en la Caldera de los Humeros sobre el poblado de Teziutlán, de donde toma su nombre. Esta formación yace sobre las calizas mesozoicas y las rocas de la formación

Cruz Blanca, y está cubierta por la formación Xáltipan.

Una vez entrado el Cuaternario, y a inicios del Pleistoceno, aparecen una serie de derrames ignimbríticos a los que se denominó ignimbrita Xáltipan (Qign). Por el ascenso de magmas andesíticos se provocaron vacíos en la cámara magmática con los que se indujo el hundimiento del techo; este fue el mecanismo de formación de la caldera de los Humeros. Este material se depositó en las zonas más bajas de la superficie, hacia el perímetro Noreste de la Caldera, en el lecho del río Apulco dentro de la sierra de Tlaxco, y en las inmediaciones de ésta hacia los poblados de Cuyuaco, San Andrés Payuca y Libres.

Apareció en esa época la caldera de explosión Buenavista (Qxb) al sur del cerro Oyameles, además de algunas otras calderas alrededor y circunscritas dentro de la Caldera de los Humeros.

Posteriormente se formó la riolita Oyameles (Qrio) a base de domos riolíticos, derrames esferulíticos, vitrófidos riolíticos, traquíticos y riolodacíticos, así como por tobas riolíticas. De este material fue formada la porción sur de la caldera de los Humeros, el seno del cerro Pinto, el cerro Pizarro y los domos de las Derrumbadas que han sufrido intensas erosiones debidas a su composición mineral, formando a la vez corrientes de lodo y lahares. Las rocas de la formación Teztlutlán y las Ignimbritas Xáltipan actúan como soporte de estas formaciones, mientras que sobre ellas yacen los derrames de la formación San Antonio.

Esta última consta de una serie de derrames de composición andesítica y basáltica. Cuenta con dos miembros denominados Orilla del Monte (Qso) y La Viola (Qsv), y están cubiertos por los derrames de la formación

Tenamascatepec, de la cual se hablará más adelante, y por los lahares de las Derrumbadas y los sedimentos lacustres. Se ubican por lo general en el centro de la caldera de los Humeros. A esta formación corresponde también la aparición del vulcanismo básico (Qvb) compuesto por escorias y basaltos, que se encuentran extensamente en el área; existen otras zonas de mayores volúmenes como la franja volcánica de San Salvador el Seco, la zona de las Derrumbadas y cerca de los poblados de la Gloria y Guadalupe Victoria.

Los sedimentos lacustres (Ql) en la Cuenca provienen de la erosión de las rocas calizas, ígneas intrusivas y extrusivas anteriormente mencionadas que se intercalan con productos de origen piroclástico. La extensión de las lagunas El Carmen (Totolcingo) y Tepeyhualco quedó rodeada por grandes espesores de material pumítico, ignimbrítico, tobas y cenizas volcánicas provenientes principalmente de la caldera de los Humeros. Estas lagunas han sido la manifestación de lo somero que en condiciones vírgenes es el nivel freático en la cuenca. Los sedimentos lacustres tienen bajas características acuíferas, aunque debajo de ellos existen materiales con buenas propiedades de porosidad y permeabilidad.

A mediados del Pleistoceno aparecen también pómez (Qpo) y tobas (Qto). El primero llega a tener espesores de más de 50 metros en bancos que constituyen el talud oeste del Pico de Orizaba y el Cofre de Perote, así como en espesores de 2 a 15 metros en una franja irregular que va de NE a SW del cerro de las Aguilas al poblado de Libres, y logra rodear la sierra de Tepeyhualco. Los pómez y las tobas cubren todo tipo de rocas, aunque generalmente descansan sobre las ignimbritas Xáltipan. Por otro lado, las tobas llegan a tener espesores mayores que los 20 metros en las laderas de la sierra de Soltepec y al sur de la de Tlaxco, donde se

manifiestan amplios derrames. Sobre este material se asienta el poblado de San Lorenzo Cuapixtla, extendiéndose la formación hasta el poblado de Xicoténcatl.

Posteriormente aparecen los lahares de las Derrumbadas (Q1a) en una matriz areno-arcillosa con un espesor estimado de 50 a 150 metros. Algunos de éstos sólo cayeron desde la cima y no lograron desplazarse, actuando como talud o pie de monte, mientras que otros se separaron hasta una distancia de 5 km.

Los materiales de las calderas de explosión y cenizas de composición básica (Qme) se desarrollaron aproximadamente en el último tercio del Pleistoceno, y se encuentran distribuidas en casi toda el área sur y centro, correspondiendo a las últimas manifestaciones volcánicas en la zona. En gran mayoría son de explosión freática, aunque el cerro El Pinto y la laguna de San Miguel Tecuítlapa son de tipo magmático y freatomagmático respectivamente.

Finalizando el Pleistoceno aparece la formación Tenamascatepec, que para su estudio ha sido dividida en dos miembros: El Limón (Qt1) y Arenas (Qt2); el primero consta de andesitas basálticas y basaltos, aflorando en toda el área, principalmente en el cerro Malpais y al sur de la caldera de los Humeros en derrames muy fluidos a partir de la falla calderítica sur, formando "lenguas" del material con dirección hacia Tenex-tepec, Tepeyehualco y El Limón. El miembro Arenas no es tan abundante; está formado por dacitas y andesitas de piroxenos y se ubica principalmente en la laguna de Aljojuca y en algunos Xalapaxcos. Estas formaciones cubren de manera discordante los derrames de la formación San Antonio.

Por último, durante el Holoceno, se formó el Aluvión (Qal) a partir de rocas volcánicas y piroclásticas, principalmente pómez, arenas y cenizas; se localizan siempre en las zonas más bajas y planas.

El estudio presenta también 5 secciones geológicas de la cuenca obtenidas a partir de métodos eléctricos resistivos. Estos perfiles dan una idea de cómo ha sido la evolución geológica de la zona. Hacen especial énfasis en la zona de la caldera de los Humeros y los domos de las Derrumbadas por ser en esos lugares en donde existen las más claras manifestaciones geotérmicas. En ellas, pueden verse el complejo basal, los plegamientos de las formaciones calizas, la aparición de las rocas volcánicas y la ocupación de las partes bajas por sedimentos lacustres, aluvión u otros.

Para completar la información geológica de la cuenca recabada de los estudios mencionados se obtuvieron planos geológicos editados por el I.N.E.G.I.; las escalas de los planos son de 1:50,000 y 1:250,000. En ellos se hace una descripción de las unidades litológicas que afloran a la superficie. Se puso especial atención a la zona este de la cuenca ya que el Proyecto Geotérmico Los Humeros - Las Derrumbadas no cubre esa área.

El conglomerado (Qcg) que se ubica a las faldas de la Malinche es de origen continental con clastos de caliza, arenisca, pedernal y basalto, subangulosos a subredondeados, sostenidos por una matriz areno-arcillosa poco consolidada y pobremente cementada. La unidad sobreyace a calizas del Cretácico Superior, posiblemente de la formación Méndez o Mezcala, o a tobas básicas y areniscas - conglomerados del Cuaternario; la expresión topográfica es de lomeríos suaves y aflora hacia el extremo suroeste del área bajo los poblados de San Juan Ixtenco y Trinidad Sánchez Santos. Se

estima que su aparición fue hacia el Cuaternario, probablemente después de las tobas y antes de los lahares.

La brecha sedimentaria (Ts(bs)) es una unidad compuesta por fragmentos angulosos de andesita que varían ampliamente en sus tamaños; estos fragmentos son el producto del fracturamiento y acarreo en las laderas del volcán La Malinche, aunque el fracturamiento es escaso, además de tener un intemperismo somero y una permeabilidad mediana. Se calcula que data del Terciario Superior, más o menos en la misma época que la formación Teztlutlán.

Se presenta el plano 2.1.1 con base en el plano geológico del I.N.E.G.I. La extensión de las formaciones geológicas del plano de dicha dependencia y del plano de la referencia 2 en ocasiones no coinciden; se consideraron las extensiones de formación asignadas por el estudio de la C.F.E. [1980]

2.2 Resumen y procesamiento para el modelo del acuífero

De la descripción anterior se hizo la tabla 2.2.1 en la que se asienta una relación de las formaciones geológicas con la porosidad y la permeabilidad de las mismas con el fin de definir cuáles son las zonas que superficialmente formarían parte del acuífero. Esta relación está fundamentada en el análisis y comparación de las formaciones geológicas con la descripción que aparece en Davis y DeWiest [1966] y en la descripción que de su textura se hace en los estudios revisados.

Tomando en consideración la interpretación de los perfiles geofísicos dentro del proyecto "Actividades de carácter geohidrológico

Tabla 2.2.1. Relación de las formaciones geológicas con sus capacidades acuíferas.

Era	Sis	Periodo	Formación y simbología	Descripción	η [%]	K^{**} [md]	Pertenece al acuífero	
M E S O Z O C O N I C O	J U R Á S I C O	C R I T I C O	Tamán (Jt)	Lutitas y Calizas	1	< 1	No	
			Pimienta (Jp)	Calizas, Dolomitas y calizas arcillosas	5	< 0.5	No	
	C R E T Á C E O	I N F E R I O	T A M A U L I P A S	Tamaulipas Inferior (Kti)	Calcilutitas	1	< 1	No
				Orizaba (Kor)	Calizas arrecifales	22-30	40-340	Sí
		M E D I O	T A M A U L I P A S	Tamaulipas Superior (Kts)	Calizas ligeramente arcillosas	4.1	< 1	No
				Guzmantla (KgZ)	Caliza microcristalina (Oolita)	22-30	1-10	No
		S U P E R I O R	M A L T R A T A	Maltrata (Kmt)	Caliza arcillosa	30	< 0.5	No
				Agua Nueva (Kan)	Caliza arcillosa con pedernal	30	< 0.5	No
				Sn Felipe (Ksf)	Caliza arcillosa	30	< 0.5	No
				Méndez (Km)	Margas, calizas y lutitas	1	< 1	No
M E Z C A L A	M E Z C A L A	Mezcala (Kmx)	Areniscas y lutitas	10	1	No		
		T E R C I A R I O	I G N E A S	Igneas intrusivas (Ti)		0	0	No
Metamórficas asoc. (Skarn)	Skarns y Mármoles			< 5	0.01	No		
Cruz Blanca (Tccb)	Conglomerados, arenas y arcillas			30	10	No		
Teziutlán (Tpan)	Andesitas, basaltos y and. basálticas			1-5	1-10	No		

• Porosidad ** Permeabilidad

Tabla 2.2.1. Relación de las formaciones geológicas con sus capacidades acuíferas. (Continuación)

Era	Sis	Periodo	Formación y simbología	Descripción	η^* [%]	K^{**} [md]	Pertenece al acuífero
C E N O Z O I C O	C U A N T O R I O	Reciente	Xáltipan(Qign)	Ignimbritas	14	20	Si
			Oyameles(Qrio)	Riolitas	< 1	1-10	No
			San Antonio (Qsv y Qso)	Andesitas y basaltos	1-5	50	Si
			Vulcanismo básico (Qvb)	Escorias y basaltos	36	14	Si
			Sedimentos lacustres (Ql)	Arcilla y limo	10	< 1	No
			Pómez y tobas (Qpo y Qto)		40	11.5	Si
			Lahares (Qla)	Arena arcillosa	10	10	Si
			Cenizas básicas (Qme)		50	2000	Si
			Tenamascatepec El Limón (Qt1)	Andesitas basálticas y basaltos	1-5	50	Si
			Tenamascatepec Arenas (Qta)	Dacitas y andesitas de piroxenos	1-5	30	Si
		Aluvión (Qal)	Pómez, arenas y cenizas	50	2000	Si	

* Porosidad ** Permeabilidad

complementario en el Valle de Puebla y Cuenca de Oriental en el estado de Puebla" (1985) y los cortes litológicos del estudio "Las aguas subterráneas del sistema Apan-Oriental", se evaluaron los espesores de los materiales permeables.

Para el caso de los perfiles geofísicos, el primero de ellos, que va del poblado de Nopalucan de la Granja al de Oriental, y el sexto, cuya dirección es E-W aproximadamente, y que pasa sobre el poblado de San Lorenzo Cuapiaxtla, se desarrollaron en casi toda su longitud sobre capas de sedimentos lacustres y aluvión desde los 10 a los 40 metros de profundidad en el extremo SW de la zona en cuestión, ampliándose estos hasta espesores de 140 metros hacia los poblados de El Carmen y Oriental.

En los perfiles geofísicos, se anotaron los sitios en los que los materiales se encontraban superyaciendo a capas arcillosas. Dentro de los alcances de este estudio, cabe hacer notar que las zonas que mayores espesores permeables presentan son las que existen al sur del cerro de las Derrumbadas hasta llegar a Ciudad Serdán, y que además se encuentran exentos de arcillas (perfiles 2, 3 y 5), y son del orden de los 120 m hasta los 300 m. En general, estos perfiles se desarrollaron sobre materiales lacustres, aluvión, pómez y calizas de composición básica.

Por otro lado, el perfil geofísico número 4 que se extiende del cerro del Brujo al cerro de las Derrumbadas, viene a ratificar que el fenómeno de plegamientos ha sido sumamente intenso, ya que se encontraron espesores permeables que van de los 20 hasta los 210 m, descansando por lo general sobre capas arcillosas, información que a su vez fue corroborada por diversos cortes geológicos hechos en la zona. Algo muy similar ocurre con el séptimo perfil, que se dirige de la laguna de Alchichica al poblado de

San Antonio el Limón, a lo largo del cual se constata la complejidad geológica de la zona, ya que existen fuertes fluctuaciones de los espesores permeables, los cuales varían desde 8 ó 10 m hasta los 270 m.

En cuanto a la información que ofrecen los registros geológicos del estudio de "Las aguas del sistema Apan-Oriental", se refiere ésta en general al área comprendida dentro del triángulo formado por las poblaciones de Libres, Oriental y Tepeyehualco de Hidalgo. Aquí, el acuífero está formado por muchos estratos de materiales tales como gravas, arenas y pómez intercalados entre sí y en algunas ocasiones entre capas de tepetate, arcillas, tobas y basaltos. Al parecer, los espesores resultan de mayor magnitud en el centro del triángulo que en el perímetro del mismo, lo que resulta justificable con base en el tipo de material del que está compuesta la zona, y en la topografía de la misma; los espesores permeables son hasta de 90 metros.

Algunos cortes geológicos ubicados al sur de la laguna de Quechulac indican la presencia de espesores permeables de hasta 148 m, compuestos en su mayoría de aglomerados, escorias, gravas, arenas y basaltos alterados; mientras tanto, en la zona colindante con el poblado de San Luis Atexcac, el acuífero se ve confinado por espesores de basalto sano, y está constituido por materiales piroclásticos, cenizas y gravas.

En la zona que se extiende de Zacatepec a la Laguna del Carmen (Totolcingo), algunos cortes geológicos muestran los intensos plegamientos y procesos de erosión posteriores, ya que existen capas de materiales similares de un corte a otro a diferentes profundidades; se presentan además niveles piezométricos muy someros que descansan sobre capas arcillosas en espesores que van de los 20 a los 40 metros.

Cerca del poblado de Eréndira se realizaron perfiles geofísicos que reportan espesores muy variables de las formaciones, yendo de 20 a 150 metros en rocas clásticas de tipo arenoso, pero con permeabilidades bajas a medias.

El estudio geohidrológico del área de Ciudad Serdán elaborado por Geoservicios S.A. de C.V., marca en su plano 6.1 un extenso desarrollo de depósitos aluviales hasta Ciudad Serdán, que resultan un tanto cuestionables debido a que no existen en la zona corrientes fluviales que pudiesen aportar tales materiales, además de que no se justifica la presencia de los mismos. En resumen, el material predominante en la zona es de tipo piroclástico en potentes espesores que finalmente encuentran hacia el sur las calizas arrecifales de la formación Orizaba. Las dos secciones geoelectricas elaboradas, y que se ubican 1 ó 2 km al este de Ciudad Serdán, aún cuando tienen algunas diferencias, presentan en general un arreglo del subsuelo muy semejante, dando al principio espesores vegetales de 4 m, posteriormente materiales granulares gruesos a través de 15 m más de profundidad, luego el mismo tipo de material aparentemente saturado en espesores de 110 a 150 m, y por último arenas y gravas que pudieran alcanzar profundidades mayores a los 300 m, completamente saturados.

CAPITULO TERCERO

GEOHIDROLOGIA DE LA CUENCA

3.1 Revisión de estudios geohidrológicos

En el año de 1960 fueron consignados en la referencia 1 un total de 228 pozos con un volumen de extracción de 89.8 millones de m^3 , incluyendo la aportación de algunos manantiales. En 1964 (ref. 18), el Ing. Ignacio Sainz Ortiz estima la potencialidad de la cuenca en 20.3 m^3/s , de los cuales 7 podrían ser exportados a la Ciudad de México sin perjuicio de las necesidades locales.

Para 1967, la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México terminó la cuantificación y localización de los aprovechamientos subterráneos, ya fueran éstos pozos o manantiales, con los que se conocieron los volúmenes de extracción; los manantiales se ubican lo mismo en sitios elevados que en puntos bajos de la cuenca, y de ellos se han aforado caudales de consideración como en la estación Manantiales, con 300 l/s, al norte de la laguna del Carmen con 40 l/s y cerca de Ciudad Serdán con 16 l/s. Para ese año se reporta un caudal de extracciones que asciende a $2.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

Con los aprovechamientos subterráneos de ese año pudo conocerse la configuración de los niveles estáticos regionales mediante planos de igual elevación y de igual profundidad del nivel estático. De este modo se encontró que las recargas al acuífero provienen de las sierras de Tlaxco y Citlaltépetl; de la primera de ellas existen dos drenes naturales, uno de ellos entre la Malinche y la sierra de Tlaxco y otro hacia la laguna de Tepeyahualco.

En la referencia 3 se menciona que tanto las configuraciones piezométricas como los análisis de la geoquímica del agua indican que el flujo se dirige hacia las planicies, en donde también existen recargas alrededor de las elevaciones volcánicas diseminadas en la zona. Tomando en consideración las elevaciones piezométricas de dos norias cercanas a la laguna de Totolcingo, existe un parteaguas hidrodinámico entre el poblado de Oriental y el cerro de las Derrumbadas, y sobre la prolongación de la traza del anticlinal Chantlico. Debido a ello los flujos se bifurcan al llegar a las planicies y existen dos fugas subterráneas: una hacia Perote y otra hacia la sierra de Soltepec.

Por otro lado, en la referencia 1 se dice que las pruebas de bombeo realizadas en régimen transitorio proporcionaron buenos coeficientes de transmisividad y almacenamiento. Algunas pruebas con penetración parcial sugirieron que el fondo impermeable se encuentra a 400 m de profundidad y ninguna se comportó como acuífero libre; sin embargo, estos datos deben de manejarse con cautela pues la corta duración de las pruebas impide una interpretación enteramente confiable de las mismas.

Así mismo, se calcularon flujos subterráneos a lo largo de 3 secciones; se reporta que en la primera de ellas, ubicada entre Lara Grajales y el Carmen, aporta a la zona de balance un caudal de $10.23 \text{ m}^3/\text{s}$; que por la sección Cd. Serdán - San Nicolás Buenos Aires - Zacatepec se introduce un gasto de $0.67 \text{ m}^3/\text{s}$, y que las secciones de entrada Oriental - Tenextepec y Quechulac - Cerro Pinto suman un total de $6.35 \text{ m}^3/\text{s}$. Se estimaron también las salidas subterráneas a través de la sierra de Soltepec con un caudal de $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$, y en la sección Tenextepec - Tepeyehualco - Zayaleta con un gasto de $6.35 \text{ m}^3/\text{s}$. En ese estudio se reporta que la evaporación asciende a $7.1 \text{ m}^3/\text{s}$, sin indicar mediante qué métodos fue calculada. Así fue como se estimó que por evapotranspiración se pierden $7 \text{ m}^3/\text{s}$, en la fuga hacia Perote $7 \text{ m}^3/\text{s}$ y hacia la sierra de Soltepec $3 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que las salidas por evapotranspiración podían ser recuperables abatiendo los niveles piezométricos mediante pozos y con la consecuente desecación de los lagos.

Las curvas de igual elevación de los niveles estáticos en 1970 y 1980 originan un comportamiento piezométrico básicamente igual al descrito con anterioridad, aunque afectado por los incrementos posteriores de las extracciones que consiguen bajar los niveles hasta valores de aproximadamente 10 metros en el área de la cuenca perteneciente al estado

de Tlaxcala.

La compañía I.T.S.S.A. [1985] realizó un estudio para la S.A.R.H. y publicó en su informe el censo de aprovechamientos subterráneos de 1984; existían entonces un total de 1021 pozos, de los que sólo 653 se encontraban operando. Del total, 711 fueron catalogados como pozos y 310 como norias. La información que otorga este censo señala que la mayor parte del agua extraída fue destinada a usos agrícola y ganadero.

Las compañías Proyesco [1980], Fotoin [1984] e I.T.S.S.A. [1985] obtuvieron coeficientes de transmisividad en sitios en donde no se tenía información. Algunos de los datos que proporciona la compañía Fotoin son de poca confiabilidad y difícilmente equiparables al resto de los resultados, por lo que no serán tomados en consideración.

Con la ayuda de las curvas de igual elevación de los niveles estáticos en 1984 y en particular con la nivelación del pozo 1023 en Perote, se precisó el sitio por donde se da la salida del flujo subterráneo de esa zona; se ubica en el norte de la cuenca a través de la barranca El Zorrillo.

Debido a lo somero que se encuentran los niveles estáticos en las planicies y a que existen extensas lagunas en el valle, resulta relevante el papel que juega la evapotranspiración en la zona. Por otro lado, en el perímetro de la misma, los niveles freáticos son muy profundos, lo que responde a la topografía y a la constitución geológica del suelo; se llega a profundidades de hasta 150 m cerca de Ciudad Serdán.

La referencia 3 coincide con el estudio de la C.H.C.V.M. [1967] en

señalar que la cuenca tiene una potencialidad de 17 m/s, pero subraya la imposibilidad de poder recuperar por completo esa cifra evitando las fugas subterráneas y la evapotranspiración, aunque concede el aprovechamiento de hasta 7 m³/s.

El estudio de la S.A.R.H. [1988] involucra exclusivamente la zona de la cuenca que pertenece al estado de Puebla y menciona que las fuentes de recarga que alimentan al acuífero son de origen pluvial y se captan por las infiltraciones que permite el tipo de rocas que lo conforman, aunque también por flujo subterráneo desde el estado de Tlaxcala. En él se hizo un balance de agua subterránea donde se menciona que la lámina de evaporación de la laguna del Carmen asciende a 1.736 metros a partir de una superficie de aproximadamente 65 km²; que recibe un flujo subterráneo de 33.3 millones de m³ desde las subcuencas de Huamantla, Libres y Serdán. Con base en estas estimaciones habría una disponibilidad, adicional a la extracción actual, de 110 millones de m³ anuales, si se evita la pérdida por evaporación de la laguna al hacerla desaparecer con el descenso del nivel freático.

3.2 Nueva información disponible

Además de los estudios a los que se hace referencia en el subcapítulo anterior, existen otros elaborados por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y por compañías de estudios de geología para la misma dependencia. Tal es el caso del proyecto "Acueducto Moctezuma". Existen también testimonios verbales de los pobladores de la cuenca, lo que no deja de constituir información histórica de relevancia. Tales comentarios se asentaron en la referencia 5 y se transcriben a

continuación:

- Los niveles regionales han tenido abatimientos que han ocasionado el agotamiento de muchas norias someras y de algunos pozos de zonas altas.
- Las manifestaciones superficiales de existencia de agua subterránea has disminuido notablemente; éstas son la desaparición de la laguna de Tepeyhualco desde 1975, el achicamiento del área de la laguna del Carmen y del caudal de los arroyos provenientes de las sierras del Citlaltépetl, la Malinche y Soltepec, y de los manantiales de la parte baja de la Cuenca.
- En los Xalapaxcos de Atexcac y de Alchichica el nivel del agua ha descendido aproximadamente cuatro metros desde su nivel original a Juzgar por las marcas en sus márgenes.

Lo aforos de los pozos del Proyecto Moctezuma, realizados en 1985 proporcionaron información de la zona sur de la cuenca, en las proximidades al este del poblado de San José Chiapa. La batería de pozos cuenta con 13 registros geológicos de los que se obtuvieron los espesores permeables de la zona, los cuales varían desde los 60 hasta los 110 metros o más. En ausencia de las transmisividades se calcularon las capacidades específicas de los pozos.

En el año de 1988 diversas compañías, tales como Servicios Técnicos Geofísicos S. C. y Perforaciones del Real S. A., se dieron a la tarea de hacer pruebas de aforo en la cuenca. Las pruebas se realizaron cerca de los poblados de Tlalchichuca, San Nicolás Buenos Aires, San Luis Atexcac, Tepeyhualco de Hidalgo y Quechulac. En ellos no se proporciona

Información relativa a la transmisividad de los pozos; sin embargo, se hechó mano de las capacidades específicas de los pozos para tener una idea aproximada de sus valores. Aparecen también los registros geológicos repectivos, lo que ayudó a complementar y corroborar los espesores del acuífero. Para el pozo cercano a Tlalchichuca, el espesor alcanza 40 metros, en San Nicolás hasta 75 metros, en Quechulac de 110 a 140 metros, en San Luis Atexcac de 60 a 110 m y en Tepeyehualco de 60 metros en adelante.

CAPITULO CUARTO

CUARTO CUADRO

APLICACION DE UN MODELO NUMERICO PARA SIMULAR EL FLUJO EN EL ACUIFERO

4.1 Procesamiento de la información disponible

En primer lugar se reprodujo el plano topográfico del I.N.E.G.I. para definir en él el parteaguas de la cuenca. Una vez terminado éste y a la luz de las consideraciones acerca de la geología, se dibujaron las zonas del acuífero que actuarían como impermeables. Para mostrar las características de permeabilidad de las formaciones que afloran en la cuenca se presenta el plano 4.1.1, el cual se basa en la tabla 2.2.1 y en

el que las zonas sombreadas representan las formaciones impermeables.

Entre muchos otros datos, el modelo necesita ser alimentado con las elevaciones topográficas medias de cada nodo con el fin de identificar la configuración espacial de la malla. Estas se obtuvieron de los planos topográficos editados por el I.N.E.G.I. en la escala 1:50,000 (y en menor grado en los de escala 1:250,000), de las elevaciones del brocal de los pozos de las referencias 1 y 3, y de los planos (escala 1:100,000) de la referencia 3. En algunas ocasiones los niveles de brocal de los pozos no concordaban con las curvas de los planos topográficos, es decir que tales elevaciones se encuentran fuera del nodo al que pertenecen, ya que dicha elevación no quedaba comprendida entre las curvas de nivel de ese elemento; por este motivo se optó por tomar la información de los planos del I.N.E.G.I., ya que son éstos los que más fielmente representan la topografía de la zona.

Los espesores del estrato permeable se obtuvieron de registros geológicos de algunos de los estudios, y de los perfiles geofísicos y cortes geológicos de la referencia 3; se utilizó el valor medio de los datos que se tenían a la mano. En cuanto a las transmisividades del acuífero, los estudios de 1966 y 1985 presentan los resultados de diversas pruebas de bombeo. Con base en ellas se obtuvo para el modelo la permeabilidad media del acuífero, resultando ésta de 2.9×10^{-4} m/s. A partir de este valor y el de los espesores permeables, se obtuvieron los coeficientes de transmisividad en nodos donde no se tenía un valor directamente.

En cuanto a los caudales de extracción del acuífero, se dispuso de los censos de pozos de los años 1966, 1984 y 1988. Para la modelación se asignó a cada una de los nodos de la malla el gasto correspondiente a la

suma de los gastos de las extracciones contenidas en el perímetro de esa celda. La magnitud de esos gastos se obtuvo del volumen de extracción anual, manteniéndose constante durante el transcurso de ese año. En el mapa 4.1.2 se muestran los caudales de extracción del año 1988 para cada celda de la malla.

4.2 Región modelada y fronteras

Con base en la revisión de los estudios y de los mapas geológicos, se decidió que todas aquellas formaciones que fuesen impermeables y que a su vez se localizaran en el perímetro de la cuenca quedarían fuera de la malla; en otras palabras, los elementos más exteriores del arreglo fueron los últimos que se ubicaron sobre rocas permeables.

Ya desde el estudio del año de 1966 se detectaron las salidas subterráneas al sur de la cuenca a lo largo de la sierra de Soltepec, así como al noreste, por debajo de la caldera de los Humeros y hasta la ciudad de Perote. Para simular esas salidas hubo necesidad de utilizar condiciones de frontera de carga piezométrica conocida; esto se logró en el modelo utilizando nodos en esas fronteras cuya carga se mantiene o se varía según una ley temporal preestablecida.

4.3 Malla y condiciones internas

Para un adecuado acoplamiento de las características geológicas e hidrográficas del acuífero, se formó una malla que aprovecha el relativo alineamiento de algunas formaciones en dirección NE - SW y el de otras en

dirección NW - SE. La inclinación de la malla con respecto a una línea E - W es de aproximadamente 42° en sentido antihorario, teniendo un número total de 282 nodos. La configuración final del arreglo puede observarse en el plano 4.3.1, así como la numeración de los nodos.

La malla se diseñó partiendo de una malla regular de cuadrados de 5000 m de lado; posteriormente se modificaron renglones y columnas para formar un arreglo final que logra acomodar a las fronteras impermeables entre nodos y los desarrollos lacustres.

Así por ejemplo, el cerro Pizarro queda en el elemento 216, el cerro de las Derrumbadas en los elementos 153 y 154, el cerro el Pinto en los nodos 163, 164, 176 y 177; además se separaron algunos elementos mediante barreras, para modelar así elevaciones como la sierra de Tlalchichuca, Tepeyehualco y Yolotepec, entre otras. Por otra parte, las lagunas también recibieron el mismo tratamiento, quedando el área permanente de la Laguna del Carmen en los elementos 94, 95, 106, 107 y 121, la de Tepeyehualco en los nodos 204, 205, 217 y 218 y el Xalapaxco de Alchichica en el elemento 207. Debido al reducido diámetro de los demás Xalapaxcos, se consideró poco adecuado tratar de representarlos en elementos de la malla, ya que hubieran resultado elementos demasiado pequeños.

4.4 Condiciones iniciales

Para iniciar la modelación fue necesario lograr que existiera en la cuenca un balance entre recargas, evaporaciones y salidas subterráneas; esa condición debe dar como resultado que los niveles piezométricos de

todos y cada uno de los nodos se mantengan constantes en simulaciones de flujo no permanente, salvo por las variaciones estacionales, que se consideraron semestrales; en efecto, la ocurrencia de las recargas en la modelación se consideró exclusivamente durante el semestre correspondiente a la época de luvias, mientras que para la evaporación se asignó el 65 % del total a ese intervalo, y el resto a la época de estiaje, de acuerdo con las observaciones que de evaporación se tienen en estaciones climatológicas de la cuenca, las cuales se obtuvieron de la referencia 4, ya que es esta la que reúne el periodo más largo de información. Son 4 las estaciones climatológicas en las que se midió la evaporación; de entre ellas se interpolaron los valores que se asignaron a cada nodo. Fue exclusivamente en los elementos de la malla donde existen lagos y en los nodos que están junto a éstos en donde se asignó un volumen de evaporación. La evaporación de los lagos y de las zonas cercanas a ellos, es decir, zonas con nivel freático somero, se calcularon con base en la fórmula de Akopyan [1966]:

$$E = E_0 \exp \{-a Z\}$$

donde:

E = lámina de evaporación de un acuífero freático a una profundidad
Z

E₀ = lámina de evaporación de una superficie de agua a la altura
del terreno

a = parámetro que depende del tipo de suelo (2.0 para este caso)

Z = profundidad del nivel freático

En el inicio de la calibración se debe considerar al acuífero como virgen, por lo que se buscó en la bibliografía los datos de piezometría más antigua que fue la de Julio de 1966; con base en ella se asignó a cada nodo el gradiente que le correspondía. Sin embargo, en esta

asignación existieron principalmente tres problemas: el no saber que valores atribuir a los nodos en donde no existe ninguna información, la ambigüedad que produce la muy estrecha cercanía de dos o más curvas en un sólo elemento de la malla y la interpretación del cruce de algunas curvas a través de formaciones geológicas que para esas fechas no se sabía que son impermeables.

Debido a que gran parte del agua extraída es utilizada para riego y que el suelo de la cuenca es muy permeable se simuló en el modelo el retorno del 35 % del volumen extraído.

En cuanto a las recargas, fue también de la publicación de 1988 de donde se obtuvo el valor de las infiltraciones iniciales de prueba mediante el plano de las isoyetas medias anuales del periodo comprendido entre 1931 y 1970. Esto se hizo midiendo las áreas impermeables de la cuenca y multiplicándola por la lámina de lluvia del elemento correspondiente y por un coeficiente de escurrimiento de 0.3, para posteriormente asignar esos volúmenes a los nodos a los que llegan los escurrimientos provenientes de las zonas impermeables mencionadas. El valor de las recargas medias anuales introducidas al modelo aparecen en el plano 4.4.1.

Sin embargo hubo que suponer los espesores y la piezometría de algunos elementos de la malla debido a que no se pudieron conocer por ninguna de las fuentes de información. Los sitios que mayor dificultad presentaron para tales efectos fueron la zona que va de la Malinche a Huamantla de Juárez, la Sierra de Soltepec y la laguna de Tepeyehualco.

4.5 Calibración

La calibración se dividió en dos etapas. La primera de ellas consistió en la obtención de las condiciones iniciales, tal y como se explica en el subcapítulo anterior, mientras que en la segunda se modeló el comportamiento del acuífero incluyendo las extracciones por bombeo. Para llegar a las condiciones iniciales de la primera parte fue necesario proponer diferentes distribuciones de la infiltración en la malla, además de modificar las transmisividades de algunos nodos, de modo que se alcanzara la condición de flujo establecido. Ello se hizo mediante calibraciones de prueba y error en donde la variable en observación fue la piezometría de los nodos, la cual debió mantenerse constante a lo largo de dichas simulaciones. Debido a que sólo se contó con los volúmenes de extracción de los años 1966, 1984 y 1988 se hizo una interpolación lineal con el fin de asignar a los años sin censo un valor coherente con la tendencia de las extracciones, suponiendo el inicio de éstas en el año de 1954.

Durante la segunda parte de la modelación, la evolución piezométrica dió resultados muy parecidos a los niveles observados en los años 1966, 1970, 1984 y 1988. Con los planos 4.5.1 y 4.5.2 puede hacerse una comparación de las piezometrías observada y calculada de 1967. Además de los planos mencionados se presentan las series de figuras 4.5.1 hasta 4.5.5 donde se comparan las piezometrías observadas y calculadas, pero esta vez para algunos nodos en particular durante el periodo comprendido entre 1966 y 1984.

En la primera de estas series se presenta el grueso de los nodos, cuya evolución piezométrica se logró modelar satisfactoriamente; sin embargo

en las otras cuatro se aprecian algunas fallas de modelación. En la serie 4.5.2 puede verse que los valores calculados de la piezometría están varios metros por arriba de los valores observados, aunque la tenencia del vaciado de ambas piezometrías es muy parecida; estas diferencias se deben principalmente a que los nodos a los que corresponden estas gráficas se localizan en sitios de muy difícil modelación con un tamaño de malla razonable, en los que los gradientes son muy pronunciados. Para la serie de figuras 4.5.3 sucede lo contrario: las piezometrías calculadas están debajo de las observadas; las causas de tales diferencias son exactamente las mismas que para la serie de figuras anterior.

Cabe hacer notar que la tendencia del vaciado de algunos nodos es mucho más fuerte para la piezometría observada que para la calculada, lo cual quizás se deba a que los coeficientes de almacenamiento de estos sitios son menores que en el centro de la cuenca. Cabe hacer notar que este fenómeno ocurre solamente en nodos perimetrales de la cuenca en donde además de existir fuertes pendientes topográficas, se presentan altos gradientes.

Por último, en las gráficas de la serie 4.5.4 se aprecia que los valores de la piezometrías observadas no siguen ningún patrón confiable de vaciado; para estos elementos es recomendable una revisión de las piezometrías.

En resumen, el no llegar a una modelación satisfactoria en ciertos nodos se debió fundamentalmente a tres razones. La primera es que, como ya se comentó en un principio, en ocasiones la información de una fuente contradice a los datos de otra. En segundo término, existen en la malla

nodos en los que aparecen varias curvas de elevaciones piezométricas debidas al alto gradiente, lo que otorga cierto margen de error. Por último, existen nodos cuya información piezométrica se consideró errónea, como es el caso de los nodos 23, 56, 186 y 189, por lo que su utilización quedó invalidada.

4.6 Predicciones

Una vez que se modeló hasta el año de 1990 se introdujeron en la corrida los gastos de extracción del proyecto Moctezuma y se dejó correr el modelo hasta el año 2010 para tener una idea de cómo serán los efectos que produciría en el acuífero la puesta en funcionamiento de esos pozos. El caudal de extracción total de dicho proyecto asciende a $2 \text{ m}^3/\text{s}$ y se localiza en la zona sur de la cuenca a unos 7 kilómetros al oriente del poblado de Santa María Ixtiyucan. Los resultados obtenidos se compararon con la tendencia que produciría la modelación con la extracción actual.

En la figura 4.6.1 se aprecia la diferencia en las piezometrias producidas por ambas alternativas en el centro del cono de abatimiento. El proyecto Moctezuma bajo estas condiciones logra bajar en dicho sitio hasta 5 metros el nivel piezométrico, además de influir hasta el final del periodo modelado en casi toda la zona sur de la cuenca, lo que se debe a que el valor medio de la permeabilidad (que a fin de cuentas incide en la transmisividad del acuífero) es mayor al utilizado por Cruickshank [1989]. Sin embargo es posible que en la realidad los niveles piezométricos logren bajar algunos metros más, ya que el uso en el modelo de fronteras de carga constante bajo la sierra de Soltepec impide un libre desarrollo del cono de abatimiento, por lo que las pérdidas por dicha sierra podrían ser menores.

CAPITULO CINCO

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El primer estudio que estimó la potencialidad de la cuenca fue el hecho en 1967 por la C.H.C.V.M., la que asciende a un caudal de $17 \text{ m}^3/\text{s}$, de los cuales $10 \text{ m}^3/\text{s}$ salen de la cuenca y $7 \text{ m}^3/\text{s}$ se evaporan de los cuerpos lacustres. En ese estudio no se sugiere cómo evitar la pérdida de tales volúmenes.

Por otra parte, la complejidad geológica no sólo se hace patente al analizar los planos y los perfiles geofísicos de la referencia 2; también

salta a la vista al revisar una gran cantidad de cortes geológicos que se han obtenido de diversos estudios, por lo que es necesario ampliar la información geológica para distinguir con mayor precisión los contactos entre formaciones geológicas permeables e impermeables a profundidad en el acuífero.

Según la referencia 4, de la laguna del Carmen se evapora anualmente un caudal de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual podía ser enteramente aprovechable al desecar la laguna con la extracción de esa cantidad mediante baterías de pozos. Cruickshank [1989] calcula con dos diferentes alternativas en el coeficiente de almacenamiento del acuífero los caudales de evaporación en 1.8 y $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$. La discrepancia entre éste autor y los anteriores es de gran relevancia ya que de ella se llega a la conclusión de que el acuífero se está sobreexplotando. Dicha diferencia se debe a la manera en que fue calculado el valor de la evaporación, ya que antes de Cruickshank [1989], el área de las lagunas se multiplicaba por una lámina de evaporación de más de un metro, mientras que en dicha publicación y en este trabajo, el caudal correspondiente dependió no sólo de la lámina disponible de evaporación, que en promedio es menor que un metro, sino también de la extensión de las lagunas.

Como resultado de la modelación del acuífero de la cuenca de Oriental, el cual toma en cuenta no sólo el balance de las aguas subterráneas, sino que también reproduce la evolución de la piezometría, se encontró que el caudal de recargas en el acuífero es de $10.5 \text{ m}^3/\text{s}$, que el caudal de evaporación de los cuerpos lacustres asciende a sólo $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$, y que las salidas subterráneas son de $8.4 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que al haber una disponibilidad de sólo $2.1 \text{ m}^3/\text{s}$ y una extracción de $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$ se le está sobreexplotando. Con base en estos resultados se llegó a las siguientes

recomendaciones:

- Continuar con el estudio del modelo con una malla más fina en la que no sólo se involucren las características geológicas de la cuenca, sino también los accidentes topográficos de relevancia que hayan quedado en el centro de alguno de los nodos.

- Ampliar el conocimiento de la geología de la cuenca mediante sondeos geofísicos, sobre todo en sus zonas sur y oeste, y muy particularmente al sur de la sierra de Soltepec y entre los poblados de Nopalucan de la Granja, Lara Grajales, Santa María Ixtiyucan y San Hipólito Soltepec.

- Realizar un levantamiento topo - batimétrico de las lagunas someras y tratar de inferir su proceso de azolvamiento en los últimos 40 años.

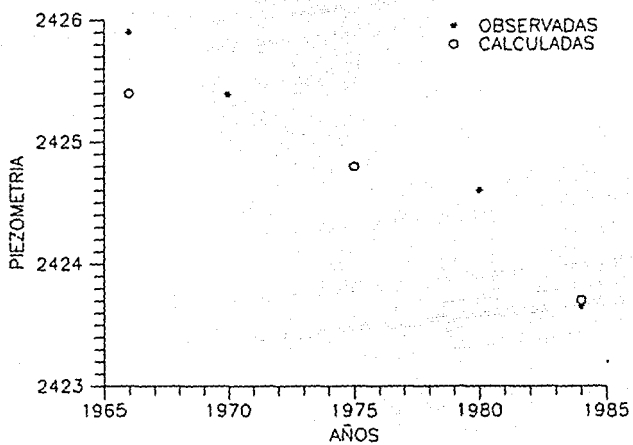
- Realizar mediciones piezométricas en los perímetros de la cuenca por donde existen salidas subterráneas con el fin de precisar el volumen perdido en estas secciones, ya sea para mejorar los datos existentes (sierra de Soltepec) o para contar con información desconocida hasta la fecha (caldera de los Humeros).

- Reevaluar y corregir los valores de la piezometría de aquellos sitios cuya información es errónea, ya que puede resultar de mucha ayuda, sobre todo al sur del poblado Santa María Ixtiyucan.

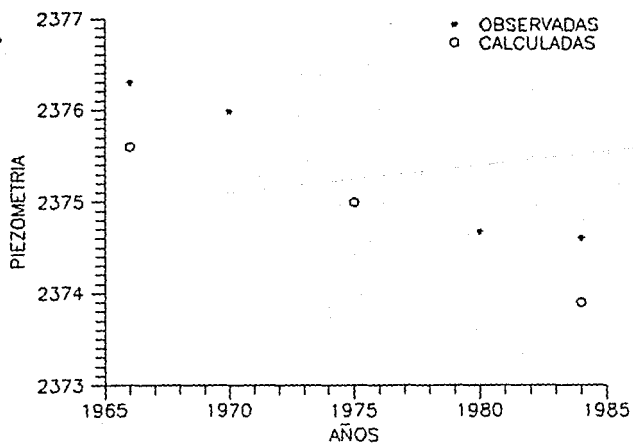
GRAFICAS

SERIE 4.5.1

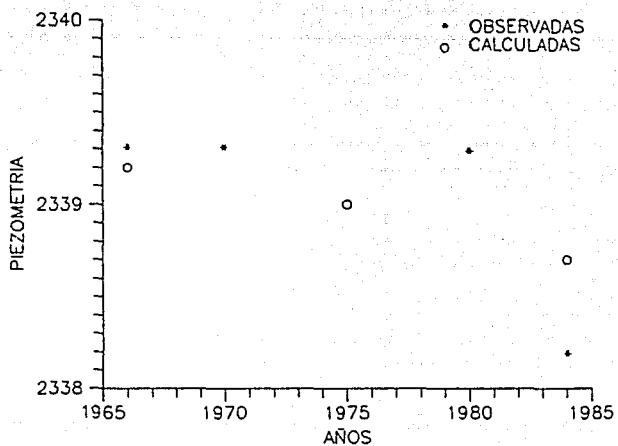
ELEMENTO 17



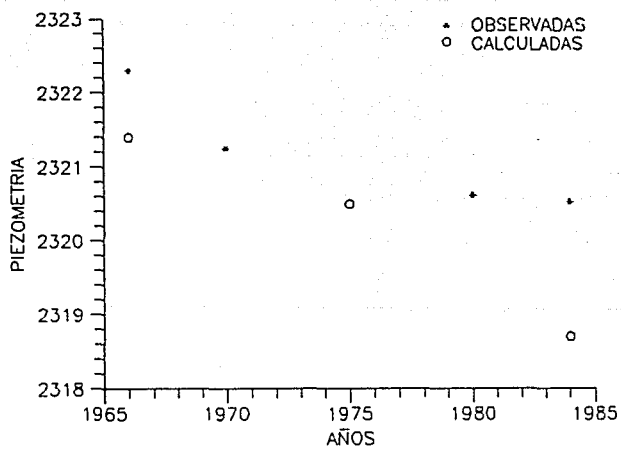
ELEMENTO 21



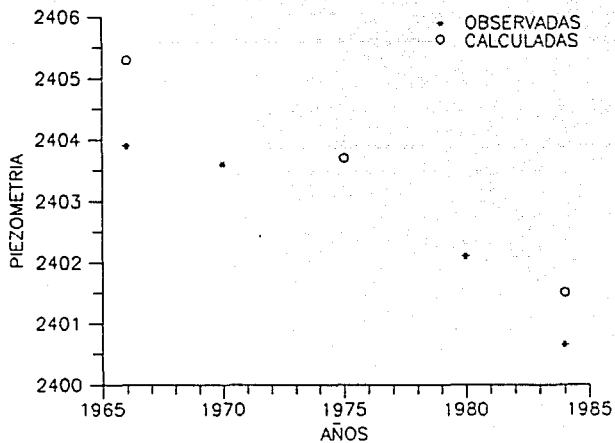
ELEMENTO 24



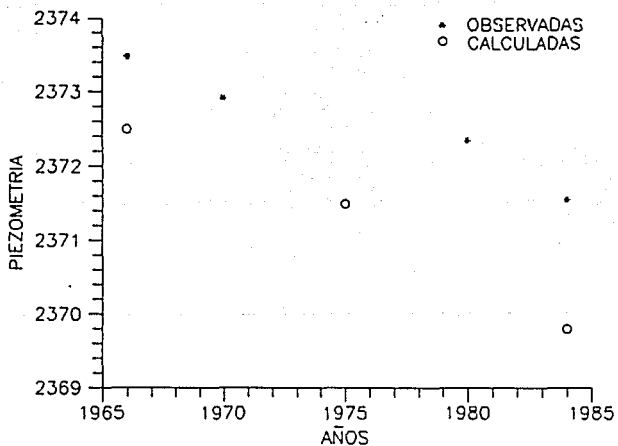
ELEMENTO 35



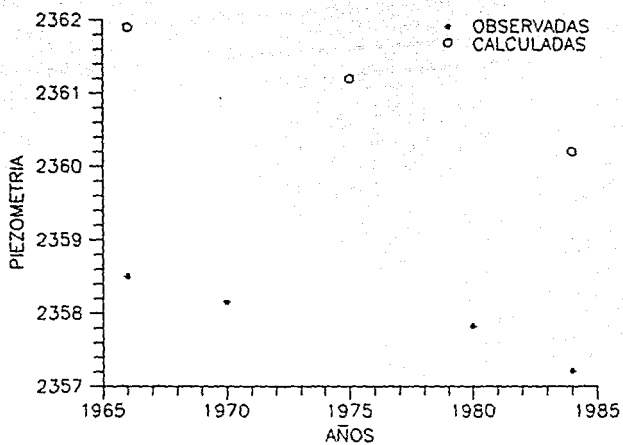
ELEMENTO 36



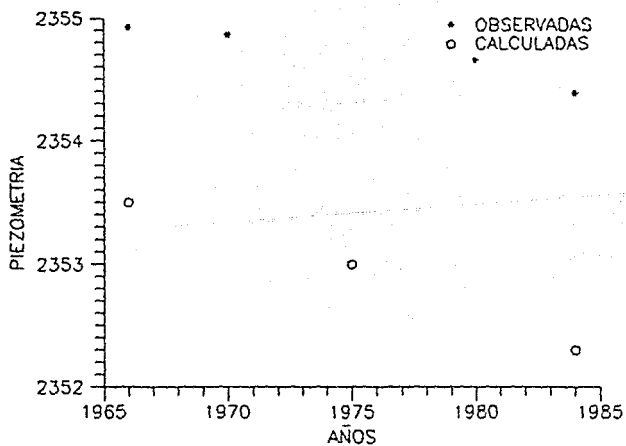
ELEMENTO 38



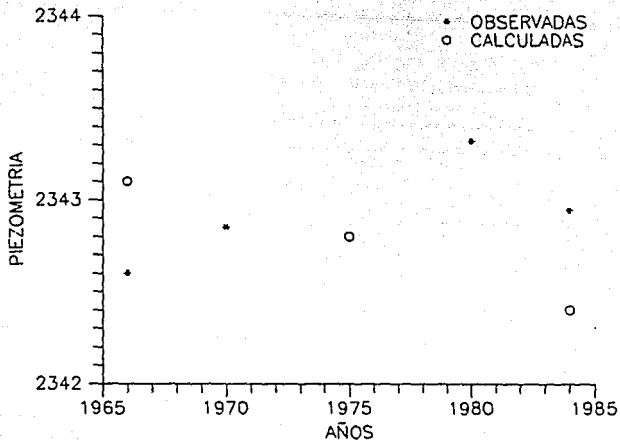
ELEMENTO 39



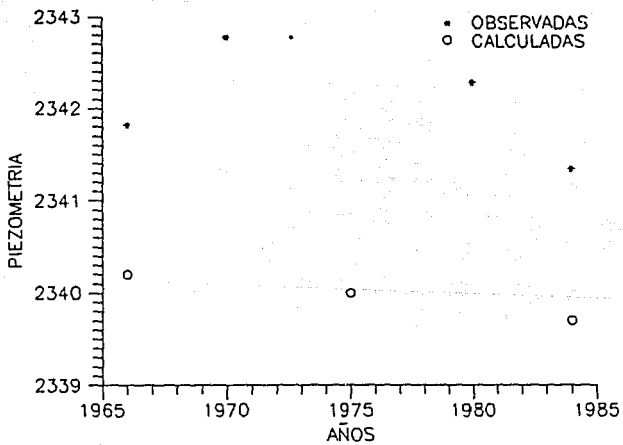
ELEMENTO 40



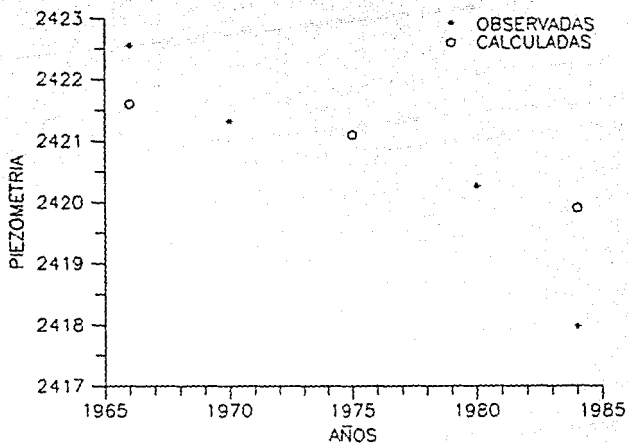
ELEMENTO 43



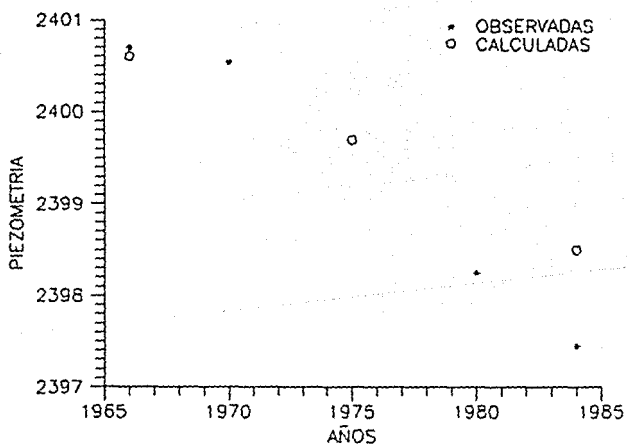
ELEMENTO 45



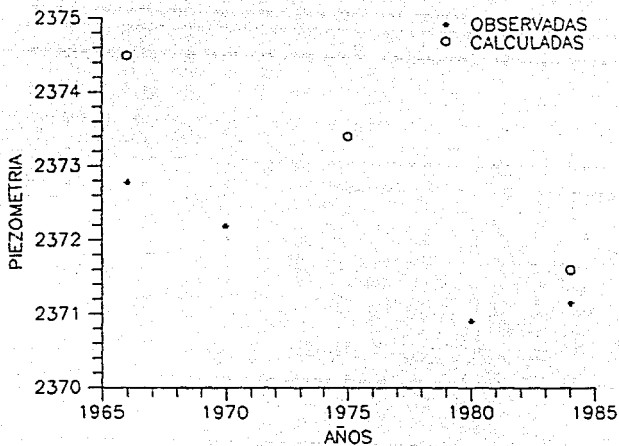
ELEMENTO 53



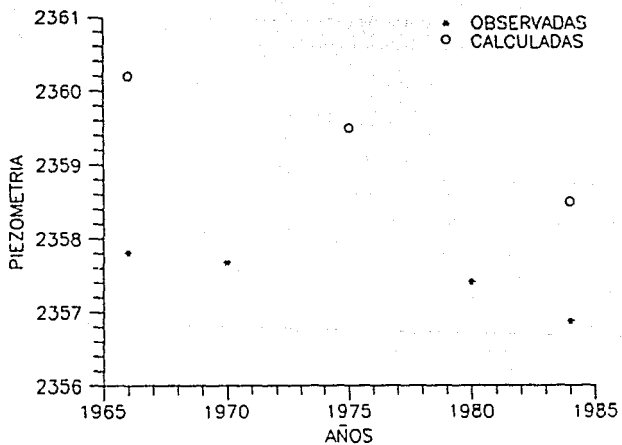
ELEMENTO 54



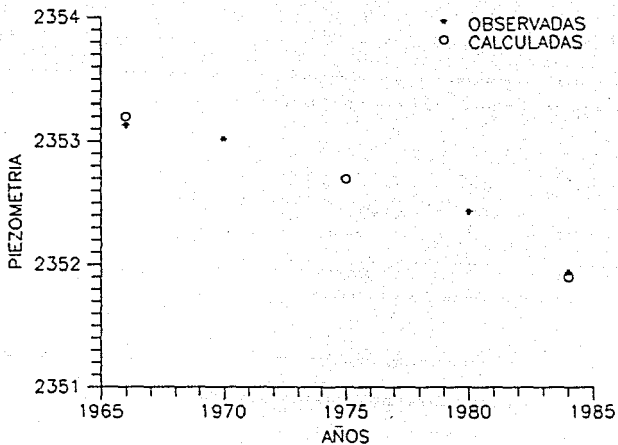
ELEMENTO 55



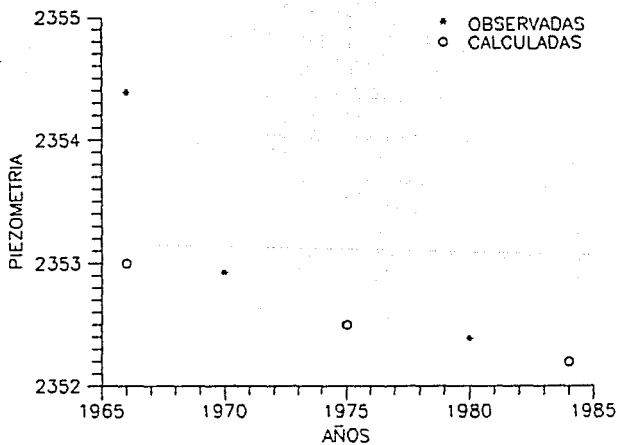
ELEMENTO 57



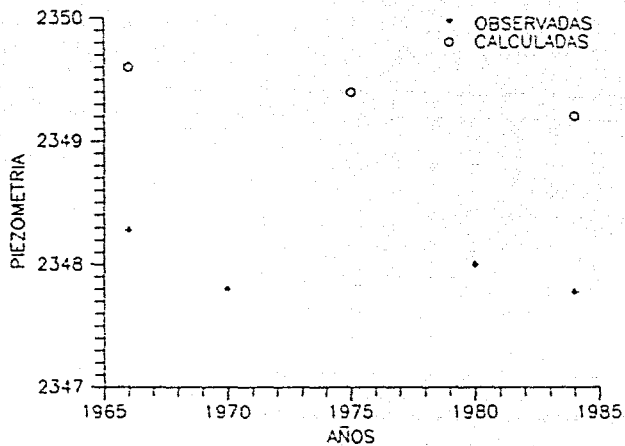
ELEMENTO 58



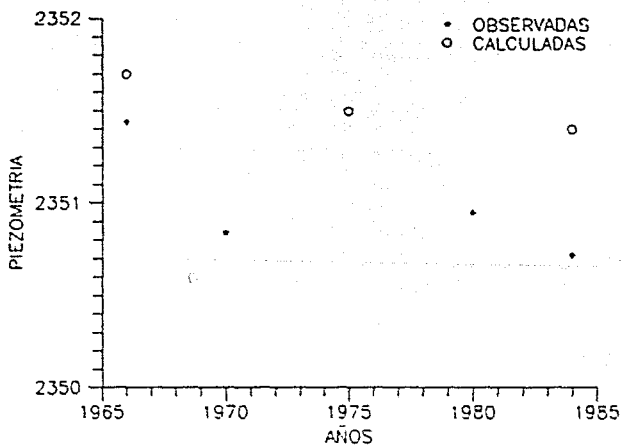
ELEMENTO 64



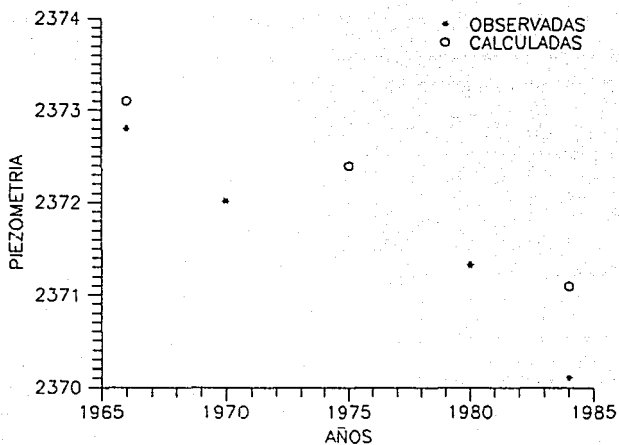
ELEMENTO 67



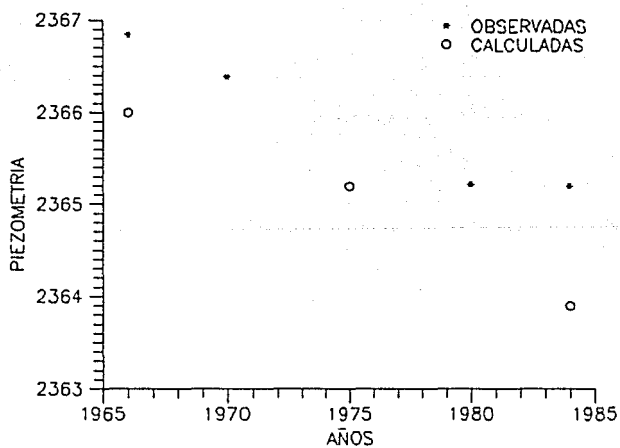
ELEMENTO 69



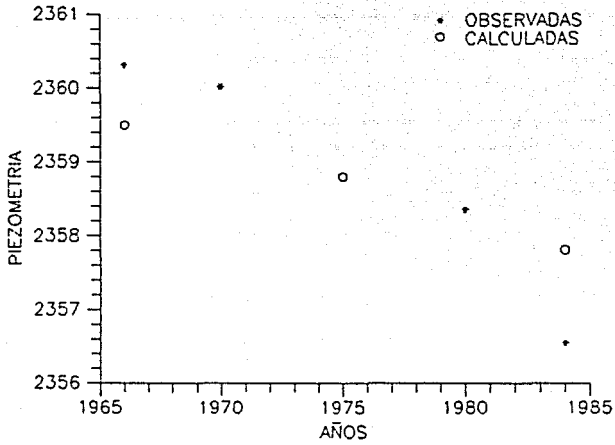
ELEMENTO 71



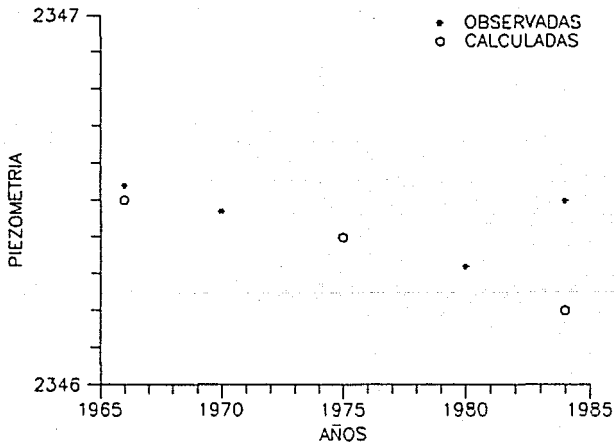
ELEMENTO 72



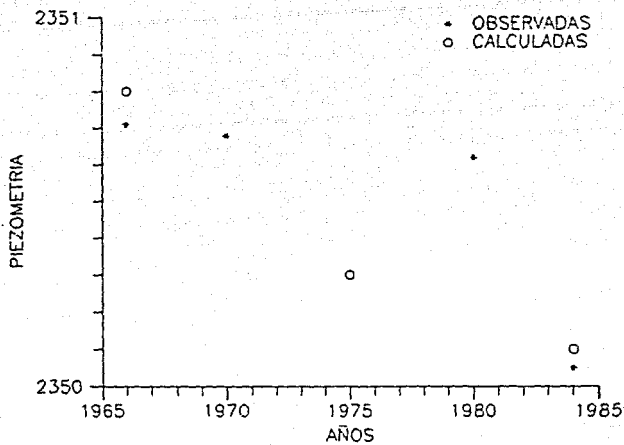
ELEMENTO 73



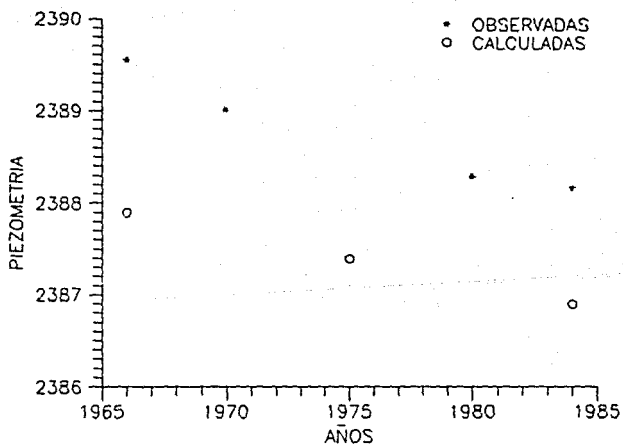
ELEMENTO 76



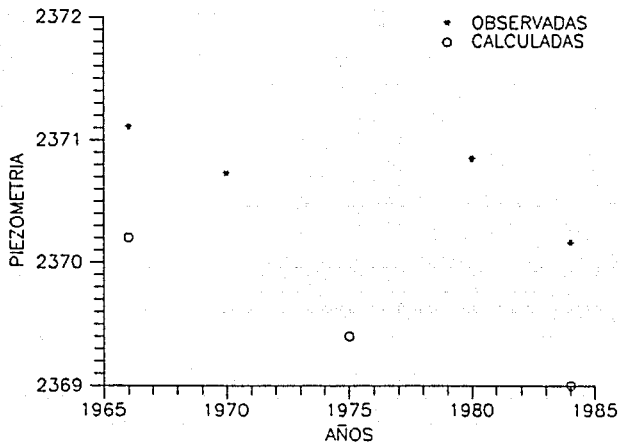
ELEMENTO 80



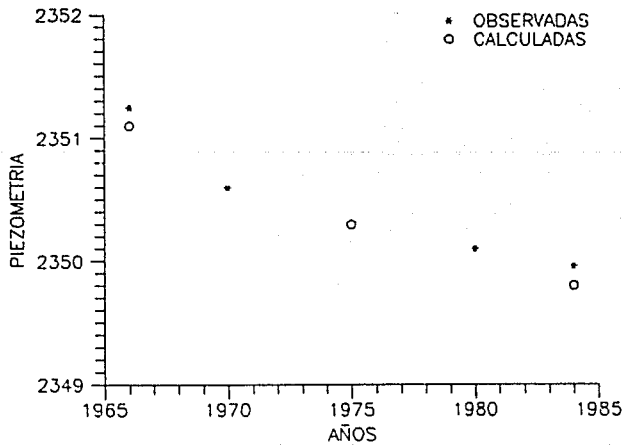
ELEMENTO 89



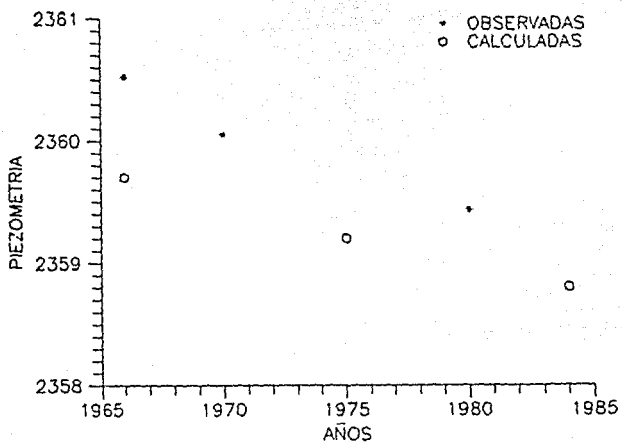
ELEMENTO 90



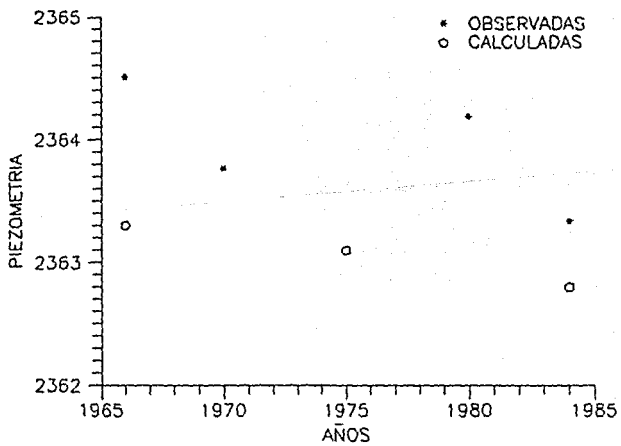
ELEMENTO 97



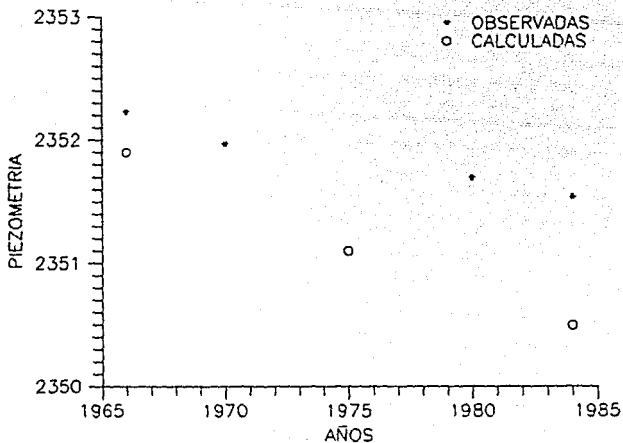
ELEMENTO 99



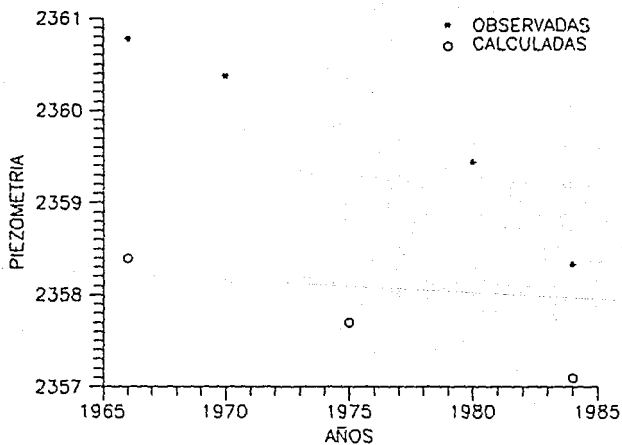
ELEMENTO 102



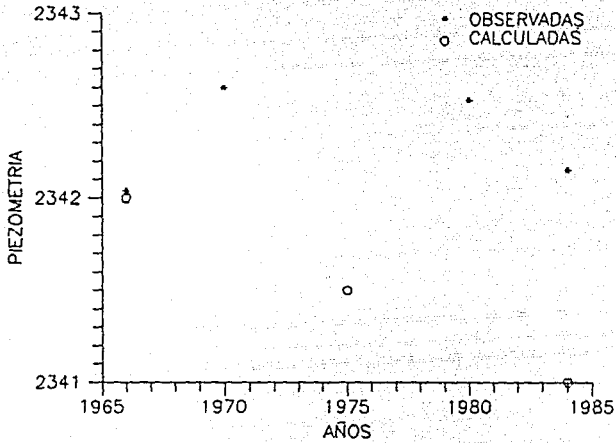
ELEMENTO 110



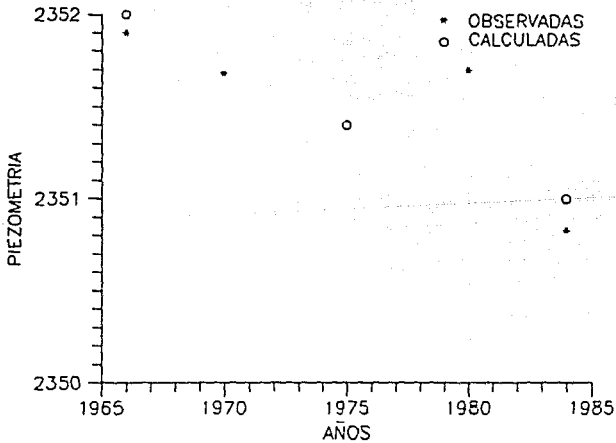
ELEMENTO 111



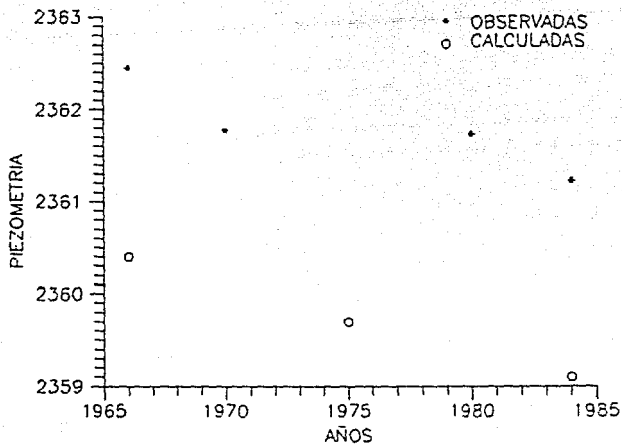
ELEMENTO 120



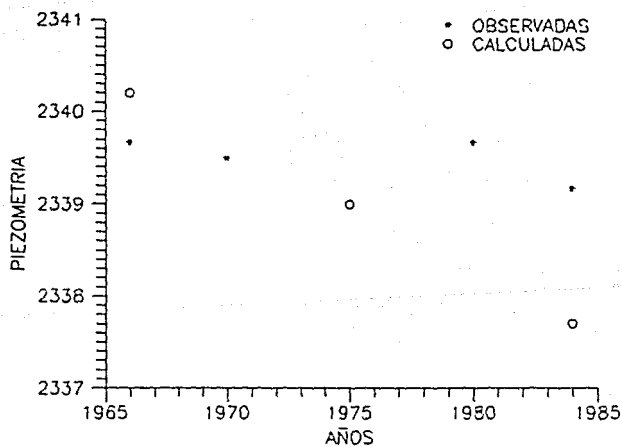
ELEMENTO 125



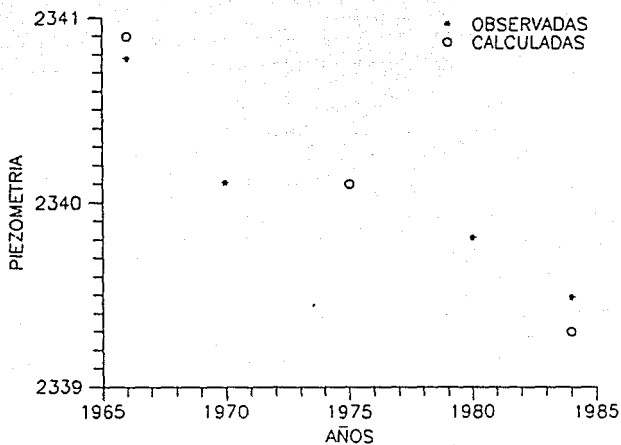
ELEMENTO 126



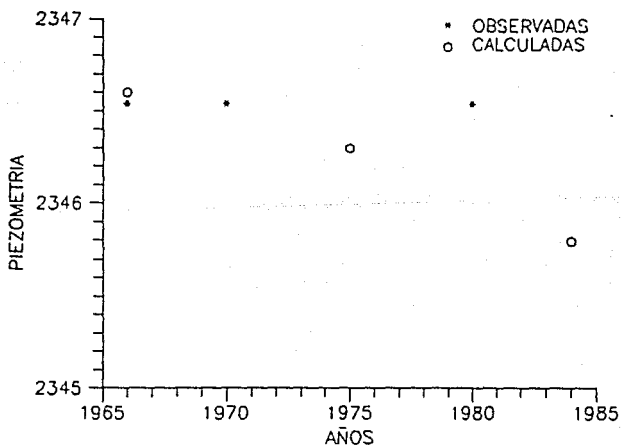
ELEMENTO 132



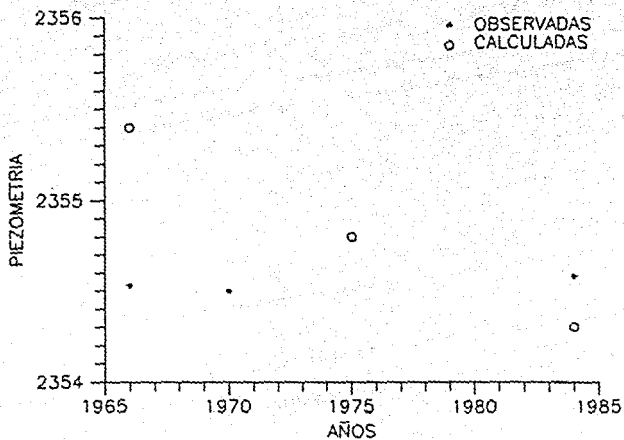
ELEMENTO 133



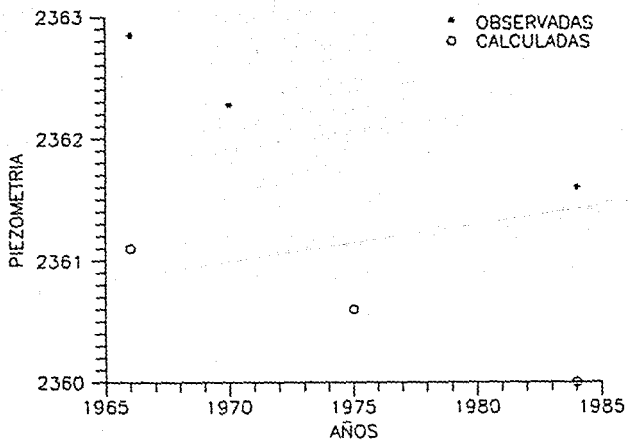
ELEMENTO 136



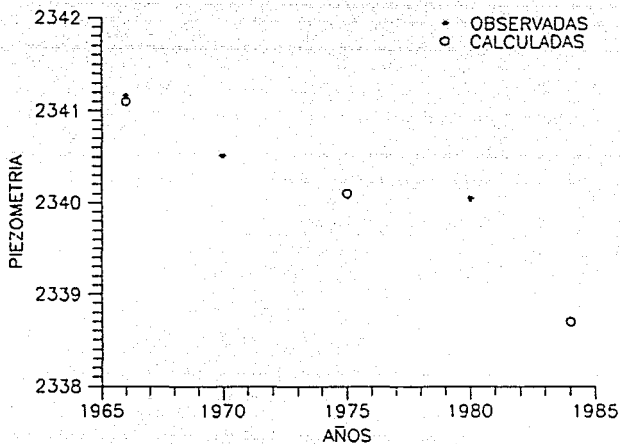
ELEMENTO 139



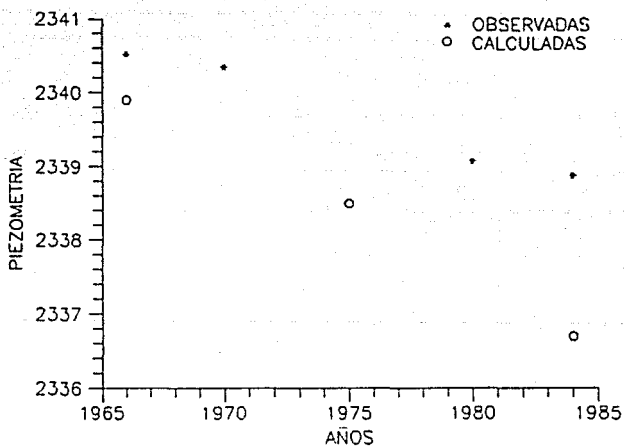
ELEMENTO 140



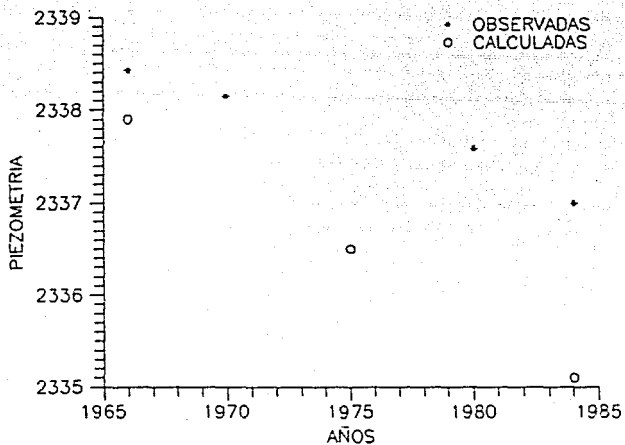
ELEMENTO 144



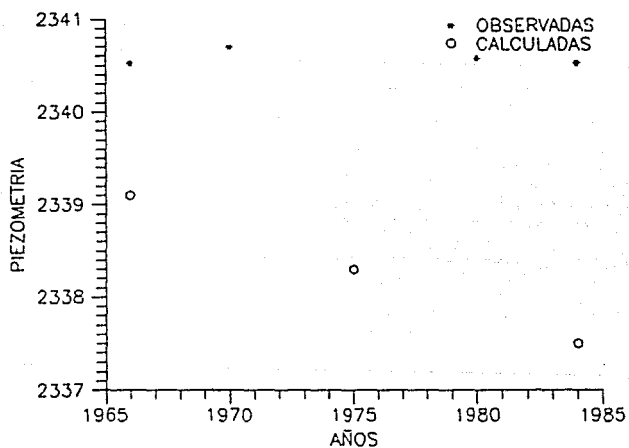
ELEMENTO 145



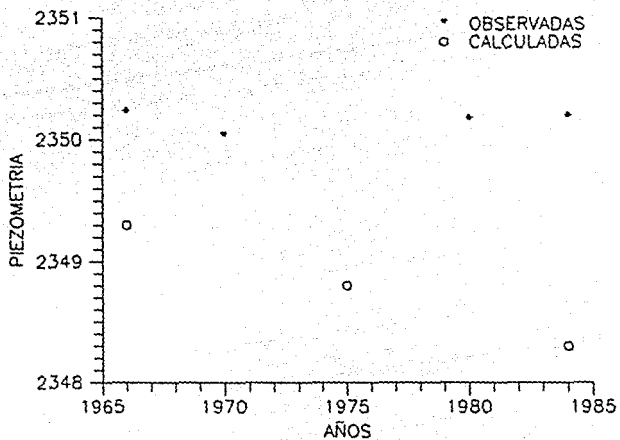
ELEMENTO 146



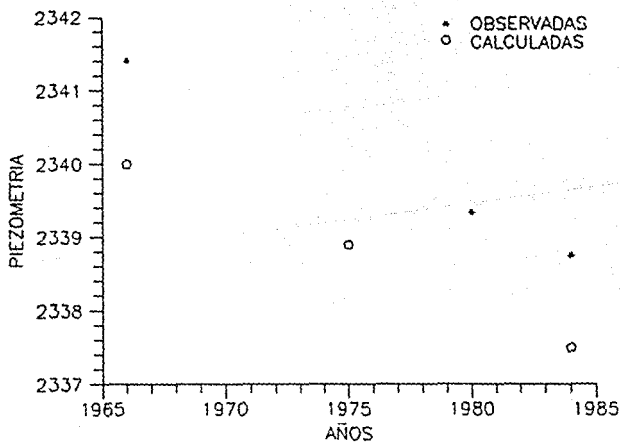
ELEMENTO 148



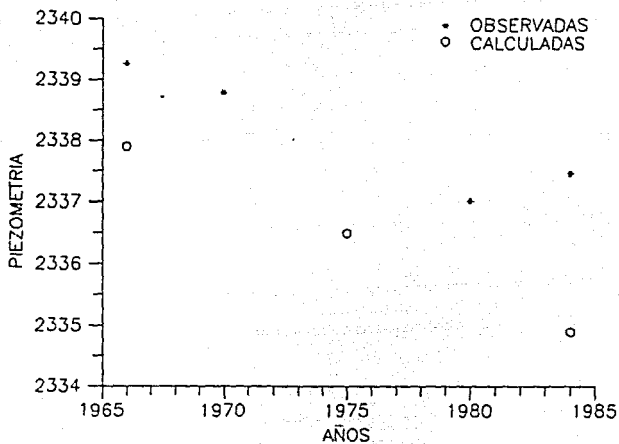
ELEMENTO 151



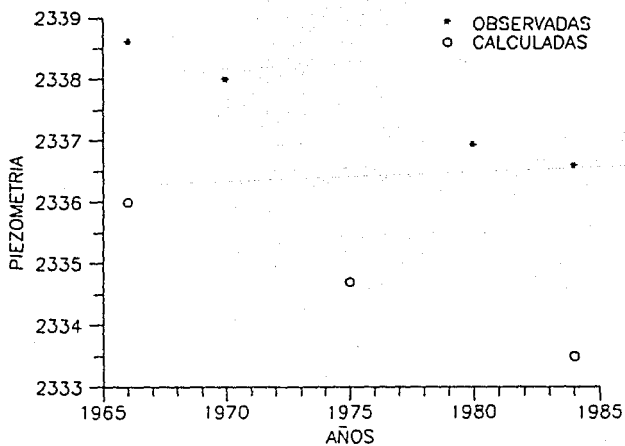
ELEMENTO 157



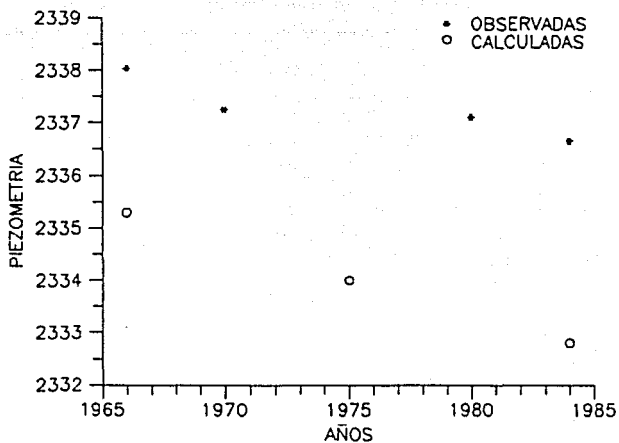
ELEMENTO 158



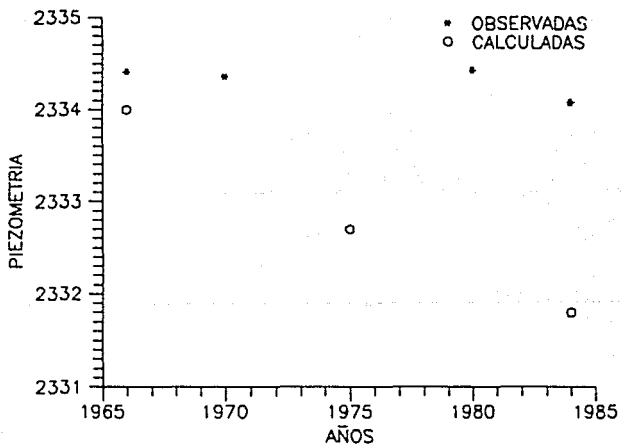
ELEMENTO 159



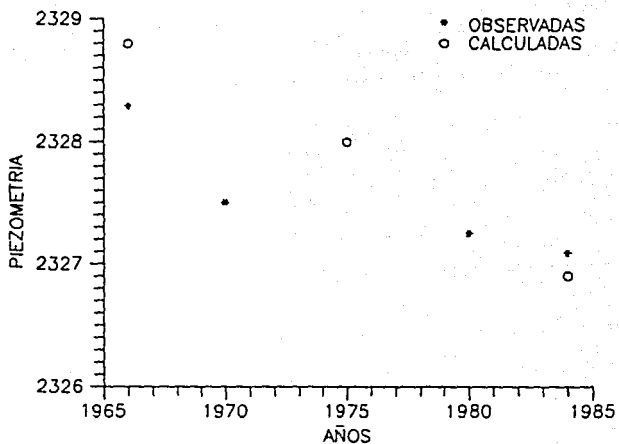
ELEMENTO 171



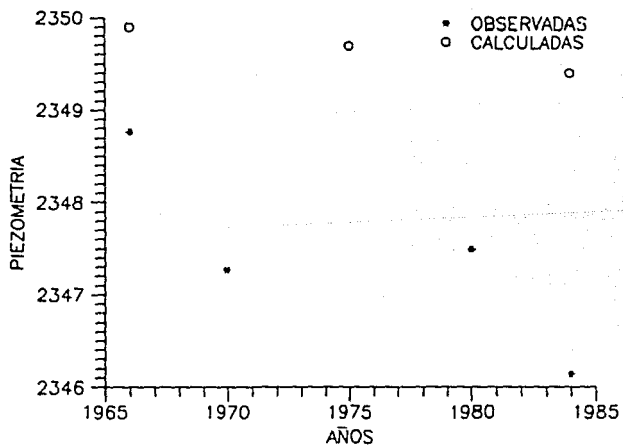
ELEMENTO 172



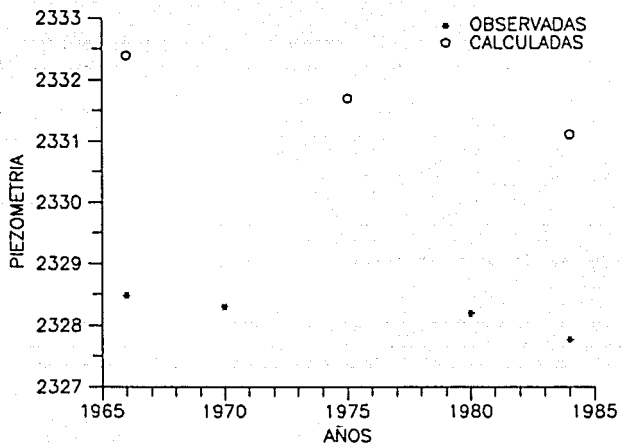
ELEMENTO 173



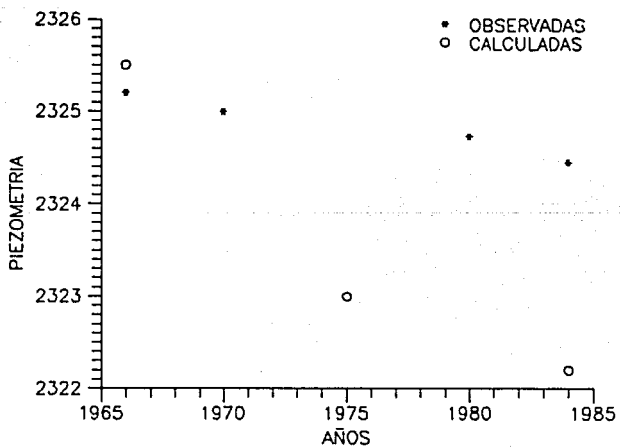
ELEMENTO 183



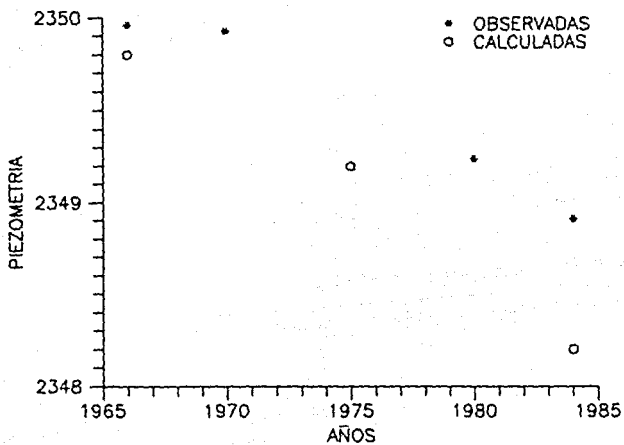
ELEMENTO 185



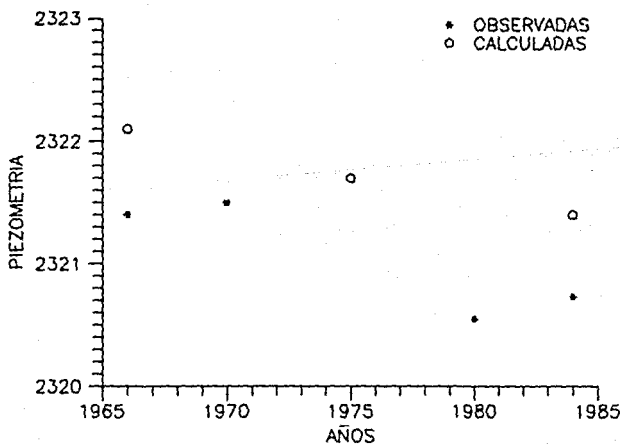
ELEMENTO 188



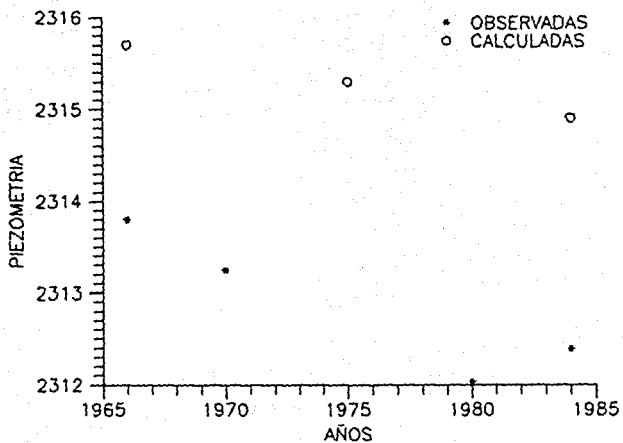
ELEMENTO 195



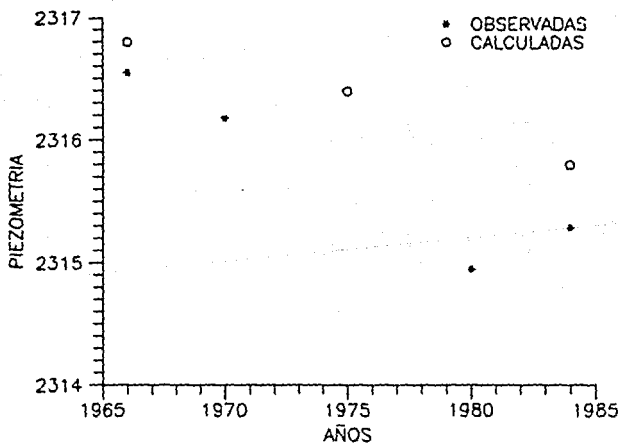
ELEMENTO 199



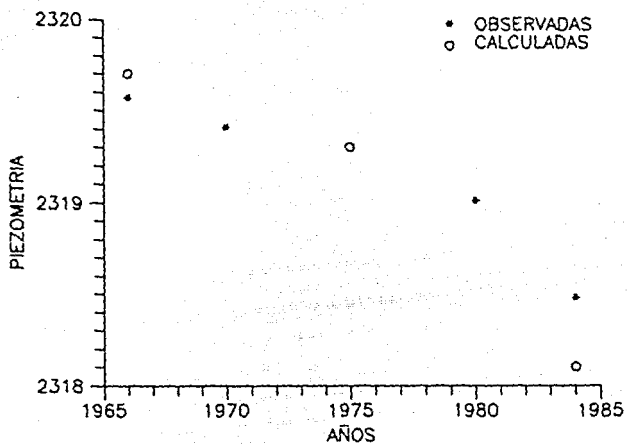
ELEMENTO 200



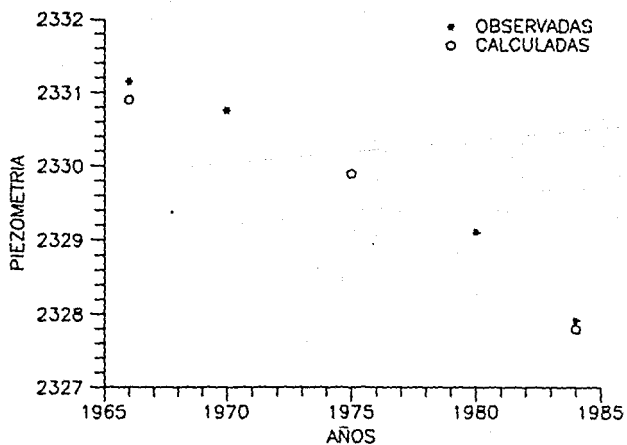
ELEMENTO 202



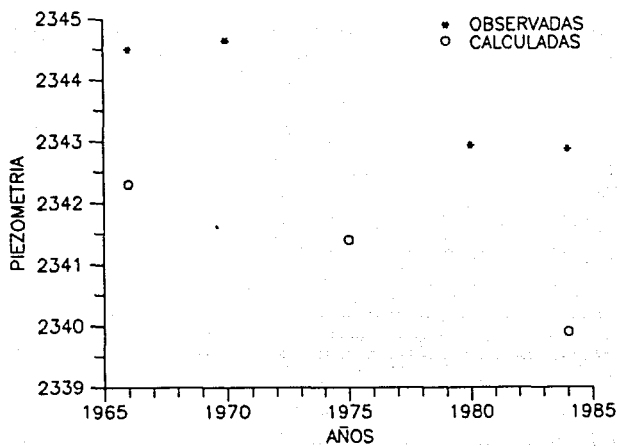
ELEMENTO 206



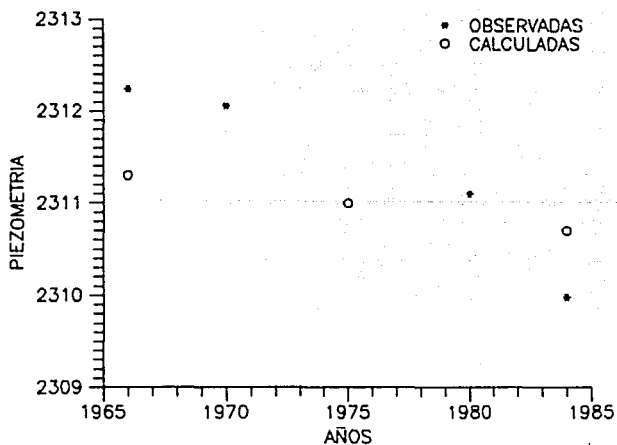
ELEMENTO 208



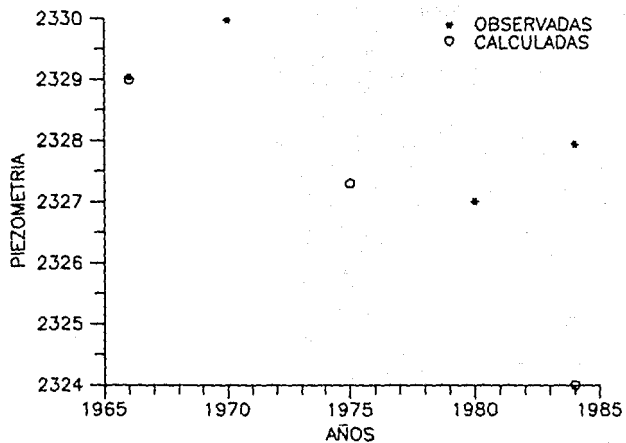
ELEMENTO 209



ELEMENTO 213

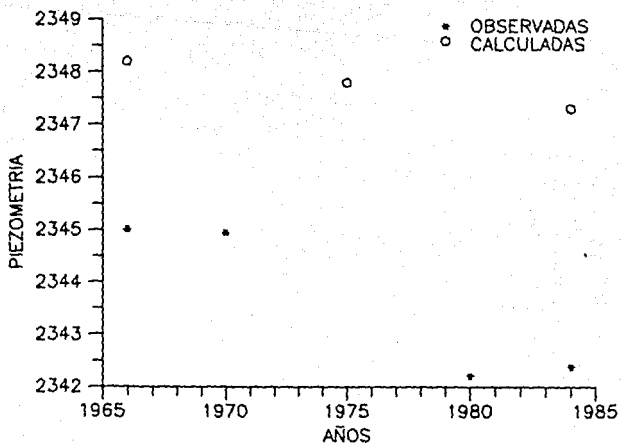


ELEMENTO 221

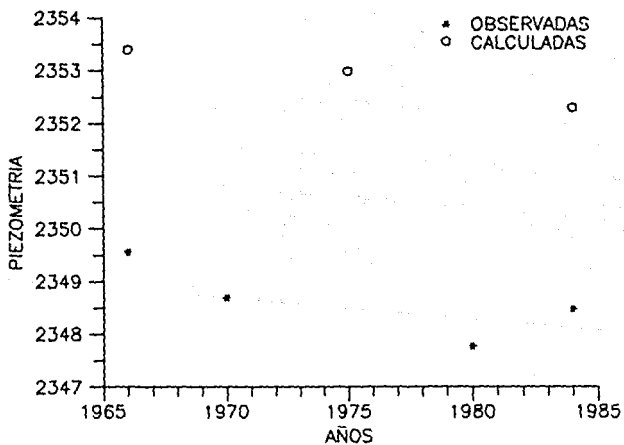


SERIE 4.5.2

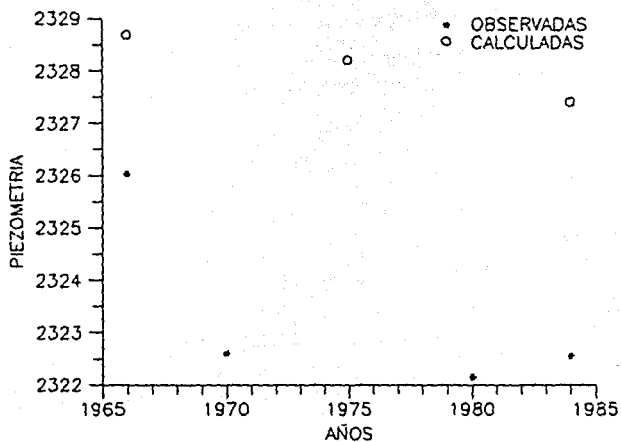
ELEMENTO 41



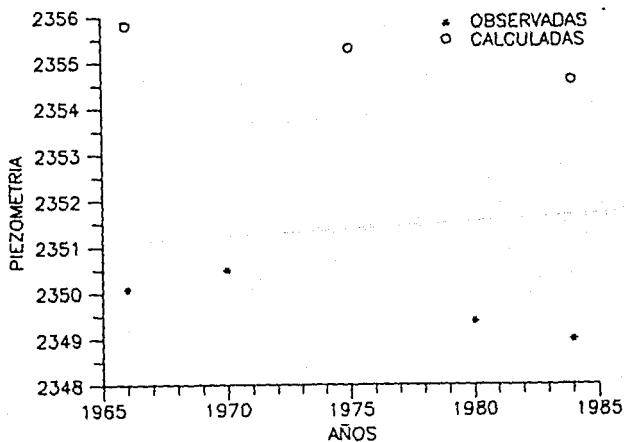
ELEMENTO 74



ELEMENTO 193



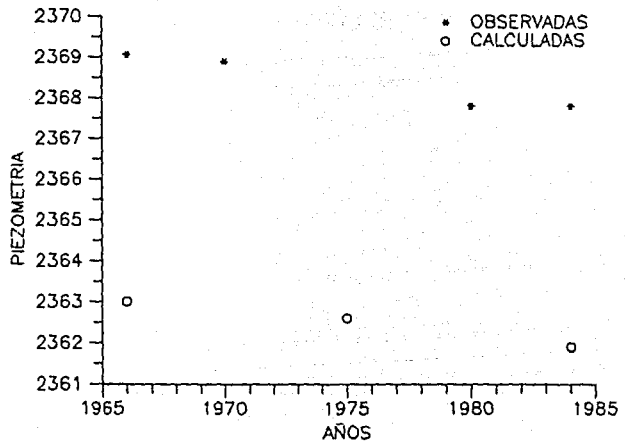
ELEMENTO 196



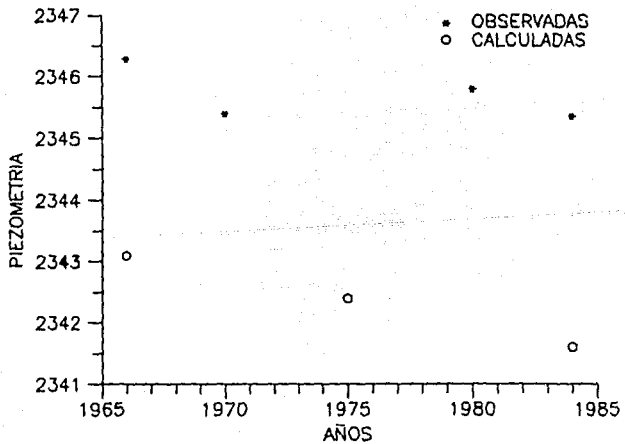
SERIE 4.5.3

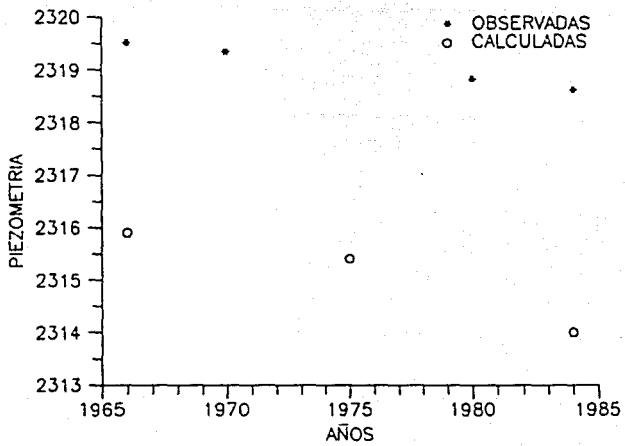
ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

ELEMENTO 22



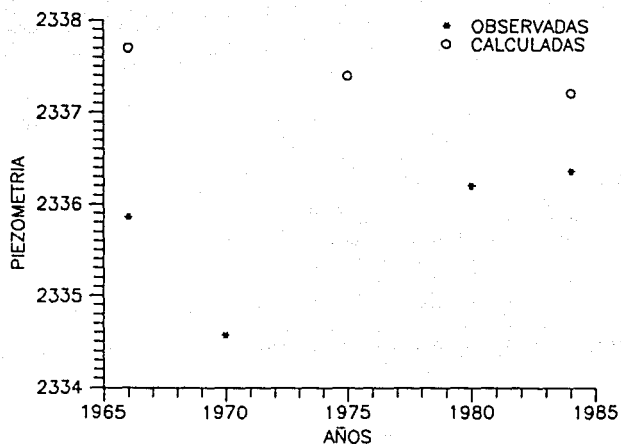
ELEMENTO 149



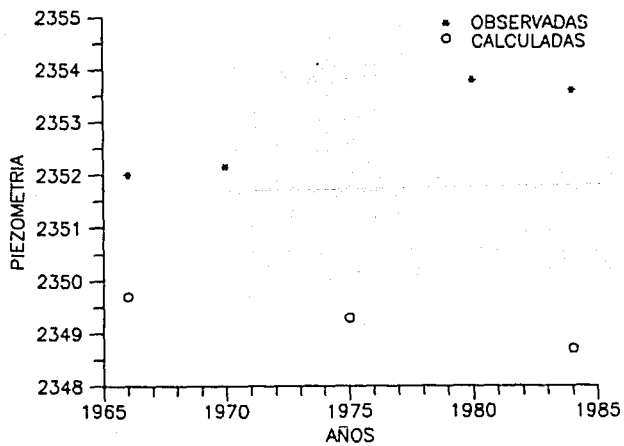


SERIE 4.5.4

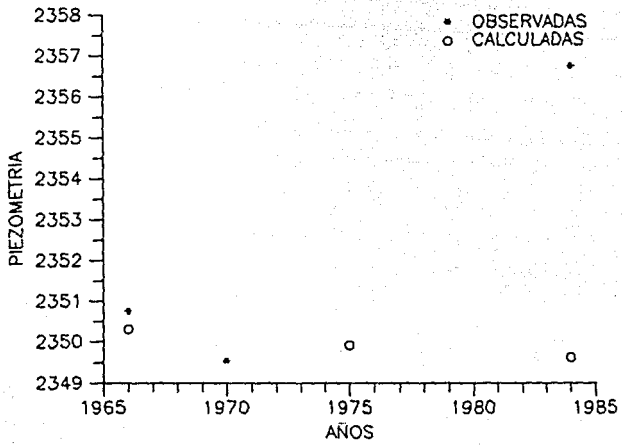
ELEMENTO 46



ELEMENTO 59



ELEMENTO 65



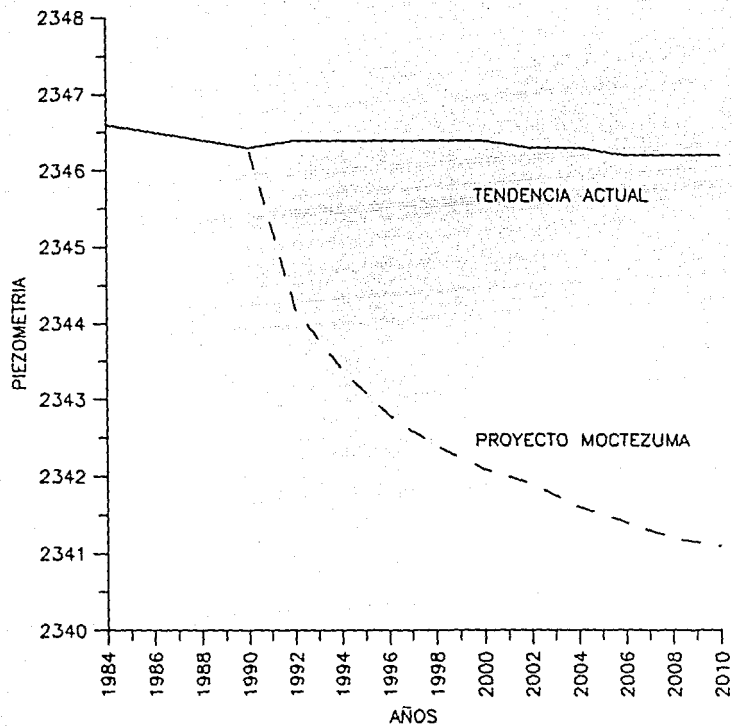


FIG. 4.6.1 COMPARACION DE PIEZOMETRIAS
EN EL NODO 60

MODELO DAS PARA EL COMPORTAMIENTO DE ACUIFEROS

I. INTRODUCCION

En el año de 1969 los ingenieros C. Cruikshank V. y R. Chávez G. presentaron el modelo matemático DAS para el estudio del comportamiento de acuíferos, para la Dirección de Aguas Subterráneas de la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos. El objetivo del mismo consiste en conocer la variación de las condiciones piezométricas de un acuífero en un régimen transitorio para predecir cómo será la evolución piezométrica en diferentes condiciones de explotación en el tiempo y diversas

distribuciones de las extracciones. Ese resultado es de gran utilidad en la planeación del aprovechamiento del agua subterránea.

Para aplicarse, el modelo requiere de las características geométricas del acuífero y sus características físicas. Mediante estudios geológicos, eléctricos o a través de perforaciones de explotación, se logra conocer su extensión, fronteras, espesores, etc. En segundo término los coeficientes de transmisividad y capacidad de almacenamiento se obtienen mediante pruebas de bombeo, o en su defecto de datos estimados con base en diferentes características acuíferas de la zona. Se necesita además, para un tiempo, las elevaciones piezométricas y los regímenes de extracción y alimentación.

II. CARACTERISTICAS DEL MODELO

El funcionamiento del modelo se basa principalmente en la ley de Darcy, que se expresa como

$$V_1 = - K_1 \frac{\partial H}{\partial l} \quad (2.1)$$

donde

V_1 = velocidad aparente en el sentido i

K_1 = permeabilidad del medio en el sentido i

H = altura piezométrica del punto considerado

y en el principio de la conservación de la masa que se expresa con la ecuación siguiente:

$$-\oint_A \bar{u} \cdot d\bar{a} + \iiint_V \rho F dV = \iiint_V S_s \frac{\partial H}{\partial t} dV \quad (2.2)$$

donde

ρ = masa específica del fluido

\bar{u} = velocidad aparente del fluido a través del elemento $d\bar{a}$ de la superficie que rodea al flujo

F = volumen del fluido creado por unidad de volumen y unidad de tiempo

S_s = almacenamiento específico del medio

t = tiempo

Esta ecuación expresa que el flujo neto de entrada a un volumen más una cierta masa generada dentro del volumen por unidad de tiempo es igual al incremento de masa dentro del volumen por unidad de tiempo. El flujo en acuíferos puede considerarse plano ya que las dimensiones a profundidad del mismo son mucho menores que las dimensiones en planta. Para tomar en cuenta las variaciones de la permeabilidad y del espesor del acuífero se introduce un parámetro que reúne a ambos llamado coeficiente de transmisividad, expresado como

$$T = K_1 b$$

donde

b = espesor del flujo

De este modo se puede considerar a los elementos finitos de este tratamiento como celdas planas en las que el flujo representado por la primera integral de la ecuación 2.2 se lleva a cabo a través del

perímetro de la celda.

En el modelo, el coeficiente de transmisividad se calcula como el promedio armónico de los valores de la transmisividad de dos celdas (Y_{10}), cuya fórmula se escribe más adelante. El segundo término de la ecuación 2.2 toma en cuenta los flujos normales al del acuífero en la celda, tales como infiltraciones o extracciones por bombeo. Si además suponemos constante la masa específica del agua, la ecuación 2.2 queda

$$-\oint_p b \bar{v} \cdot d\bar{p} + \iint_A b F dA = \iint_A S \frac{\partial H}{\partial t} dA \quad (2.3)$$

donde

S = coeficiente de almacenamiento del acuífero (= S_b)

p = perímetro de la celda

Aplicando este principio por el método de incrementos finitos en el tiempo a elementos volumétricos finitos se obtiene un sistema de ecuaciones lineales en donde intervienen como incógnitas las alturas piezométricas en el instante final del intervalo de tiempo de cálculo; para esto se deben conocer las características del acuífero, los caudales de extracción y aportación y la distribución de las alturas piezométricas en el instante inicial del intervalo.

Las alturas piezométricas a las que se hace referencia se calculan al dividir el área en estudio en elementos o celdas planas; al aplicar a cada una de ellas la ecuación lineal mencionada se obtiene un sistema de ecuaciones; la ecuación referida es:

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Y_{i,o} \left[H_{i,k+1} - H_{o,k+1} + H_{i,k} - H_{o,k} \right] + Q_{o,k} = \frac{A_o S_o}{t} \left[H_{o,k+1} - H_{o,k} \right]$$

donde

$$Y_{i,o} = \frac{T_i T_o}{1/2 (T_i + T_o)} \frac{B_{i,o}}{L_{i,o}}$$

n = número de elementos adyacentes al elemento "o"

T_o = transmisividad del elemento "o"

T_i = transmisividad del elemento "i"

$L_{i,o}$ = longitud del segmento entre los centros de las celdas adyacentes "i" y "o"

$B_{i,o}$ = longitud del lado del polígono normal al segmento $L_{i,o}$

$H_{i,k}$ = altura piezométrica del nudo "i" en el instante "k"

$Q_{o,k}$ = caudal medio neto normal el elemento "o", en el intervalo de tiempo

A_o = área del elemento "o"

S_o = coeficiente de almacenamiento del elemento "o"

t = intervalo de tiempo

El programa, elaborado en el lenguaje FORTRAN, consta de un cuerpo principal y doce subrutinas. En el primero se lleva a cabo el control del tiempo y la dinámica interna de cálculos y lecturas del programa. Dentro del total de subrutinas, cuatro de ellas se encargan de leer las características específicas del acuífero (tales como su geometría, valores de constantes, datos de flujo, bombeos iniciales, piezometría, infiltraciones y evaporaciones), del acuitardo, en caso de su existencia, y de los cambios en el tiempo de las condiciones de frontera y del bombeo.

Otras 7 subrutinas se encargan del procesamiento de los datos leídos, tales como la generación de la malla correspondiente, el cálculo de los gastos, la influencia y desempeño de lagos y manantiales, la solución de los sistemas de ecuaciones que calculan las cargas piezométricas en cada intervalo de tiempo, y en su caso, de la interacción y cálculo del flujo del acuitardo al acuífero. Dentro de ellas, en la subrutina LAGO se determinan los caudales de manantiales y flujos hacia los lagos cuando los niveles se acercan o sobrepasan la superficie del terreno, además de realizar un balance de entradas y salidas y del cambio de almacenamiento en los cuerpos de agua, en caso de su existencia. La última de las subrutinas se encarga de la impresión, en planos sin escala, de datos importantes y resultados para cada nodo.

III. DATOS DE ENTRADA Y SALIDA DE RESULTADOS

Para el correcto funcionamiento del programa es necesario que los datos sean confiables, además de que su introducción al modelo sea la adecuada. La salida de los resultados depende no sólo del procesamiento de la información aportada, sino también de cuáles sean las variables que durante la evolución de la modelación representen para el operador cuestiones de interés.

La introducción de los datos se da en dos archivos; el primero de ellos se refiere a datos concernientes a la malla y el segundo a datos variables en el tiempo. A continuación se hará una breve descripción de los mismos.

El archivo COMUN debe contener el tipo de malla, el número de materiales del acuífero, datos de la malla, tiempos relativos a la modelación, factores de lectura, calibración e impresión y títulos (esta clasificación no corresponde al orden de lectura del archivo.)

- a) Tipo de malla. Si es de 1, 2 ó 3 dimensiones.
- b) Número de materiales. De esta variable depende la alimentación de algunas otras, ya que para cada material existirá un almacenamiento específico, una permeabilidad y una compresibilidad.
- c) Datos de la malla. La geometría, la magnitud de sus componentes, las elevaciones topográficas y piezométricas, los espesores del estrato permeable, el tipo de material de cada nodo, la condición de carga del nodo (si es o no de gradiente constante), y las desconexiones entre elementos. Si existe acuitardo, lee también sus características.
- d) Tiempos relativos a la modelación. Tiempos de inicio y término de la simulación, intervalo de modelación, y tiempo e intervalos de impresión.
- e) Índices de lectura. Permiten o no la lectura de algunos datos en caso de que se vayan a utilizar.
- f) Factores de calibración. Modifican la magnitud de ciertas variables de manera general para la calibración del modelo.
- g) Índices de impresión. Indican qué datos de entrada y qué resultados serán impresos con la ayuda de la subrutina Plano.

- h) Títulos. Encabezan tanto en el archivo a un conjunto de datos o información, como en el archivo de salida a los planos.

En el archivo CAMBIA se dan los posibles cambios de bombeo, cargas, infiltraciones y evaporaciones que deberán operarse a lo largo de la modelación. En el caso de que alguno de los conceptos anteriores deba cambiarse, se tendrá que indicar en qué año, en qué elementos y qué cambios ocurren. Para operar el modelo y con el fin de encontrar las condiciones iniciales no se incluyen los cambios por bombeo.

En lo que respecta a la salida de los resultados, son dos los archivos que forma el programa, el llamado HINI.112, en donde se imprimen los valores de las cargas piezométricas al final de la modelación en flujo establecido, y que posteriormente es utilizado en la calibración, y el archivo SALIDA, que muestra los resultados de la modelación. Despliega en primer término los datos generales de la región estudiada (su nombre, entre otros), número de materiales y variables de calibración. Posteriormente datos de la malla y de los materiales, además de algunas otras características del cálculo con respecto al confinamiento, flujo de manantiales, evaporación y tiempos de simulación. Se imprimen también los planos de los datos - variable de la malla y hasta 15 de los datos - resultado de cada intervalo IDELT.

En caso de existir lagos en la región, se reportan para cada intervalo de tiempo los elementos que los componen, los volúmenes de evaporación y las recargas que llegan a ellos por parte del acuífero o de los manantiales. Al final de la simulación se imprimen para cada IDELT los gastos totales por bombeo, por manantiales y en caso de que exista, la aportación del acuitardo al acuífero.

AGRADECIMIENTOS

Debo hacer patente mi agradecimiento al Dr. Carlos Cruickshank V. por la dirección de esta tesis y por haberme brindado su tiempo y sus consejos, sin los cuales no hubiese podido realizar este trabajo.

Igualmente quiero agradecer al M. en I. Victor Franco por alentarme y apoyarme cada que fue necesario, y al Dr. Ramón Domínguez M. por haberme permitido disponer de su cubículo y su computadora, en donde fue realizada esta tesis.

Agradezco también al personal del Instituto de Ingeniería las facilidades prestadas, y muy particularmente al profesor Alfonso Gutiérrez A. del gabinete de dibujo, y a mis compañeros becarios Carlos Franco D. y Marco A. Salas S. por su ayuda en la elaboración de las gráficas.

REFERENCIAS

1. Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México (C.H.C.V.M.), *Las aguas subterráneas del sistema Apan - Oriental*, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, 1967.
2. Yáñez G.,C., *Informe geológico del proyecto geotérmico los Humeros - Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz*, Comisión Federal de Electricidad, México, 1980.
3. Investigaciones Técnicas del Subsuelo, S.A. (I.T.S.S.A.), *Actividades de Carácter geohidrológico complementario en el Valle de Puebla y*

- Cuenca de Oriental, en el estado de Puebla, hecho para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, 1985.
4. Dirección de Aguas Subterráneas (D.A.S.), *Estudio geohidrológico de la cuenca de Oriental, Puebla*, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, 1988.
 5. Cruickshank V.,C., *Revisión de estudios geohidrológicos y modelación del acuífero de la cuenca del valle de Oriental en los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz*, Informe interno, Instituto de Ingeniería, U.N.A.M., México, Mayo de 1989.
 6. Casique V.,J., et al, *Resultados de las exploraciones realizadas por C.F.E. en el proyecto geotérmico los Humeros - Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz*, Anales del Instituto de Geofísica, U.N.A.M., vol. 27 - 28, pp 9 - 61, México, 1982.
 7. Davis, S.N. y DeWiest, R., *Hydrogeology*, John Wiley & Sons, Inc., E. U. A., 1966.
 8. Akopyan, A.S., *The problem of determining evaporation from soil surface with the ground water table at various depth*, Soviet Hydrology, selected papers, No. 5, pp 375 - 382, Amer. Geophys. Union, 1966.
 9. Cruickshank V.,C., *Modelo matemático "DAS" para el estudio del comportamiento de acuíferos*, Revista Ingeniería Hidráulica, vol. XXIII, México, 1969.
 10. Cruickshank V.,C. et al, *Geohidrología, Cap. A.1.12, Manual de diseño de Obras Civiles*, C.F.E., México, 1983.
 11. Cruickshank V.,C., *Manual del programa para computadora del modelo tridimensional de simulación del flujo en acuíferos*, Informe interno, Instituto de Ingeniería, U.N.A.M., México, Diciembre de 1989.
 12. Tinajero G., J.A., *Apuntes de aspectos fundamentales en el estudio del agua subterránea (Geohidrología)*, Facultad de Ingeniería,

U.N.A.M., México, 1986.

13. Leet, L.D. y Judson, S., *Fundamentos de geología física*, Limusa, 8a. edición, México, 1986.
14. Legget, R.F., *Geología para ingenieros*, Gustavo Gili S.A., Barcelona, España, 1956.
15. Holmes, A., *Geología Física*, Omega S.A., Barcelona, España, Octubre de 1973.
16. Trefethen, J.M., *Geología para ingenieros*, Compañía Editorial Continental S.A., 2a. edición, México, Mayo de 1960.
17. *Estudio de viabilidad del sistema Apan - Oriental*. Publicación No. 3 de la C.H.C.V.M., México, 1964.
18. Araña S.,V. y López R.,J., *Volcanismo, dinámica y petrología de sus productos*, Ed. Istmo, Madrid, España, 1974.
19. Ollier, C., *Volcanoes*, Basil Blackwell Inc., Oxford, Inglaterra, 1988.

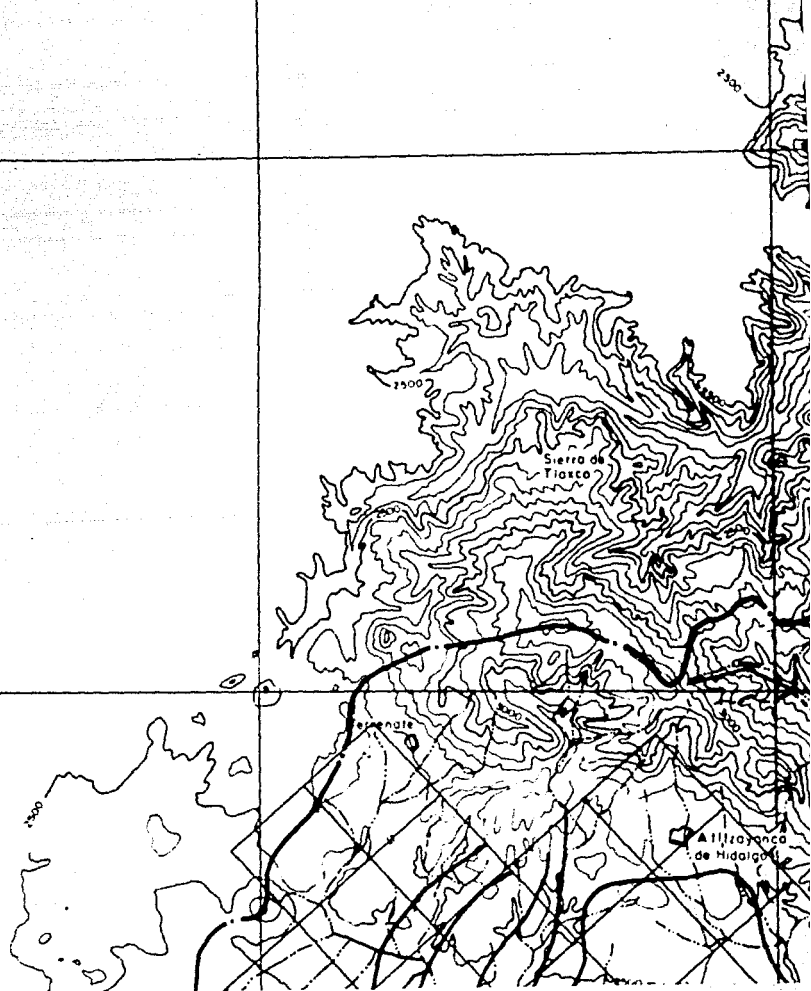
98°15'
20°00'

98°00'

97°45'

19°45'

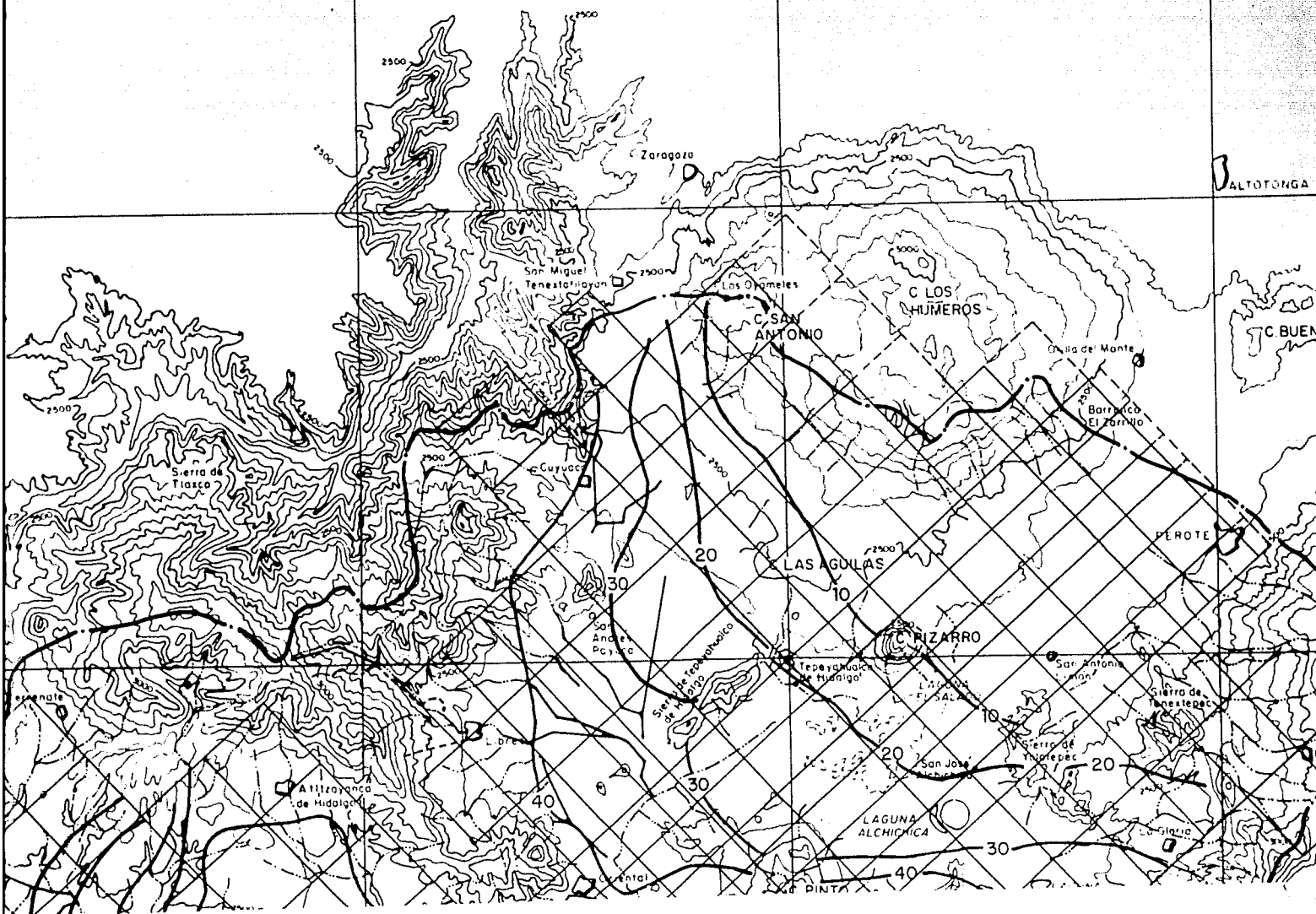
19°30'



97°45'

97°30'

97°15'



97°-5

19°45'

BACOTONGA

19°45'

C LOS
MUMEROS

C BUENAVISTA

PEROTE

RIZARHO

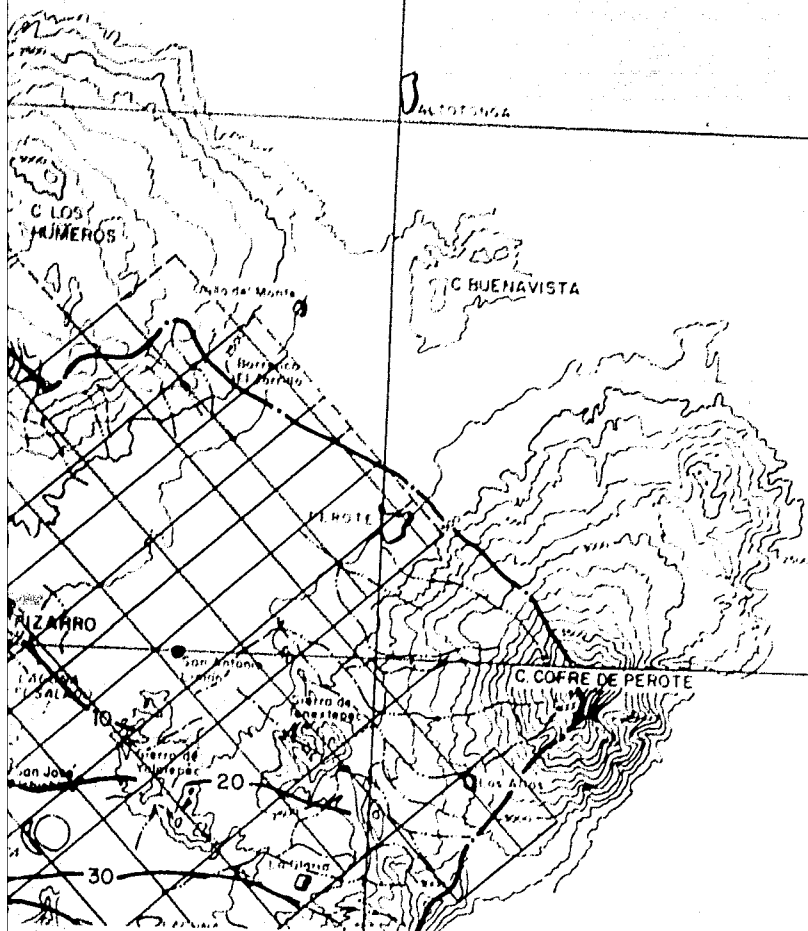
C COFRE DE PEROTE

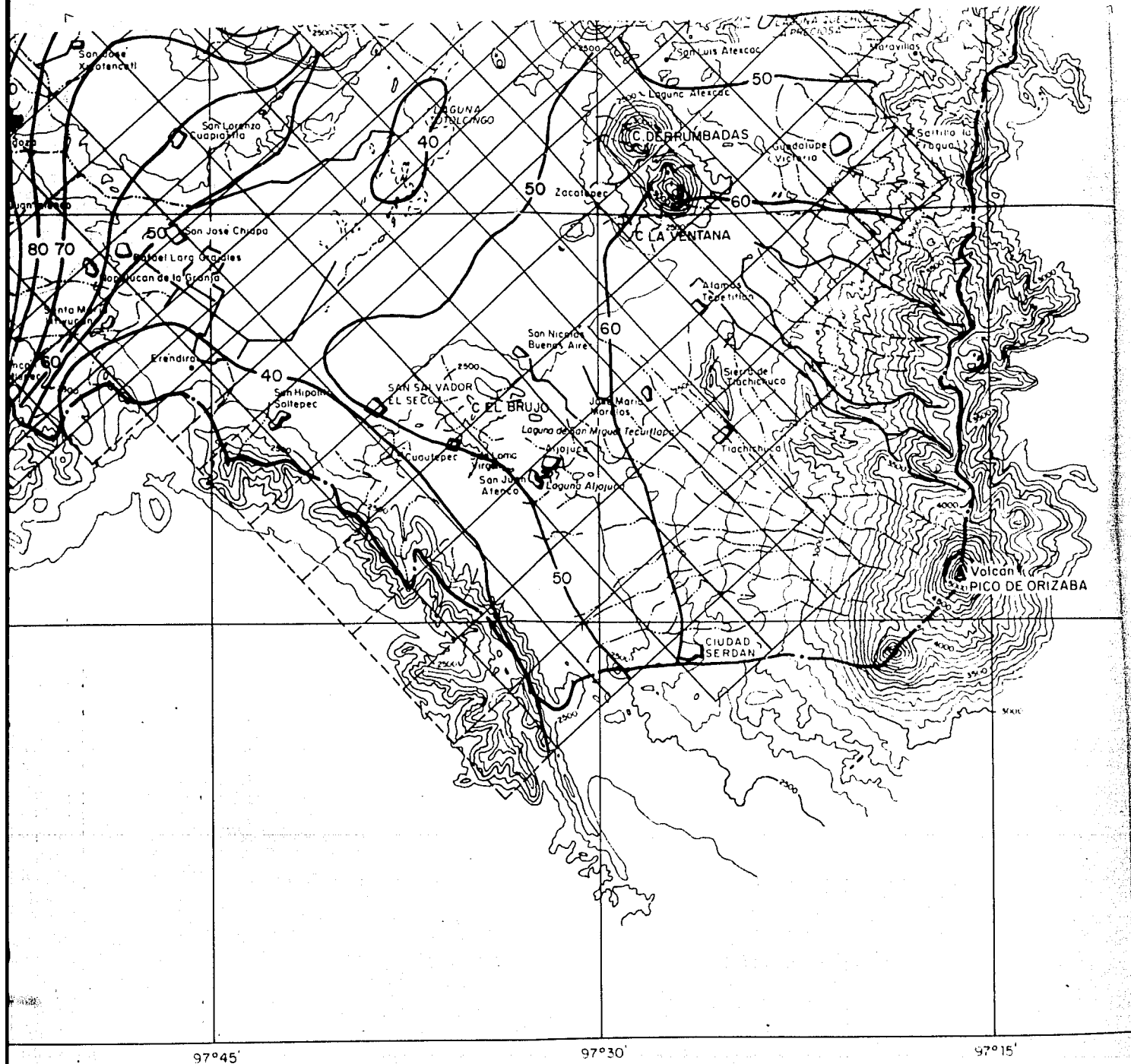
19°30'

San Juan

20

30





19°15'

19°00'

18°45'

97°00'

SIMBOLOS

- Perímetro de la cuenca
- - - Corriente que desaparece
- Acueducto superficial
- - - - Acueducto subterráneo
- ☐ Poblado
- ~ Curvas de nivel
- ☉ Laguna intermitente
- ☪ Laguna perenne

0 5 10

Kilómetros

1:250 000

Nota : Piezometría sobre
la cota 2300

INSTITUTO DE INGENIERIA
COORDINACION DE HIDROLOGIA

CUENCA DE ORO
PIEZOMETRIA C
EN 1900

8368

040989

SÍMBOLOS

- Nivel del agua
- Contorno del terreno
- Contorno superficial
- Contorno subterráneo
- ☁ Faja de agua
- Límite de flujo
- Límite intermitente
- ☉ Límite permanente

1:25000

Nota: Piezometría sobre la cota 10.500

INSTITUTO DE INGENIERIA **UNAM**

COORDINACIÓN DE HIDRÁULICA

CUENCA DE ORIENTAL
PIEZOMETRÍA CALCULADA
EN 1967

6368

040989

4.5.71

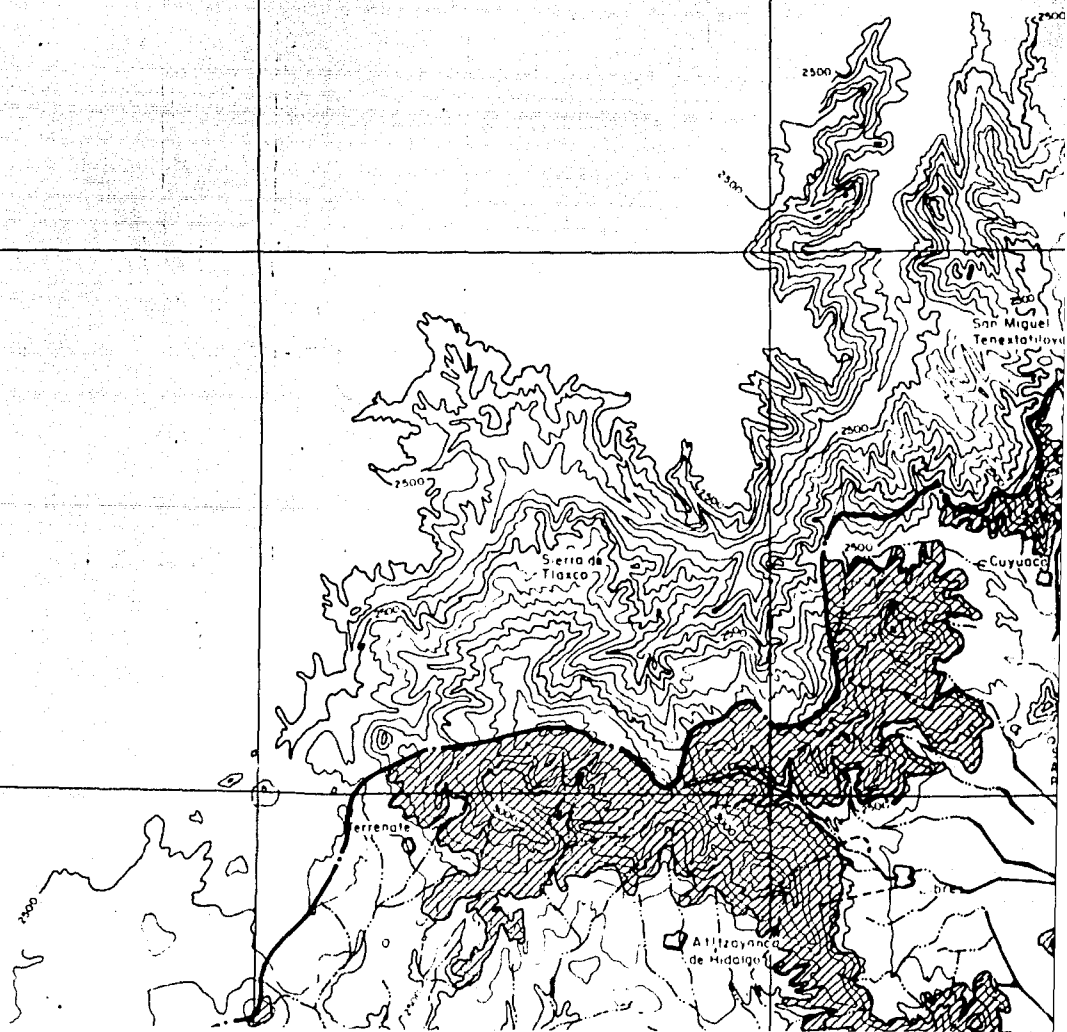
98°15'
20°00'

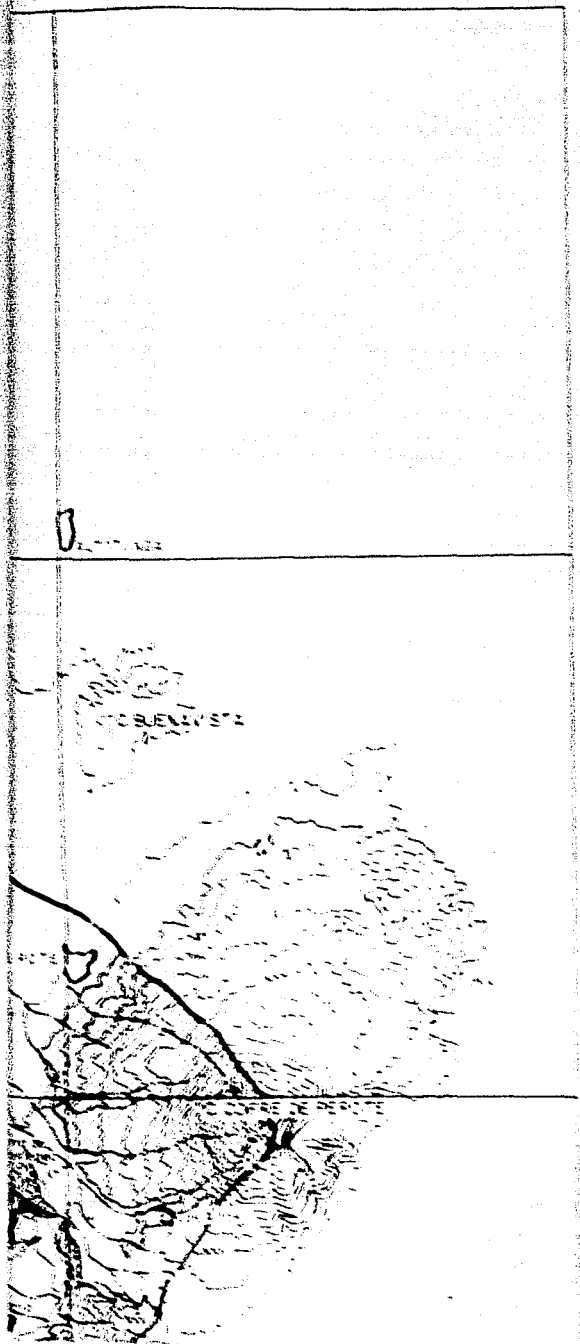
98°00'

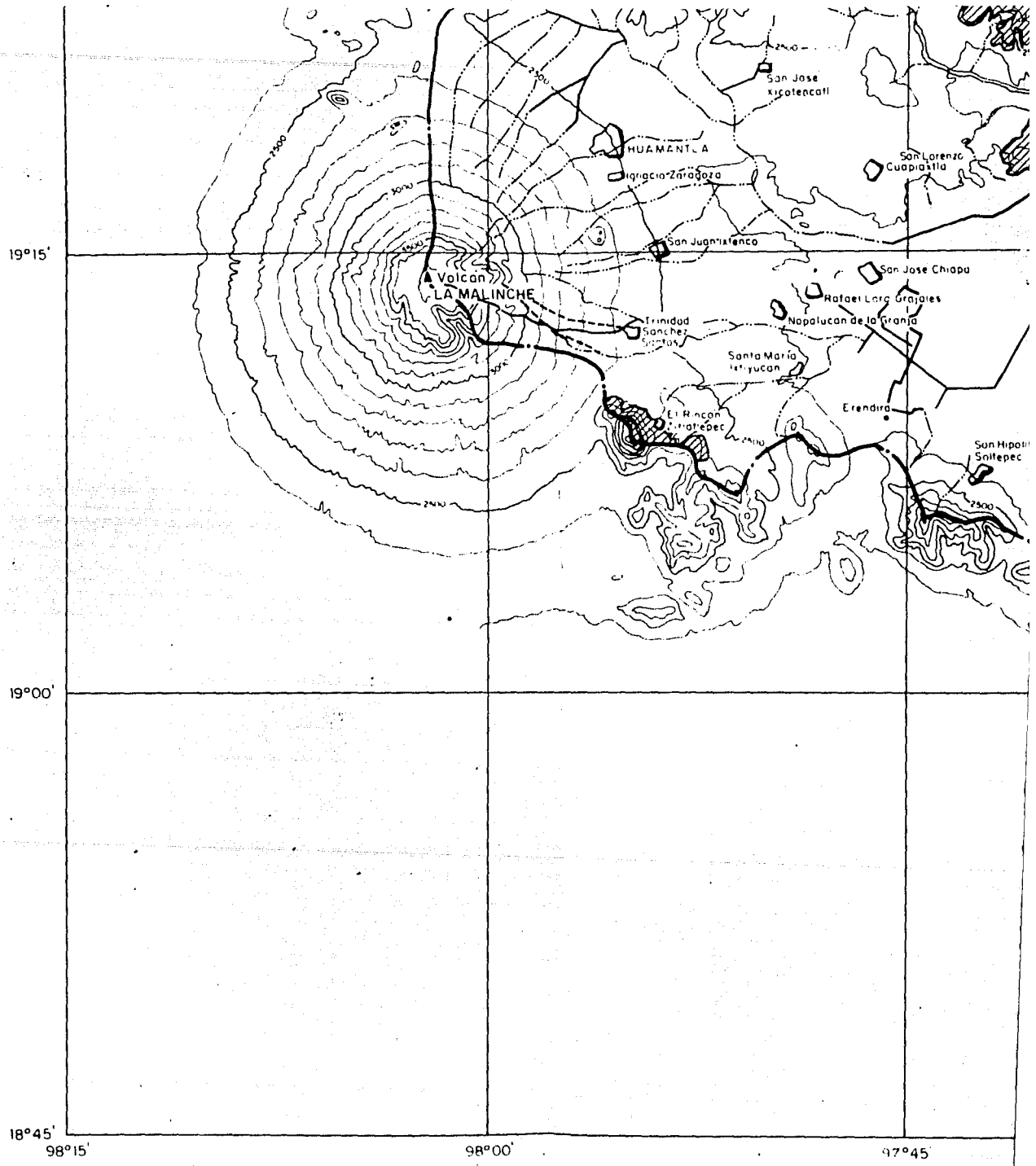
97°45'

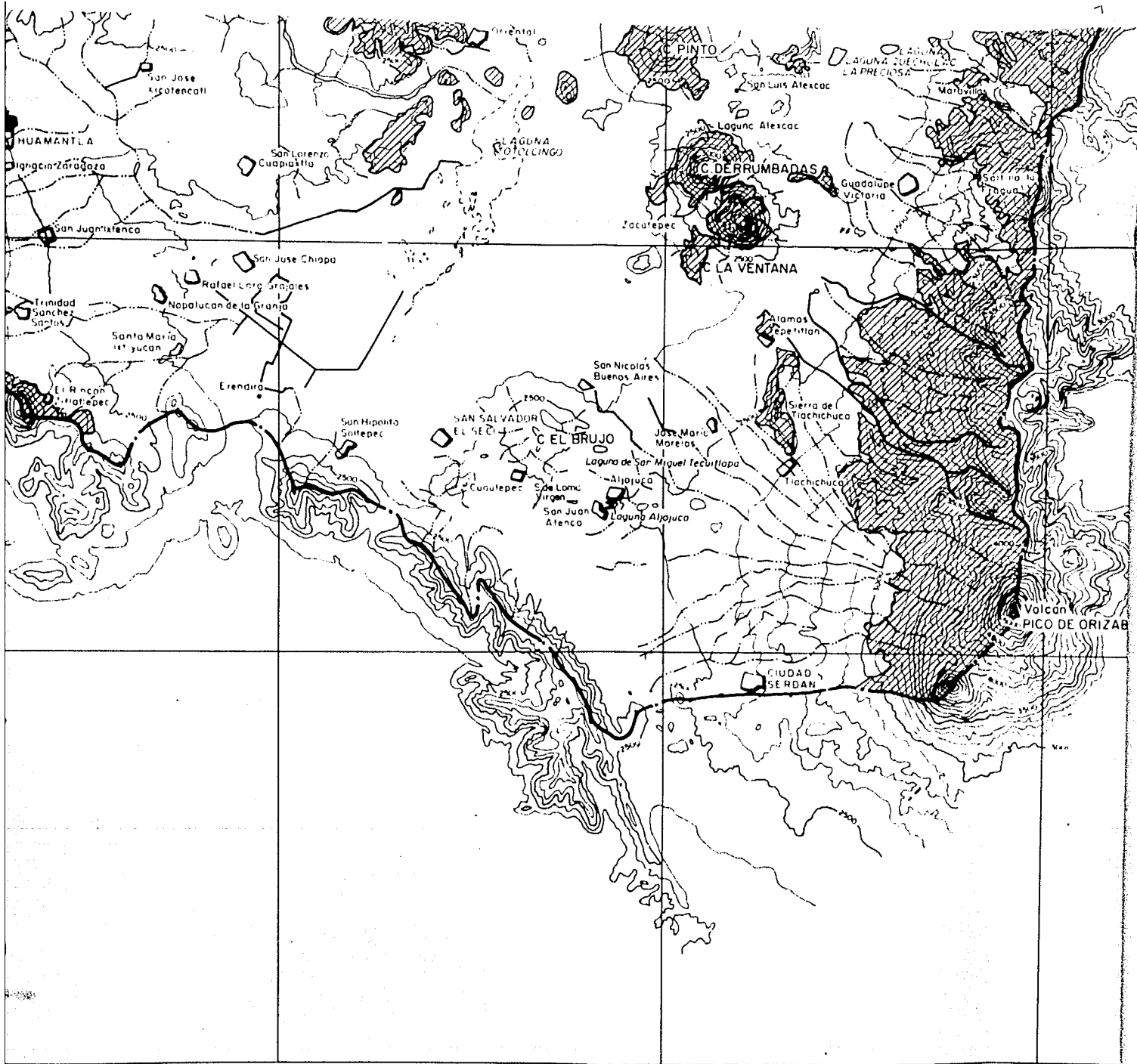
19°45'

19°30'





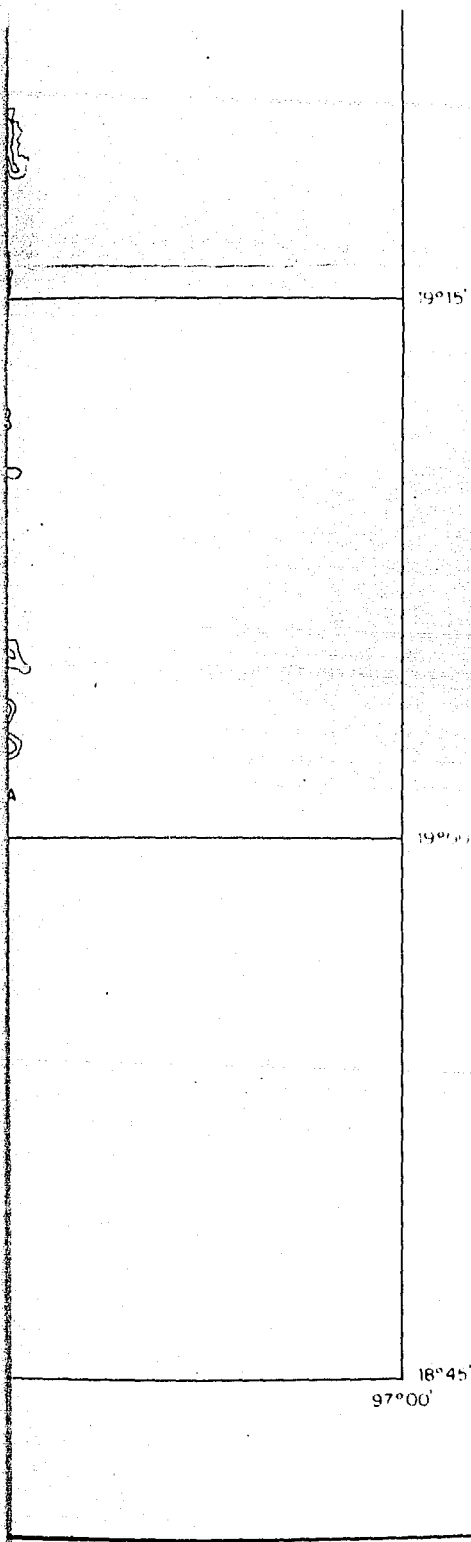




97°45'

97°30'

97°15'



S I M E

Per

Cor

Act

Act

Foot

Cur

Loc

Lo

0









K

INST

FOR

83

SIMBOLOS

-  Perímetro de la cuenca
-  Corriente que desaparece
-  Acueducto superficial
-  Acueducto subterráneo
-  Embudo
-  Curvas de nivel
-  Laguna intermitente
-  Laguna perenne

0 5 10
Kilómetros

1:250 000

INSTITUTO DE INGENIERIA **UNAM**
COORDINACION DE HIDRAULICA

CUENCA DE ORIENTAL
FORMACIONES IMPERMEABLES

8368

040989

PLANO 4.1.1

97°45'

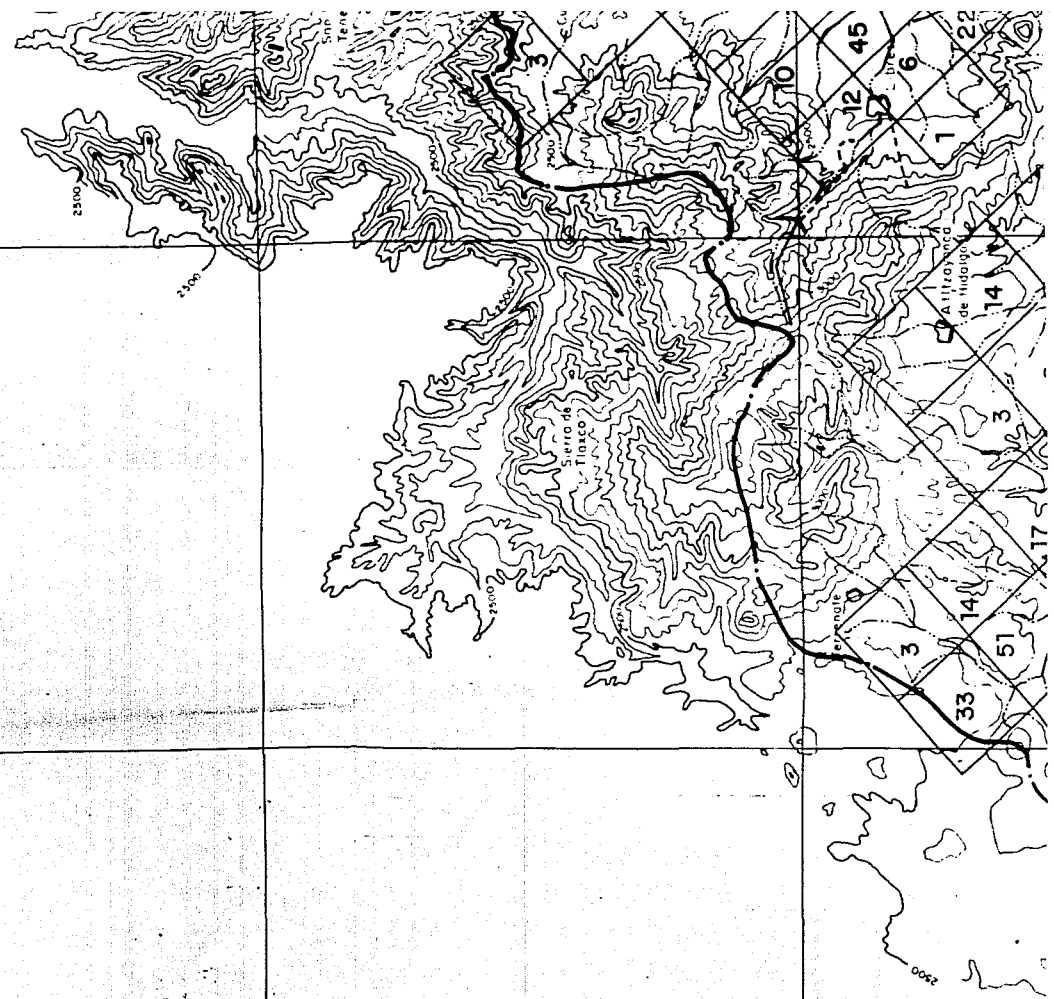
98°00'

98°15'

20°00'

19°45'

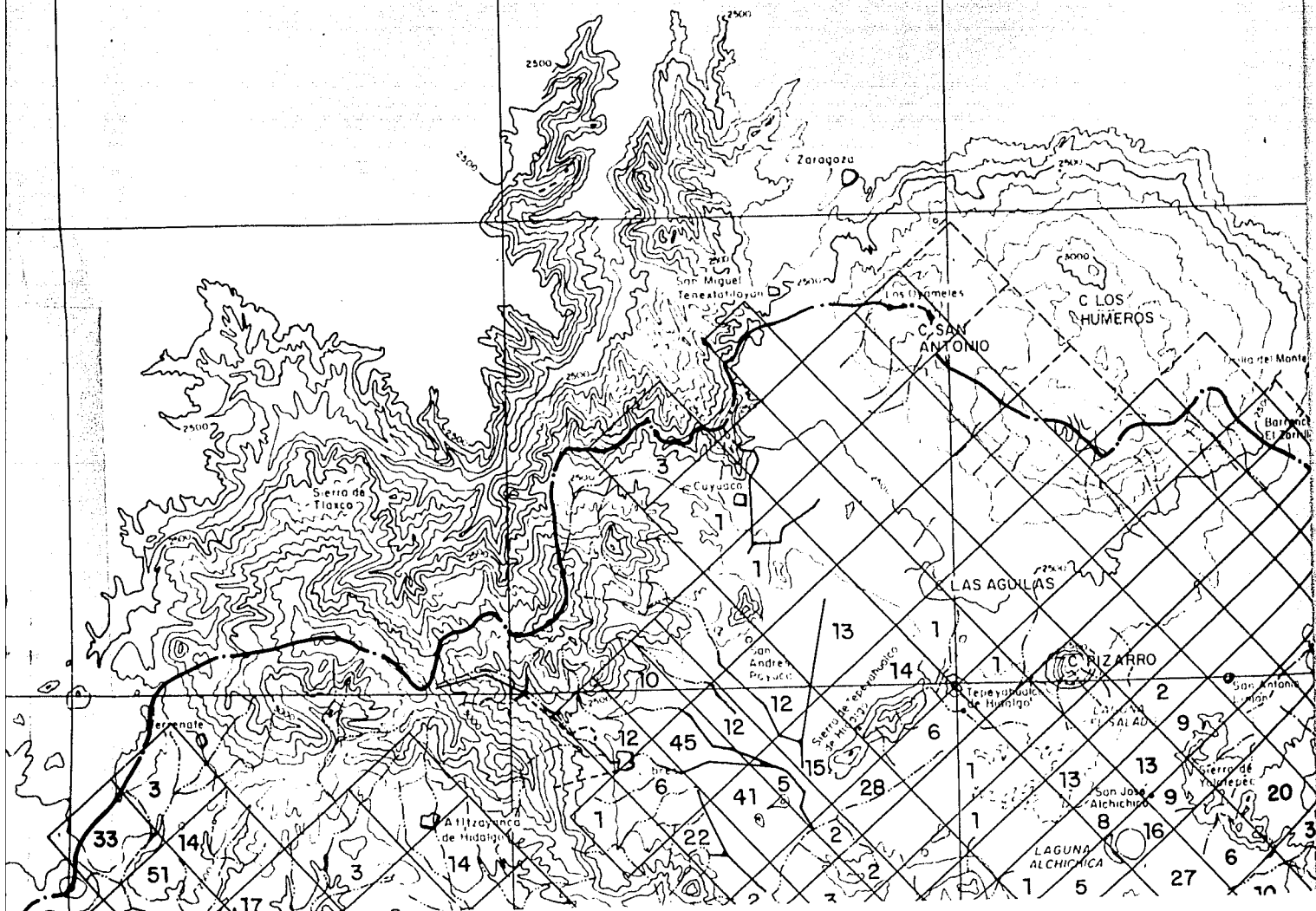
19°30'



98°00'

97°45'

97°30'



97°15'

97°00'
20°00'

B
ALTUTUNGA

19°45'

C BUENAVISTA

PEROTE

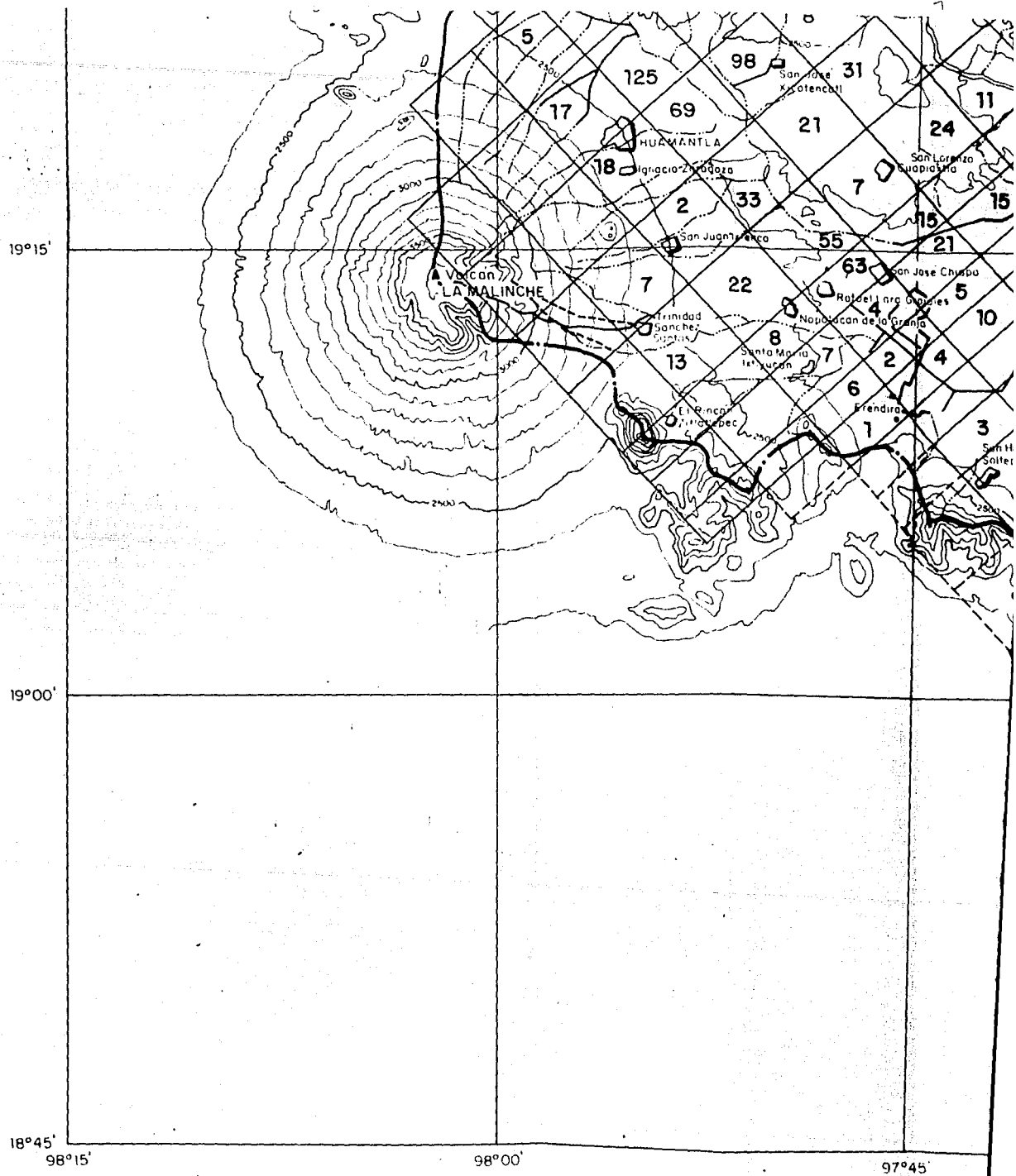
C. COFRE DE PEROTE

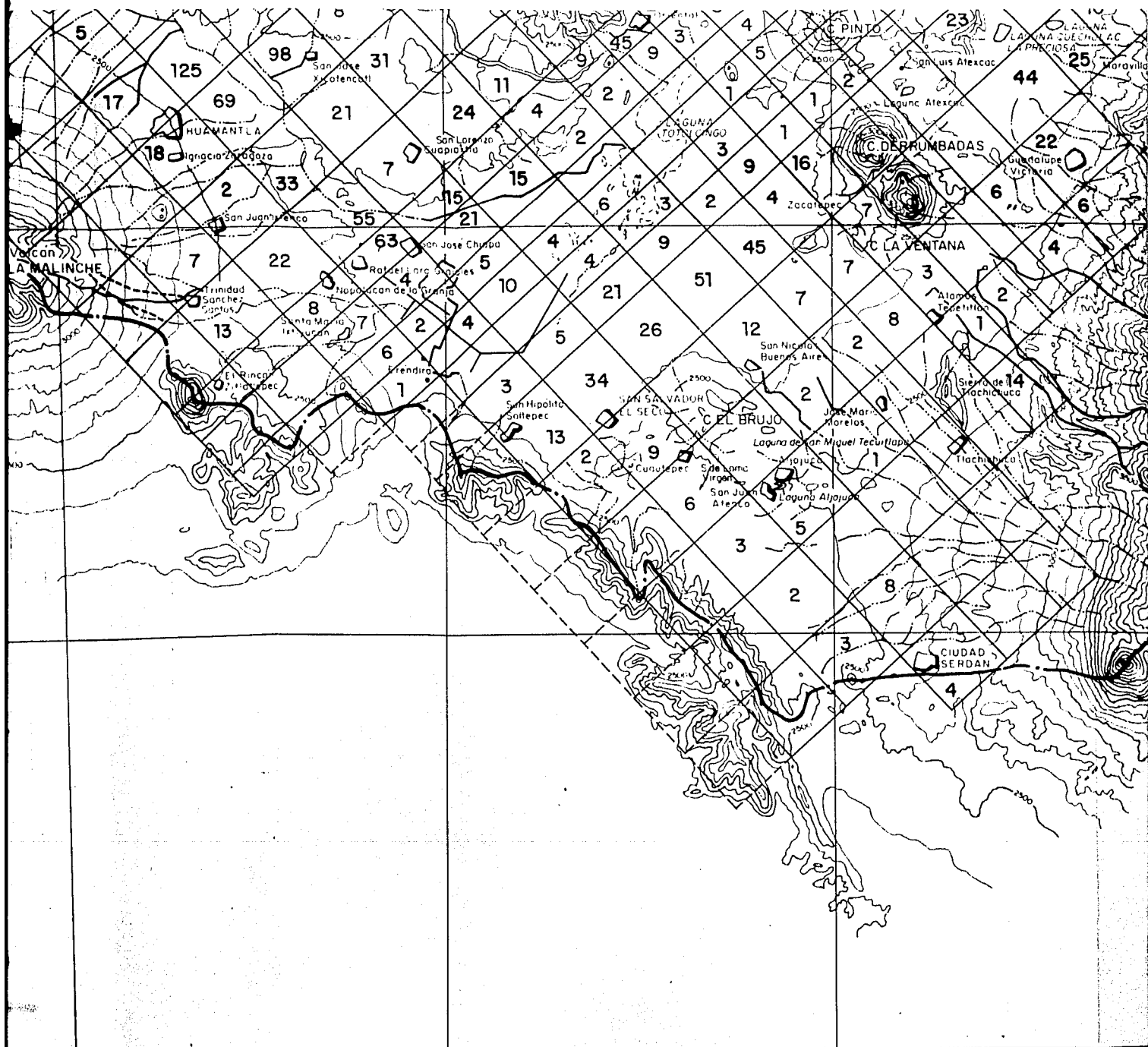
19°30'

Ciudad de
Tehuacan

LOS ANOS

Gila

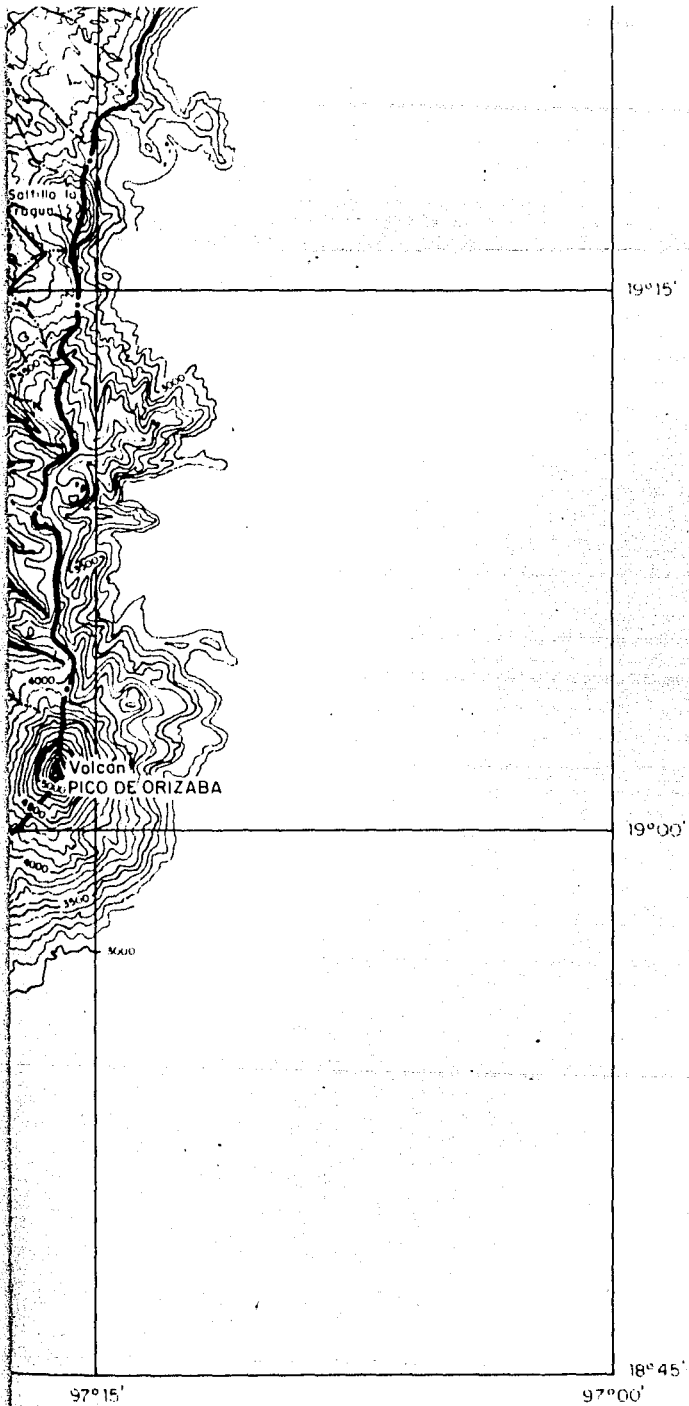




98°00'









97°45'

97°30'



Nota : Caudales , en
litros /segundo

SIMBOLOS

-  Perímetro de la cuenca
-  Corriente que desaparece
-  Acueducto superficial
-  Acueducto subterráneo
-  Fobido
-  Curvas de nivel
-  Laguna intermitente
-  Laguna perenne

0 5 10
Kilómetros

1:250 000

Nota : Caudales , en
litros/segundo

INSTITUTO DE INGENIERIA **UNAM**
COORDINACION DE HIDRAULICA

**CUENCA DE ORIENTAL CAUDALES
DE EXTRACCION EN 1988**

8368

040989

PLANO 4.1.2

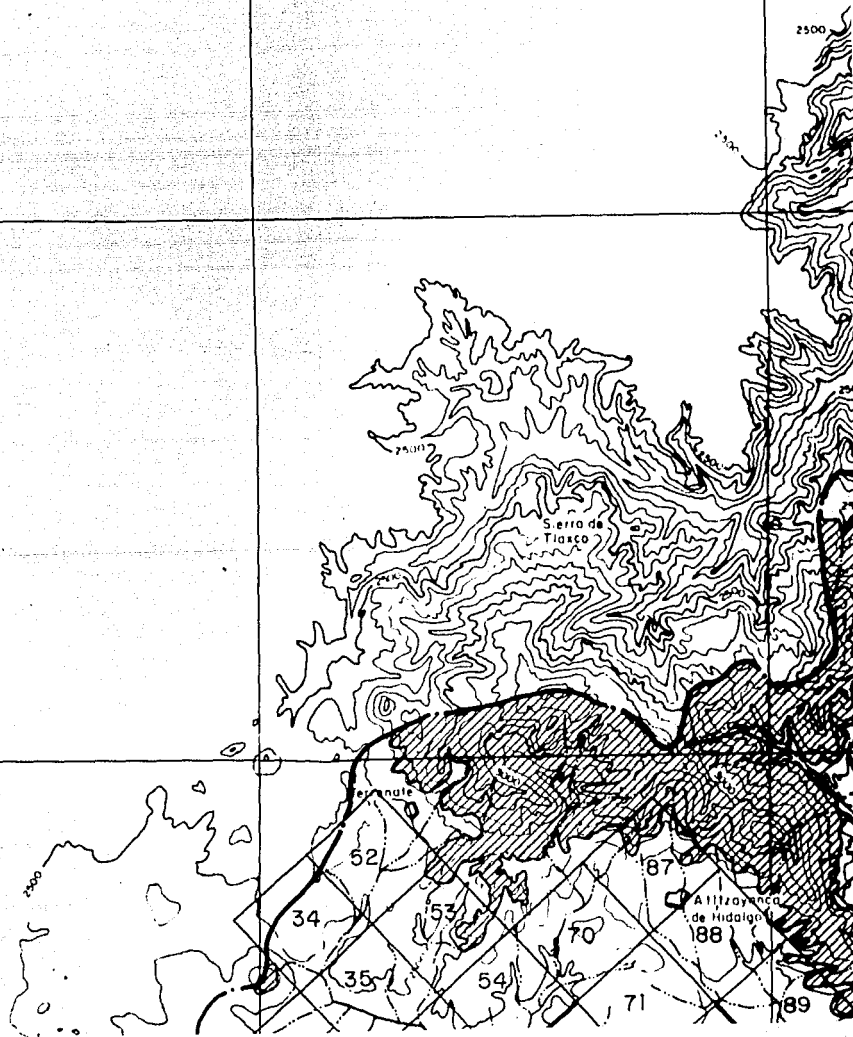
98°15'
20°00'

98°00'

97°45'

19°45'

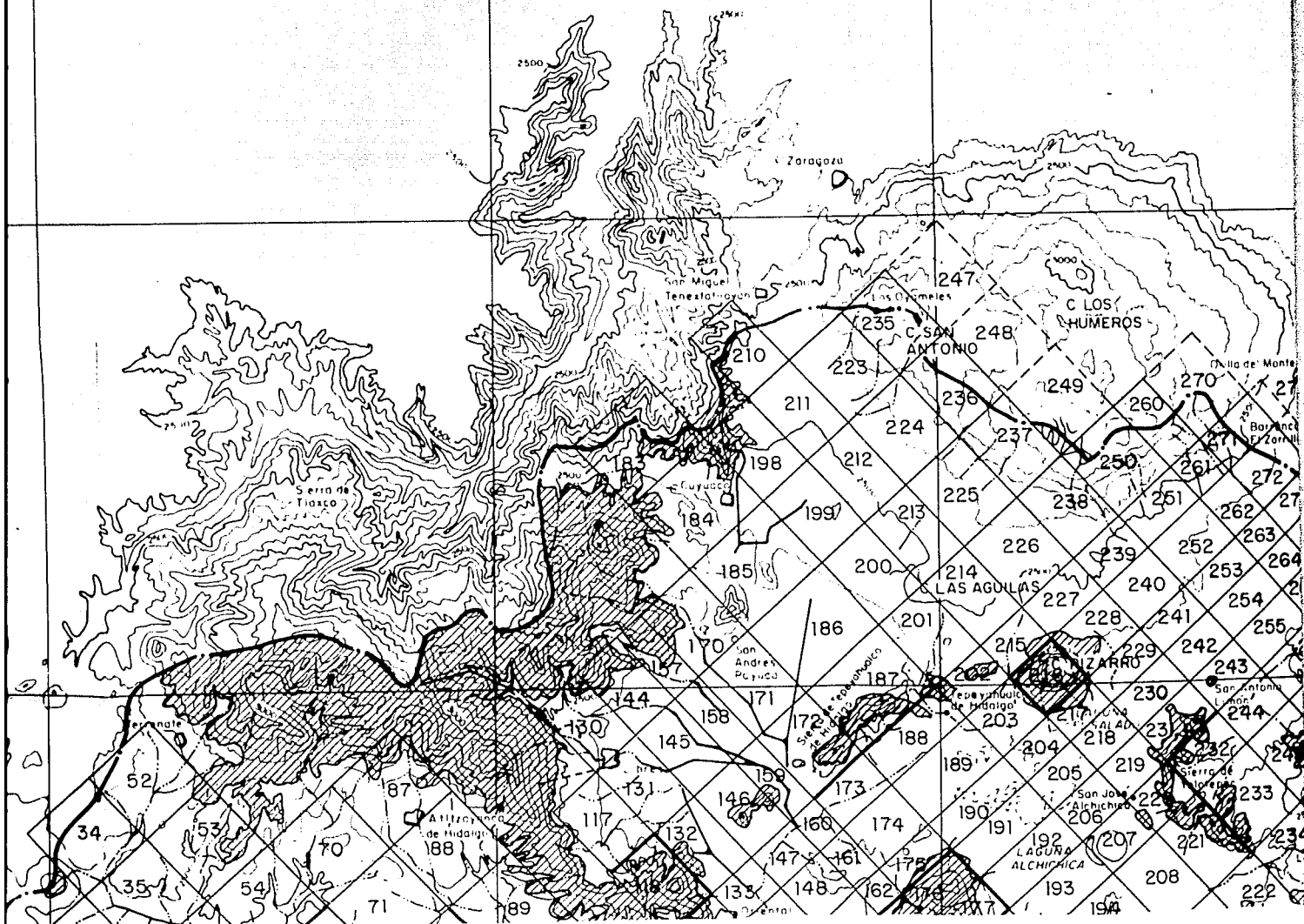
19°30'



98°00'

97°45'

97°30'

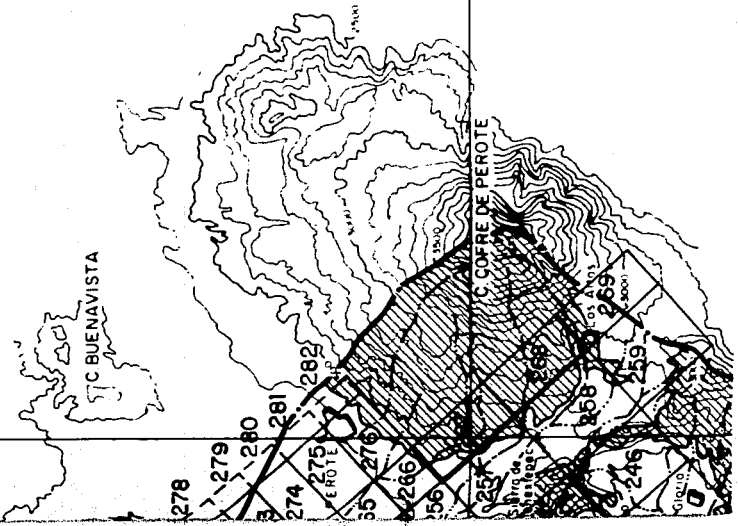


97°15'

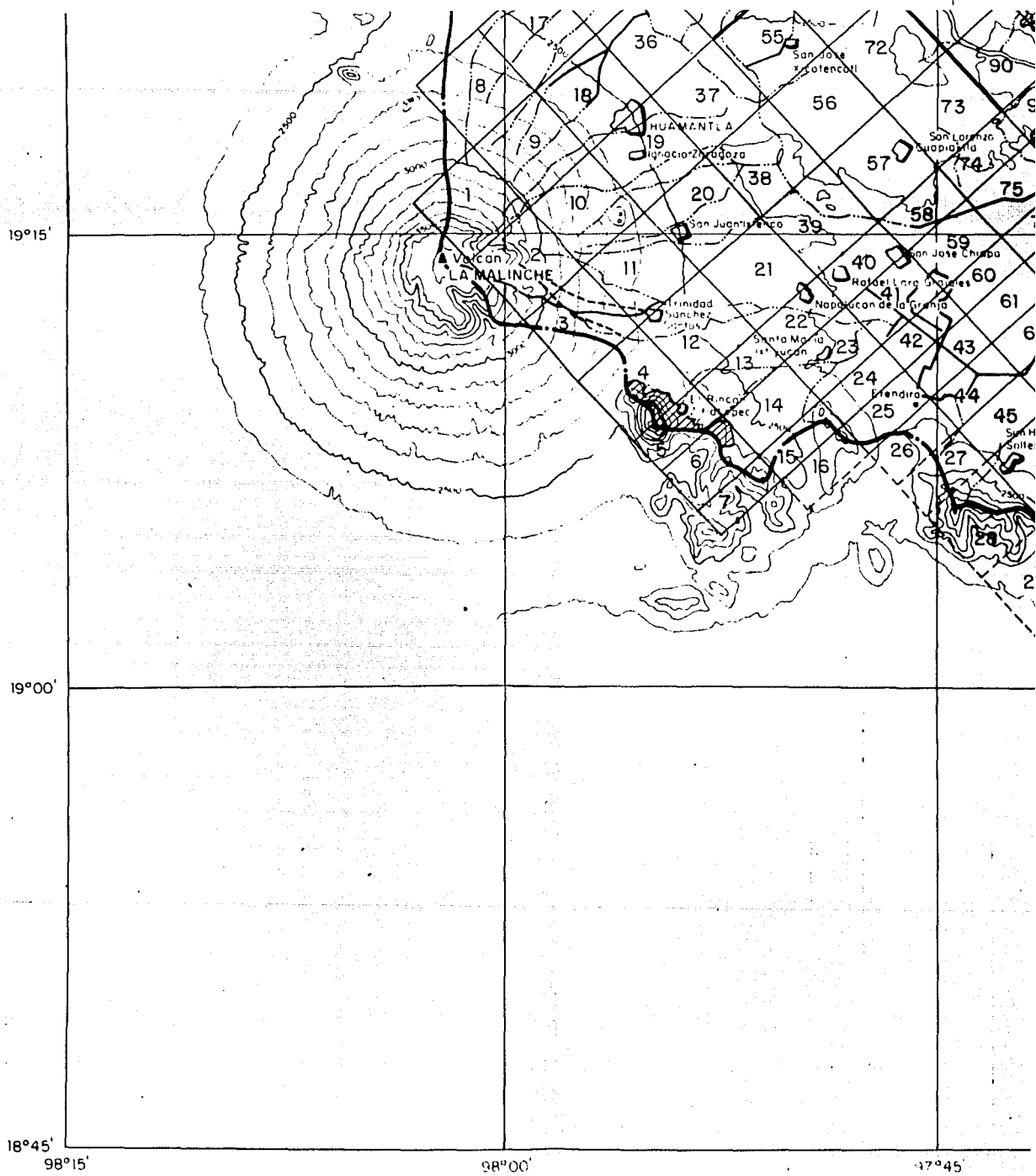
97°00'
70°00'

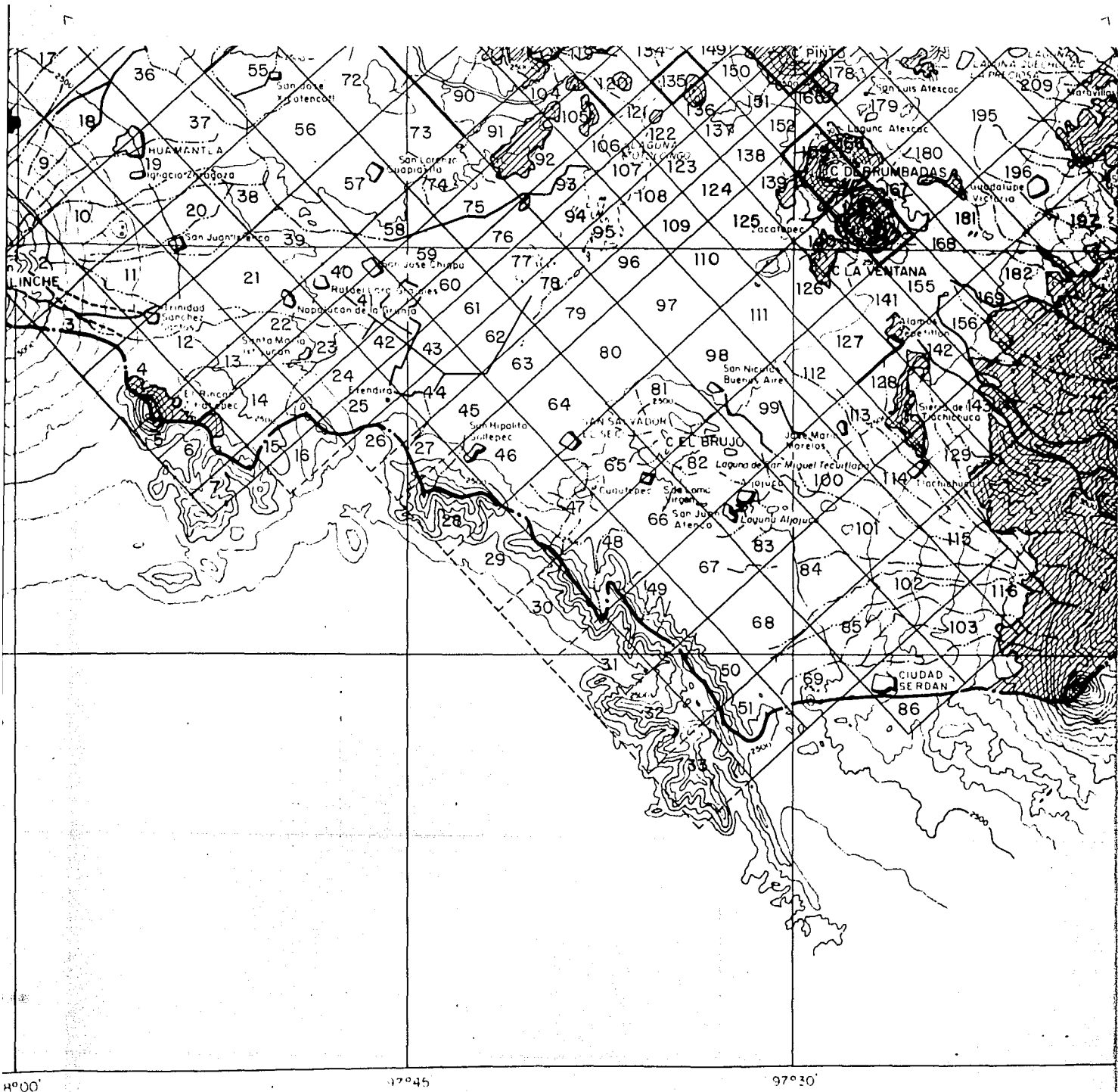
ALTO HIGA

19°45'



19°30'

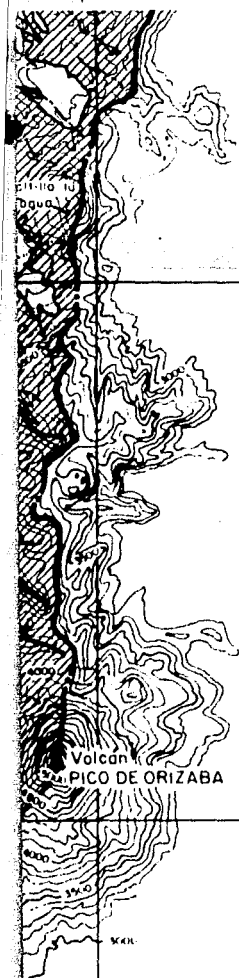




97°00'

97°45'

97°30'



19°15'

19°00'










18°45'

97°15'

97°00'

7

SIMBOLOS

-  Perímetro de la cuenca
-  Corriente que desaparece
-  Acueducto superficial
-  Acueducto subterráneo
-  Embudo
-  Curvas de nivel
-  Barreras en el modelo
-  Laguna intermitente
-  Laguna perenne

0 5 10

Kilómetros

1:250 000

INSTITUTO DE INGENIERIA **UNAM**
COORDINACION DE HIDRAULICA

**CUENCA DE ORIENTAL MALLA
Y NUMERACION DE LOS NODOS**

8368

040989

PLANO 4.3.1

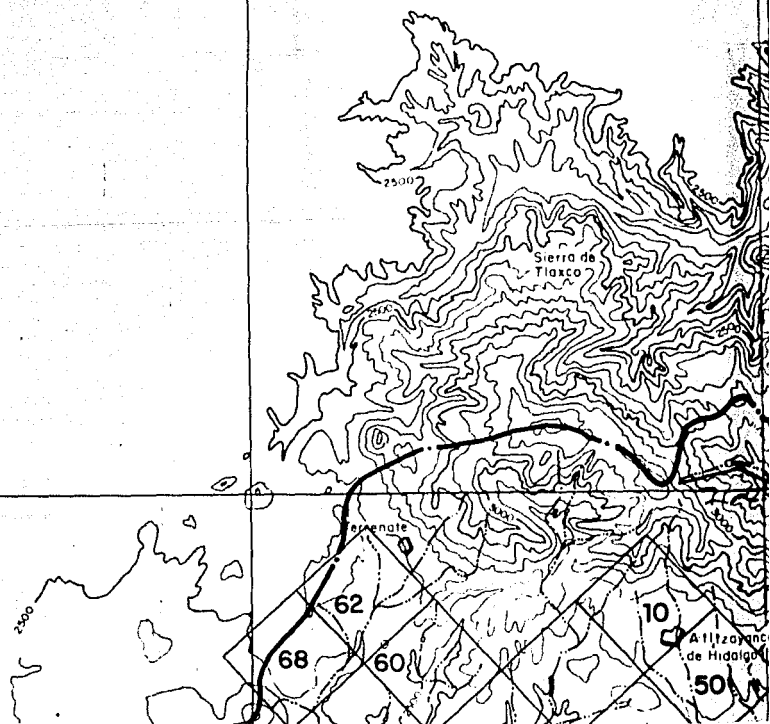
98°15'
20°00'

98°00'

97°45'

19°45'

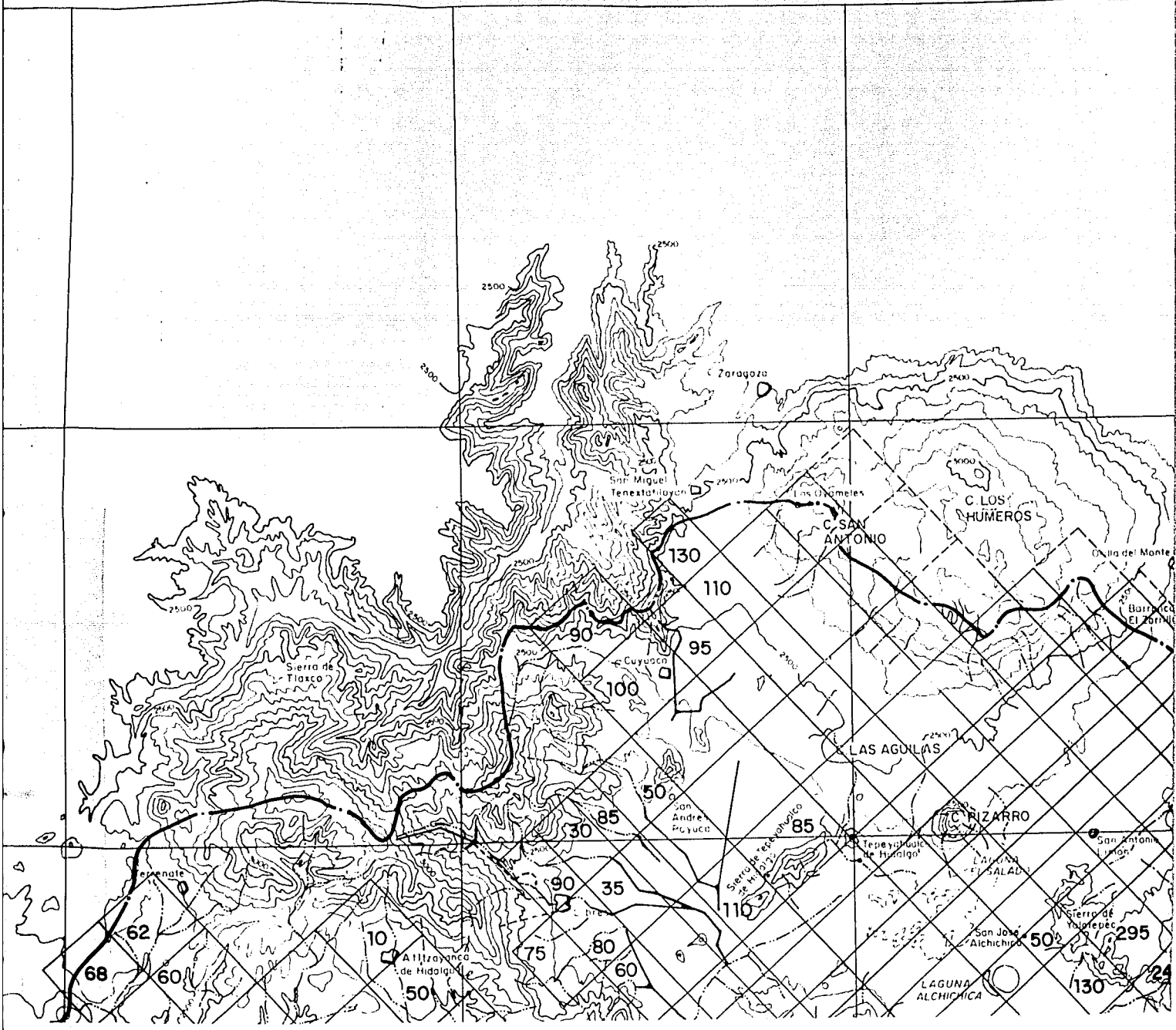
19°30'



98°00'

97°45'

97°30'



97°15'

97°00'
20°00'

ALTOTONGA

19°45'

C BUENAVISTA

PEROTE

C. COFRE DE PEROTE

19°30'

Sierra de
Tuxtepec

LOS ALFOS

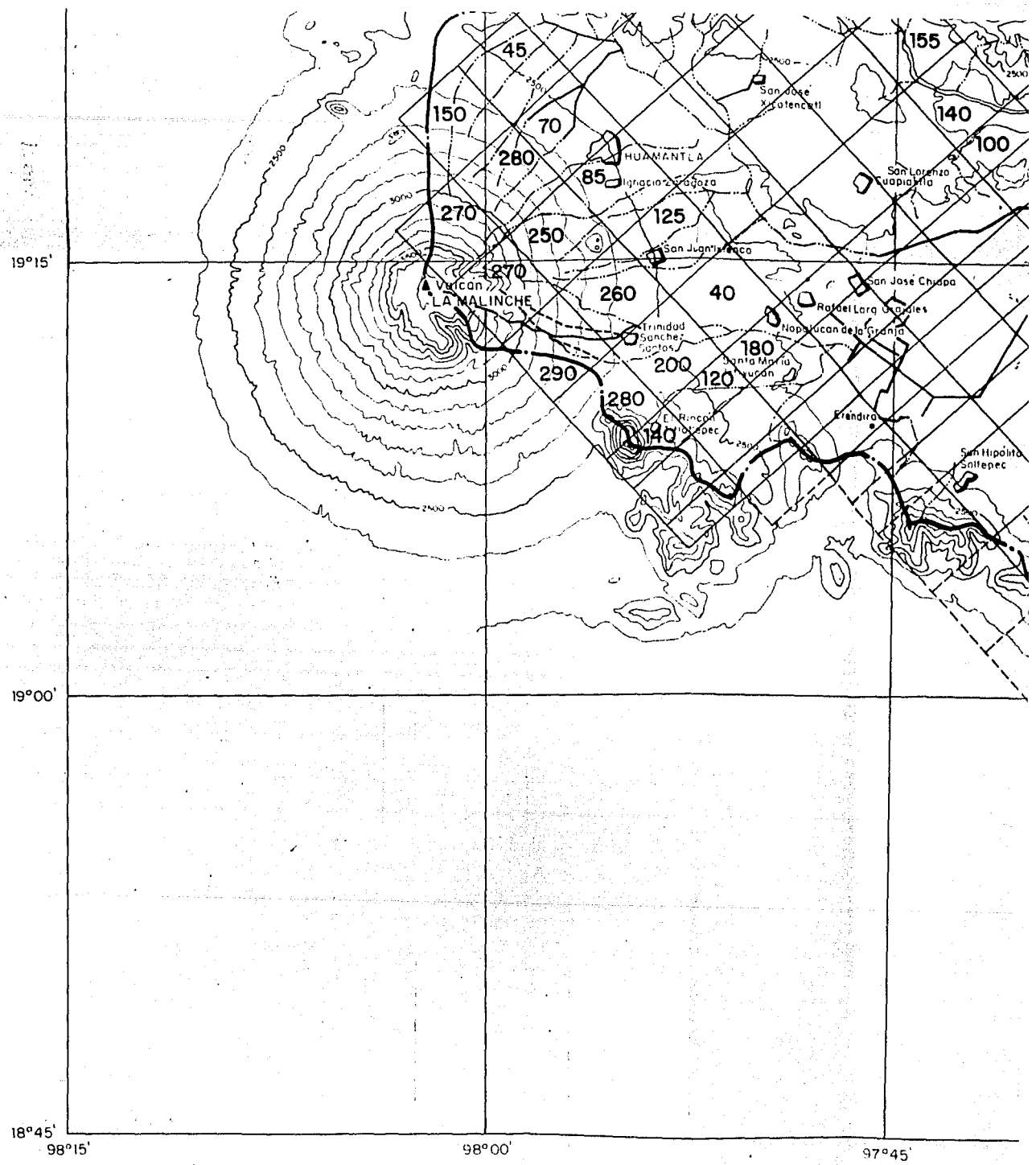
100

60
130

0
100

0
100

STANLEY





Cerro de la Cruz

Volcan
PICO DE ORIZABA

19°15'

19°00'









18°45'

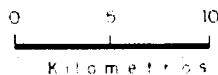
97°15'

97°00'

Nota : Recargas , en
litros/segundo

SIMBOLOS

-  Perímetro de la cuenca
-  Corriente que desaparece
-  Acueducto superficial
-  Acueducto subterráneo
-  Poblado
-  Curvas de nivel
-  Laguna intermitente
-  Laguna perenne



1:250 000

Nota: Recargas, en
litros/segundo

INSTITUTO DE INGENIERIA **UNAM**
COORDINACION DE HIDRAULICA

CUENCA DE ORIENTAL
RECARGAS PROMEDIO ANUALES

8368

040989

PLANO 4.4.I

98°15'
20°00'

98°00'

97°45'

19°45'

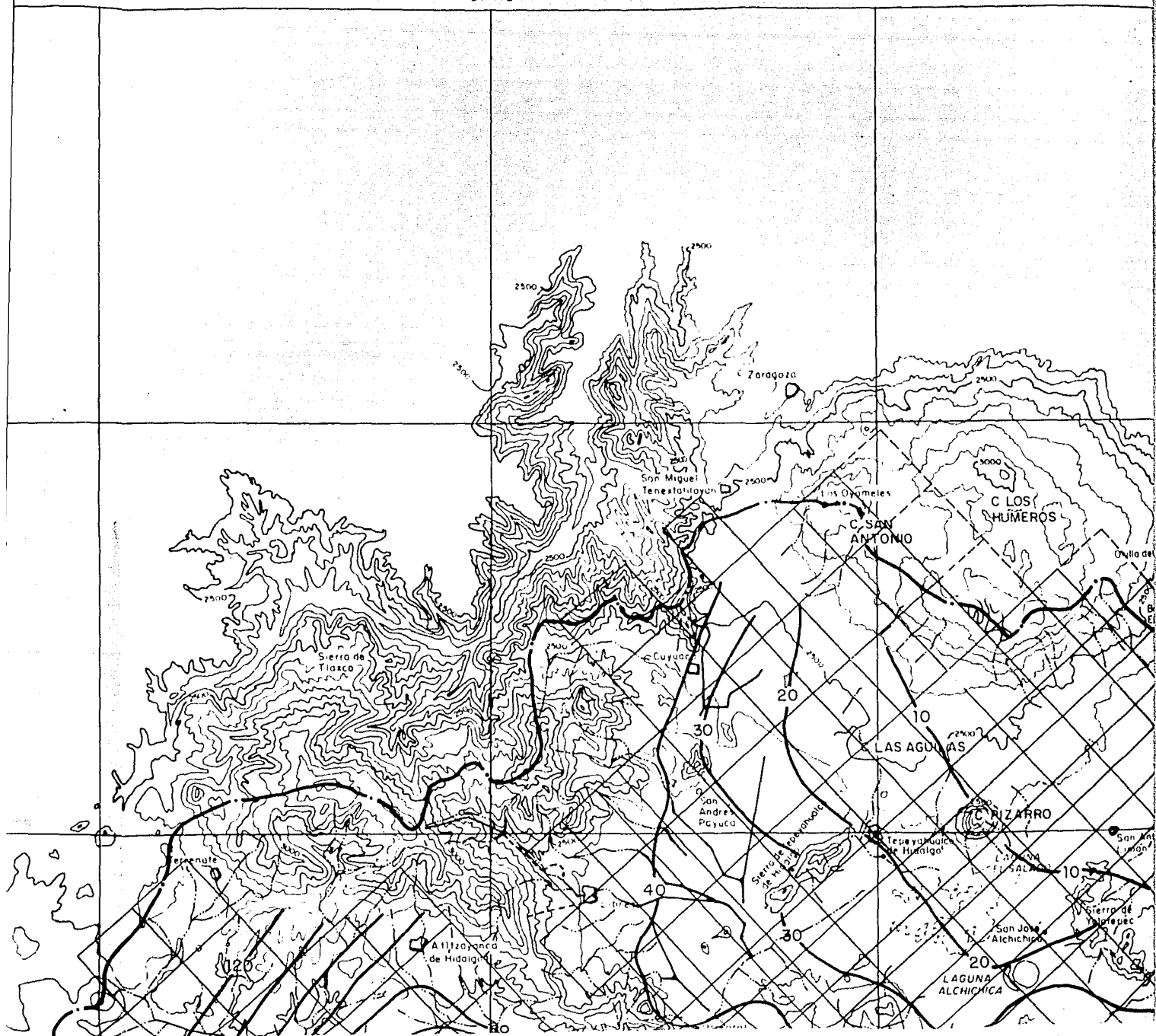
19°30'



98°00'

97°45'

97°30'

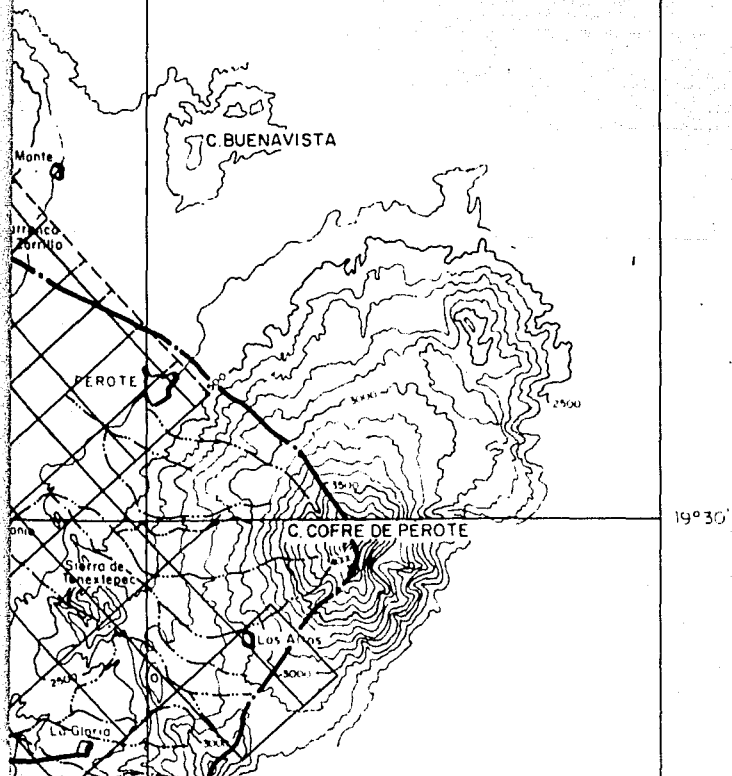


97°15'

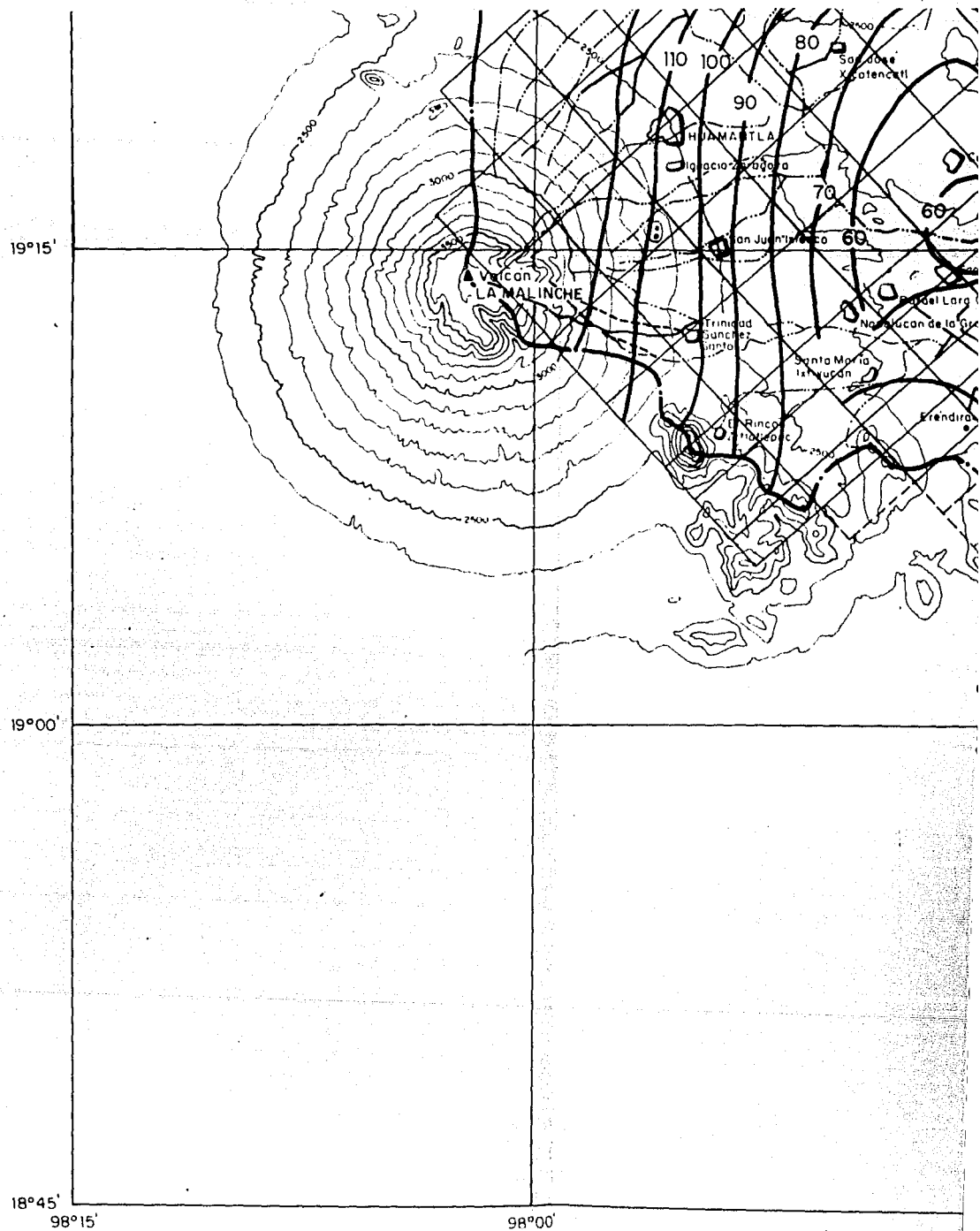
97°00'
20°00'

B
ALTOTONGA

19°45'



19°30'





19°15'

19°00'









18°45'

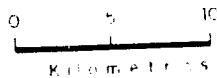
97°15'

97°00'

Nota : Piezom
la cotd

SÍMBOLOS

-  Perímetro de la cuenca
-  Corriente que desaparece
-  Acueducto superficial
-  Acueducto subterráneo
-  Poblado
-  Curvas de nivel
-  Laguna intermitente
-  Laguna perenne



1:250 000

Nota : Piezometría sobre
la cota 2300

INSTITUTO DE INGENIERIA **UNAM**
COORDINACION DE HIDRAULICA

CUENCA DE ORIENTAL
PIEZOMETRIA OBSERVADA EN 1967

8368

040989

PLANO 4.5.1