

EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

"FOTOGRAMETRÍA DIGITAL Y SUS APLICACIONES A LA GEOLOGÍA"

TESIS

Que para Obtener el Título de
GEÓLOGO

Presenta:

José Luis Peña Murguía



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA
DIVISIÓN DE CIENCIAS
EXACTAS Y NATURALES

Hermosillo, Sonora. Enero 2005

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

03 de Enero, 2005.

M.C. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA

Jefe del Departamento de Geología

Universidad de Sonora

Presente

Por este conducto me permito someter a su consideración el siguiente tema de Tesis:

**“FOTOGRAMETRIA DIGITAL Y SUS APLICACIONES
A LA GEOLOGIA”**

Esto es con el fin de que el alumno:

JOSE LUIS PEÑA MURGUIA

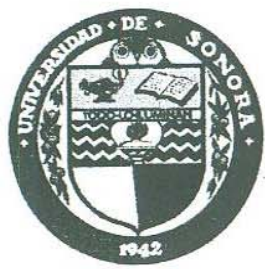
Pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título. En espera de su respuesta, quedo de Usted.

ATENTAMENTE


M.C. ALEJANDRA MONTIJO GONZALEZ
Director de Tesis


ING. ALMA PATRICIA SAMANO TIRADO
Co-Director de Tesis

C.c.p. Archivo
C.c.p. Interesado



04 de Enero del 2005.

M.C. ALEJANDRA MONTIJO GONZALEZ
Director de Tesis
ING. ALMA PATRICIA SAMANO TIRADO
Co-Director de Tesis
Departamento de Geología
Universidad de Sonora
P r e s e n t e.-

Por este conducto le comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Ustedes, intitulado:

**“FOTOGRAMETRIA DIGITAL Y SUS APLICACIONES
A LA GEOLOGÍA”**

Esto es con el fin de que el alumno:

JOSE LUIS PEÑA MURGUIA

pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título. Asimismo le comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

M.C. ISMAEL MINJAREZ SOSA
ING. ALMA PATRICIA SAMANO TIRADO
M.C. ALEJANDRA MONTIJO GONZALEZ

PRESIDENTE
SECRETARIO
VOCAL

Sin otro en particular, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

M.C. FRANCISCO J. GRIJALVA NORIEGA
Jefe de Departamento



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA

C.c.p. Interesado.
C.c.p. Archivo.

NOMBRE DE LA TESIS:

**“FOTOGRAMETRIA DIGITAL Y SUS APLICACIONES
A LA GEOLOGIA”**

NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

JOSE LUIS PEÑA MURGUIA

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.


M.C. ISMAEL MINJAREZ SOSA

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.


M.C. ALEJANDRA MONTIJO GONZALEZ

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.


ING. ALMA PATRICIA SAMANO TIRADO

**ATENTAMENTE
"EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA"**


M.C. FRANCISCO J. GRIJALVA NORIEGA
Jefe de Departamento.



**EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

Agradecimientos

Agradezco muy especialmente a mi directora de tesis y sinodales por haberme dado la oportunidad de desarrollar este tema de tesis y ayudarme en el desarrollo de mi trabajo.

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional en todo momento y así finalizar mis estudios universitarios y poder llevar a cabo este trabajo, a mi novia Lilia del Carmen Palomares C. que fue la clave de todo y mi fiel compañera.

A la empresa Horizons de México, S.A. de C.V. por su apoyo para la realización de esta tesis.

A la Universidad de Sonora por darme una formación de vida a través de sus conocimientos.

Índice

<u>Resumen</u>	1
<u>Introducción</u>	3
<u>Capitulo I</u>	
I.1.- Definiciones de Fotogrametría Digital.....	5
I.2.- Historia de la Fotogrametría.....	6
I.3.- Fases Fotogramétricas.....	8
I.4.- Ventajas y Desventajas.....	13
<u>Capitulo II</u>	
II.1.- Equipos de Trabajo de la Fotogrametría Digital.....	15
II.2.- Flujo de Trabajo de la Fotogrametría Digital.....	24
II.3.- Procesamiento Fotográfico.....	33
II.4.- Propiedades de las Fotografías Aéreas.....	33
<u>Capitulo III</u>	
III.1.- Productos Finales de la Fotogrametría Digital.....	35
<u>Capitulo IV</u>	
IV.1.- Aplicaciones.....	41
IV.2.-Aplicaciones en la Geología.....	43
<u>Recomendaciones</u>	56
<u>Bibliografía</u>	57

Resumen

En el presente trabajo se desarrolla de forma general la evolución de las principales fases fotogramétricas, aplicadas en sus principales áreas de trabajo, resaltando cada vez una mayor necesidad de contar con tecnologías automatizadas que den respuesta a las necesidades actuales.

También se presenta el enfoque conservador y a su vez revolucionaria en los avances tecnológicos trascendentales, llevados a cabo en diferentes épocas del desarrollo de la fotogrametría, desde instrumentaciones plenamente mecánicas, hasta digitales.

Este trabajo radica en las Estaciones Fotogramétricas Digitales (EFD), presentado sus diferentes etapas de la digitalización para obtener resultados con diversos enfoques, ligados principalmente a mapas digitales, ortofotos, animaciones en 3D, entre otros.

La fotogrametría se encuentra hoy en día, en un gran desarrollo de propuestas y soluciones, cada vez mas aplicables en las distintas disciplinas, desde la planeación de cualquier tipo de proyecto (construcciones, geológicos, ecológicos, catastrales, etc.), hasta la generación de un Sistema de Información Geográfica (GIS), a pesar de lo anterior es poco reconocida, teniendo como ventajas, costos y tiempos menores con precisiones de gran confiabilidad.

El objetivo de esta tesis tiene como propósito, el conocer su funcionamiento, así como su flujo de trabajo en la fotogrametría digital, presentando sus alcances y aplicaciones.

Todos los fundamentos desarrollados tienen como fin, el otorgar ideas generales de la fotogrametría al lector, para así ampliar sus conocimientos y obtener una imagen clara sobre como funciona la fotogrametría digital.

Esta recopilación de estudios muestra algunos ejemplos de equipos, para la digitalización fotogramétrica, desde su primera fase analógica, hasta su revolucionario proceso digital; a pesar de esto, siguen en desarrollo nuevas etapas de la fotogrametría, con las mismas técnicas empleadas actualmente, enfocadas cada vez mayor en avances y técnicas futuristas.

Introducción

La fotogrametría digital sigue los mismos pasos de la fotogrametría tradicional analítica y/o analógica, con los equipos óptico-mecánicos de restitución, con alto costo en momento de adquisición y después en su mantenimiento preventivo y suministro de piezas de repuesto.

El método fotogramétrico tradicional, consiste en la toma de fotografías aéreas consecutivas con sobre-posición longitudinal de 60%. En el caso de levantamientos de mediana y grande escala, se realizan varias líneas de vuelo con sobre-posición transversal de 30%, para obtener una cobertura completa del área objeto del levantamiento de planimetría y altimetría del terreno natural.

Dos fotografías aéreas con sobre-posición longitudinal de 60% forman un par estereoscópico.

El método fotogramétrico digital, se basa en la digitalización de cada fotografía con formato 23cm x 23cm desde la película aérea original (negativo) o las diapositivas con un escáner fotogramétrico.

La fotogrametría se encuentra hoy en día totalmente ligada a disciplinas, entornos y sistemas digitales que permiten la máxima automatización de las tareas.

Con el gran desarrollo de la informática gráfica y el tratamiento digital de imágenes en los últimos años, surgió la posibilidad de realizar el proceso de restitución estereoscópica, no sobre las películas fotográficas sino sobre copias digitales, visualizadas en la pantalla de una computadora. Este concepto conduce a nuevas posibilidades en el campo de la fotogrametría.

Desde el surgimiento de la fotogrametría digital, ligado principalmente a los avances de la informática, se han desarrollado numerosos sistemas digitales tendientes a resolver los problemas fotogramétricos tradicionales y otros más modernos.

En virtud de esos avances, existe actualmente la posibilidad de procesar gran cantidad de información (problema fundamental de la fotogrametría digital), y de automatizar diversas tareas.

Es precisamente esta posibilidad de automatización una de sus principales virtudes, y es donde los estudios y las investigaciones estuvieron centradas en estas últimas décadas.

Actualmente, la calidad y el costo de los sistemas fotogramétricos digitales, están vinculados con el grado de automatización alcanzable por los mismos, aunque su potencialidad está limitada en cierto modo, por las características del terreno. De todas maneras, es innegable que las herramientas y los algoritmos manejados por diferentes sistemas, aumentan o reducen su capacidad. Así, existen en el mercado diversos productos con diferencias sustanciales, tanto en el aspecto técnico como económico.

Otro punto a tener en cuenta, es la necesidad de emplear tiempo y dinero en la formación de recursos humanos para manejar el sistema adquirido. Este costo está directamente relacionado con su complejidad. No tiene sentido alguno poseer un sistema con altas posibilidades técnicas, si no se dispone del personal necesario para aprovechar las mismas.

Capítulo I

I.1.- Definiciones

La fotogrametría es el conjunto de métodos y procedimientos, mediante los cuales podemos deducir de un objeto en la fotografía, la forma y dimensiones del mismo; el levantamiento fotogramétrico es la aplicación de la fotogrametría a la topografía.

Para poder hablar de fotogrametría, es necesario citar, algunas de las definiciones más utilizadas actualmente con la finalidad de analizar y comparar estos conceptos. Una de las definiciones de fotogrametría es la que expone H. Bonneval :

"... Técnica para estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando medidas realizadas sobre una o varias fotografías..."

Asociación Americana de Fotogrametría (1980):

"... Como el arte, ciencia y tecnología para obtener información sobre objetos físicos y el ambiente a través de procesos de grabación, medición e interpretación de imágenes fotográficas y el modelo de energía registrada radiante electromagnética y otros fenómenos... "

Las raíces griegas de la palabra fotogrametría son:

Y	La ciencia de
Gram.	Algo escrito o dibujado
Metro	Medida
Foto	Escritura con luz (fotografía).

I.2.- Historia de la Fotogrametría

La fotogrametría fue inventada en 1851 por Aime Laussedat y ha continuado su desarrollo en los últimos 150 años. Con el transcurso del tiempo, el desarrollo de la fotogrametría ha pasado a través de las fases de fotogrametría de plancheta, fotogrametría análoga, fotogrametría analítica y recientemente ha entrado en la fase de fotogrametría digital.

La aplicación tradicional, y la más grande, es la extracción de información topográfica (es decir, mapas topográficos) de imágenes aéreas. Sin embargo, las técnicas Fotogramétricas también han sido aplicadas a procesar imágenes de satélite e imágenes de rango cercano, con el objeto de adquirir información topográfica y no topográfica de los objetos fotografiados.

En 1855, Nadar (Gaspard Felix Tournachon) fue el primero en usar la fotografía aérea en un globo aerostático en Paris.

En 1895, Edouard Deville invento el primer instrumento estereoscópico llamado "esteroplanigrafo".

Aunque se continuaba trabajando con la fotogrametría, se presentaban dificultades de gran importancia, ya que la restitución de un punto implicaba una gran cantidad de cálculos, hasta que en 1901 Carl Pulfrich, aplico el principio de la visión en relieve para efectuar medidas estereoscópicas, por medio de un aparato de su invención llamado "estereocomparador".

En 1903, con el desarrollo de la aviación por los hermanos Wright continuo también el avance de la fotogrametría y durante la primera guerra mundial la técnica de levantamientos aéreos fue mejorada y desarrollada para la obtención masiva de información.

En 1909 se dio el paso definitivo para la consagración de la fotogrametría terrestre, Von Orel, al construir el aparato denominado "estereoautografo", primer aparato utilizado para la construcción y dibujo automático de planos, en el caso de ejes ópticos horizontales, es considerado como el iniciador de la fotogrametría aérea, puesto que él era el primero en tener éxito para aplicar los principios fotogramétricos a las fotografías aéreas.

En 1921 Reinhard Huugershoff invento el primer ploter análogo llamado "Autocartografo"

En 1923, Poivilliers desarrolla un estereoploter óptico-mecánico.

En 1945, se Desarrollan las cámaras fotográficas y ploters análogos.

En 1957: se inventaron lo primeros ploters analíticos, que primero fueron utilizados por U. Helava

Fue especialmente en la Segunda Guerra que las fuerzas armadas dieron especial interés al desarrollo de esta nueva técnica para acelerar sus procesos de información logrando grandes avances en el desarrollo de métodos y equipos hasta llegar a nuestra época.

La interpretación de fotografías aéreas también fueron empleadas extensivamente en el reconocimiento e inteligencia, desarrollando nuevos progresos en instrumentos y técnicas.

Las contribuciones en la instrumentación y las técnicas durante los últimos 35 años han hecho a la fotogrametría tan exacta, eficiente, y ventajosa que actualmente, muy pocos levantamientos topográficos son hechos por otros medios.

En 1980: Debido a las mejoras en hardware y software, la fotogrametría digital gana más importancia, y se desarrolla el estereoploter digital.

I.3.- Fases Fotogramétricas

Fotogrametría Ordinaria (1850 - 1900)

Antes de la invención del aeroplano, las fotografías tomadas en el terreno se utilizaron para extraer las relaciones entre los objetos usando principios geométricos. Esto ocurrió durante la fase de la fotogrametría de plancheta.

Este método tuvo vigor hasta el principio del presente siglo; el inconveniente más grande que tenía este sistema era la identificación de un mismo punto en dos fotografías tomadas desde distintos puntos de vista.

Fotogrametría Análoga (1900 - 1960)

La fotogrametría análoga, empezando con la medición estereoscópica en 1901, los instrumentos ópticos o mecánicos se utilizaron para reconstruir la geometría tridimensional de dos fotografías traslapadas. El principal producto de esta fase fueron los mapas topográficos.

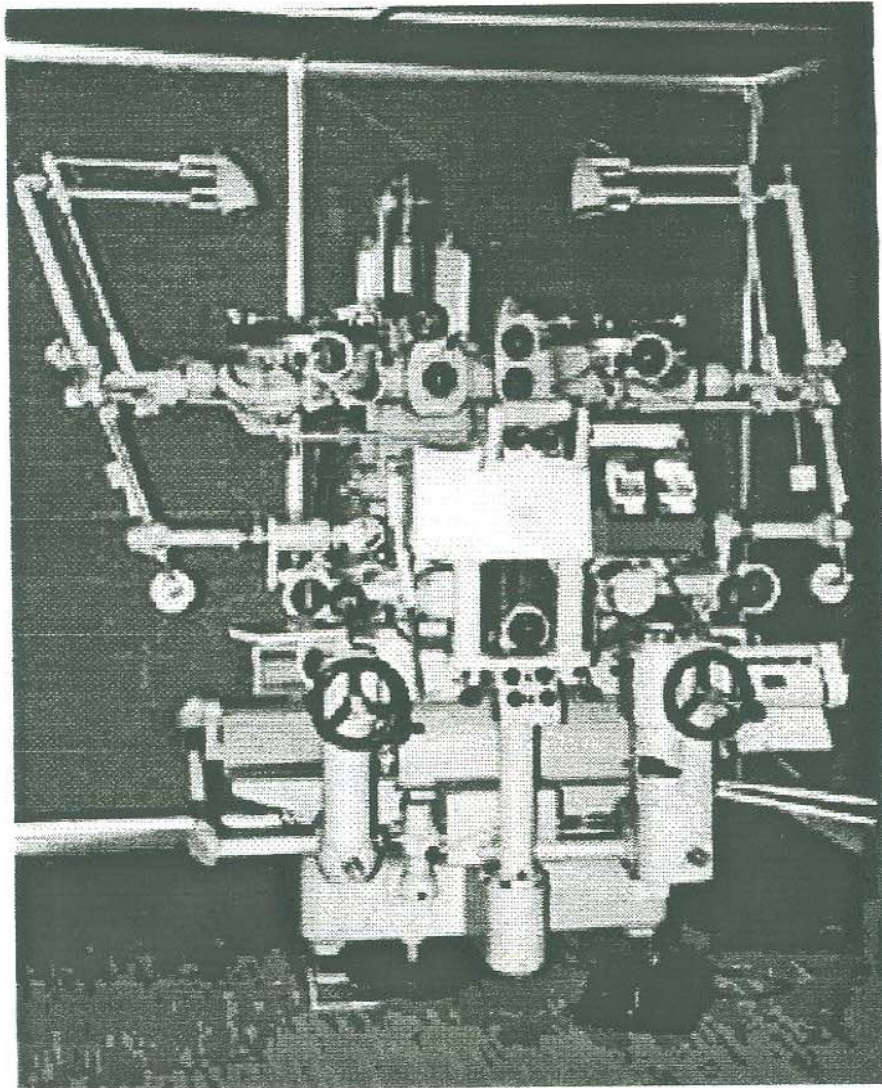


Fig. No.1 Estereoplanigrafo marca Zeiss modelo C-8 desarrollado en 1986 por Edouard Deville

Fotogrametría Analítica (1960 – 1900?)

El computador reemplazo algunos componentes ópticos y mecánicos muy costosos. Los instrumentos resultantes fueron híbridos análogos / digitales. La aerotriangulación analítica, los restituidores analíticos y los proyectores de ortofotos fueron los principales desarrollos durante esta fase.

Los productos de la fotogrametría analítica pueden ser mapas topográficos pero también pueden ser productos digitales como mapas digitales y modelos digitales de elevación (DEM).

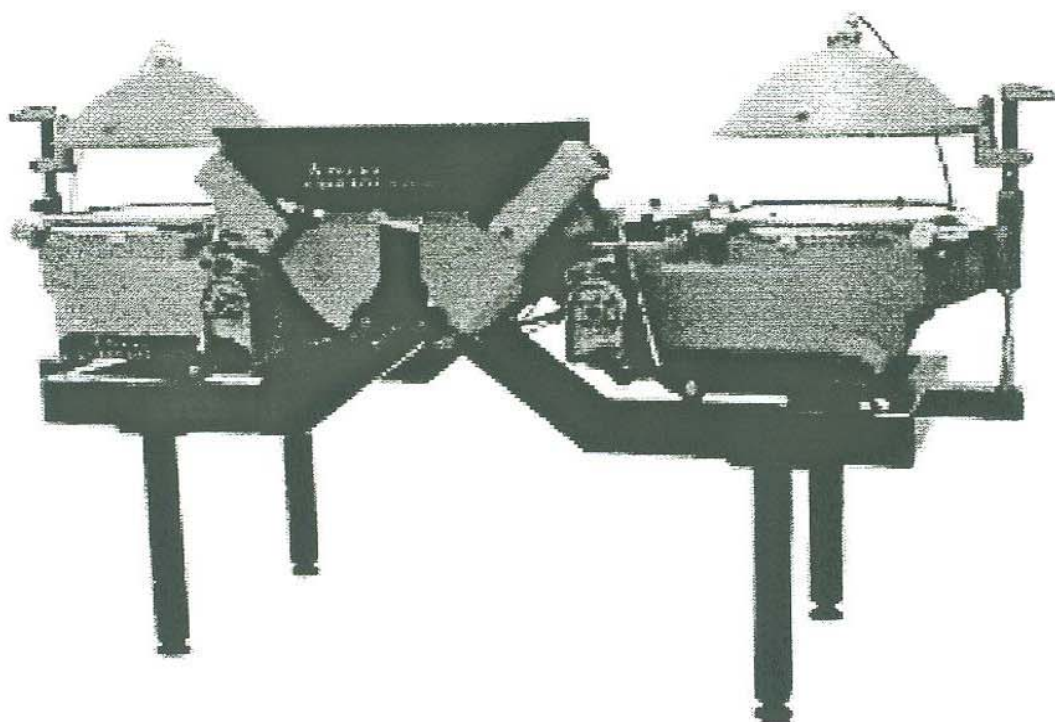


Fig. No.2 Estereoploter analítico marca Wild, modelo B8

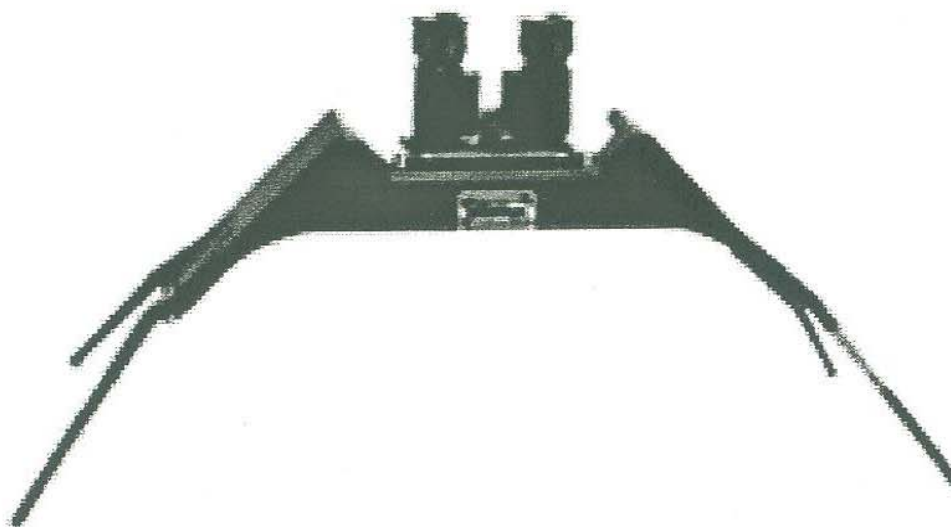


Fig. No. 3 Estereoscopio de lentes marca Zeiss



Fig. No. 4 Estereoscopio Dual (doble observación) tipo Condor T-22 de Alan Gordon Int. Co.

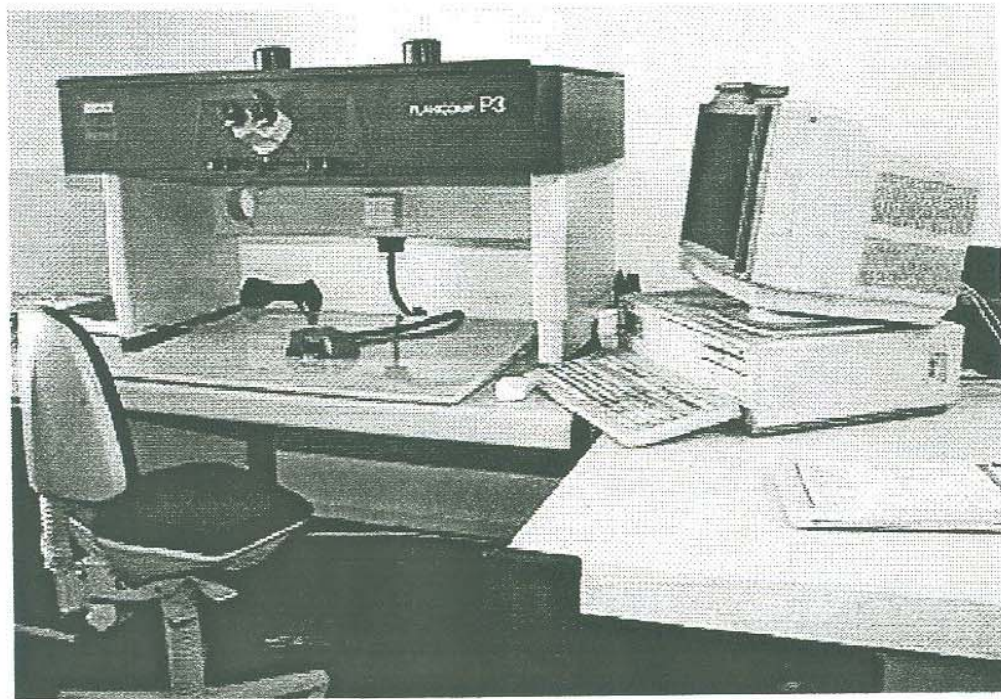


Fig. No.5 Restituidor Analítico llamado Planicomparador marca Zeiss modelo P3

Fotogrametría Digital (1990-presente)

La fotogrametría digital es aplicada a imágenes digitales que son almacenadas y procesadas en un computador. Las imágenes digitales pueden ser escaneadas de fotografías convencionales o ser capturadas directamente mediante cámaras digitales. Muchas tareas Fotogramétricas pueden ser automatizadas en la fotogrametría digital (por ejemplo, extracción de DEM y generación de ortofotos digitales). La fotogrametría digital es a veces llamada fotogrametría de copia blanda.

Los productos obtenidos están en formato digital, tales como mapas digitales, DEM y ortofotos digitales que están grabados en medios magnéticos. De esta manera, ellos pueden ser fácilmente almacenados, administrados y aplicados por los usuarios. Con el desarrollo de la fotogrametría digital, las técnicas Fotogramétricas se pueden integrar mas fácilmente con la teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG).



Fig. No.6 Estación Fotogrametrica Digital (EFD), modelo Delta

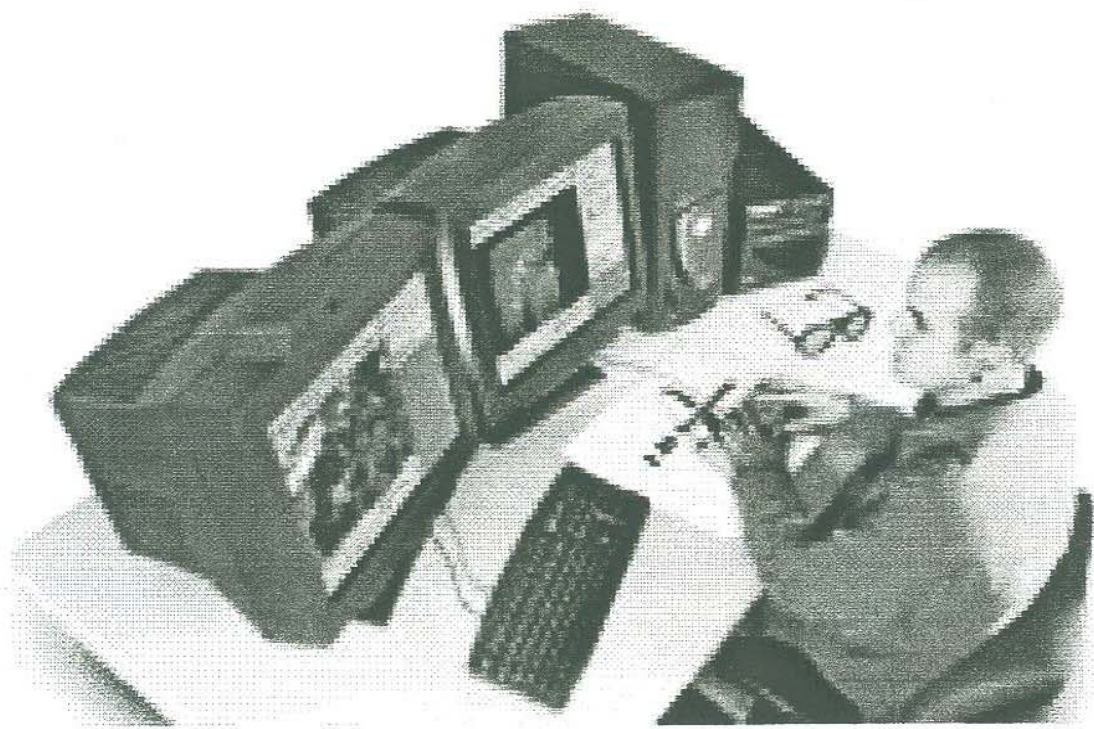


Fig. No.7 Estación Fotogramétrica Digital (EFD) marca Helava, modelo DPW670

I.4.- Ventajas y Desventajas.

Ventajas

El uso de la fotografía aérea esta cambiando de formato papel a formato digital debido al uso común de escáner, lo cual permite, mediante software especializado un uso más efectivo tanto en el aspecto fotogramétrico como en el análisis de las imágenes.

En los sistemas basados en imágenes digitales, las precisiones ópticas o mecánicas, carecen de significado, puesto que ninguna parte óptica o mecánica esta involucrada en el sistema de fotogrametría digital, y la precisión del sistema esta relacionada solamente con la precisión del escáner de las imágenes y de la resolución de las imágenes digitales.

- Como planos pueden llegar a ser más exactos que los levantamientos sobre el terreno, sobre todo en grandes extensiones.
- Se pueden indicar áreas claves donde verificar la interpretación con mínimo de tiempo y esfuerzo.
- La visión que se adquiere de una extensa zona de terreno, eliminando áreas sin interés y trabajo físico.
- La localización exacta sobre el terreno de los datos que se observe.
- Mayor capacidad a menor costo.
- La eliminación de todos los dispositivos mecánicos (ninguna calibración).
- Hardware comercialmente disponible.
- Aumento de productividad 4 veces en proporción sobre los métodos no digitales.
- Alto nivel de automatización.
 - Extracción automática de datos del terreno.
 - Aerotriangulación automatizada.
 - Generación automática de ortofotos y mosaicos.
 - Balance automático radiométrico de la imagen.
- Gran precisión y desempeño.

Desventajas

Se puede indicar que el papel que representa la fotogrametría digital en la automatización del proceso cartográfico fotogramétrico es básico. No obstante es necesario tener en cuenta que la fotogrametría digital aun se encuentra en las primeras fases de desarrollo y se debe de enfrentar a técnicas muy desarrolladas y que alcanzan algunos resultados muy buenos.

Necesidad de disponer de un elevado volumen de almacenamiento.

Se trata de una técnica de una reciente aparición, por lo que en muchos aspectos aun pueden ser inmaduras.

Capítulo II

II.1.- Equipos de Trabajo de la Fotogrametría Digital

Aeronave

Los vuelos fotogramétricos se realizan utilizando una aeronave tipo Cessna (Fig. No.8) especialmente adaptada, equipada además con sistema de manejo de vuelos fotográficos y de navegación (CCNS-GPS) permitiendo automatizar la toma de las fotografías de acuerdo al plan de vuelo, las aeronaves cuentan también con el sistema WWMP (World Wide Mission Planning), posibilitando alcanzar y conservar la altitud de vuelo proyectada, sin provocar dislocaciones y rotaciones constantes.

El sistema guía al piloto a la zona. Le indica la geometría de las líneas, fotos y líneas que faltan por realizar.



Fig. No.8 Aeronave Tipo Cessna para vuelos de Fotografía aérea

Cámara Fotográfica Aérea

En un estudio fotogramétrico o de interpretación es necesario contar con el material del que se pueda extraer la información deseada, este material lo representan las fotografías aéreas, siendo en blanco y negro y de color. Cada una de estas fotografías tienen objetivos diferentes, sin embargo, el mecanismo de toma es el mismo para todas, empleándose una cámara montada en la parte inferior de la cabina de un avión equipado para este fin (Fig. No.9).

Las cámaras aéreas de ultima generación incorporan nuevas lentes y dispositivos que mejoran la calidad fotográfica, alcanzando mayor resolución, con menor distorsión, y mejorando la geometría del vuelo. Por lo tanto todos procesos que implican identificación automática de imágenes serán mejorados.

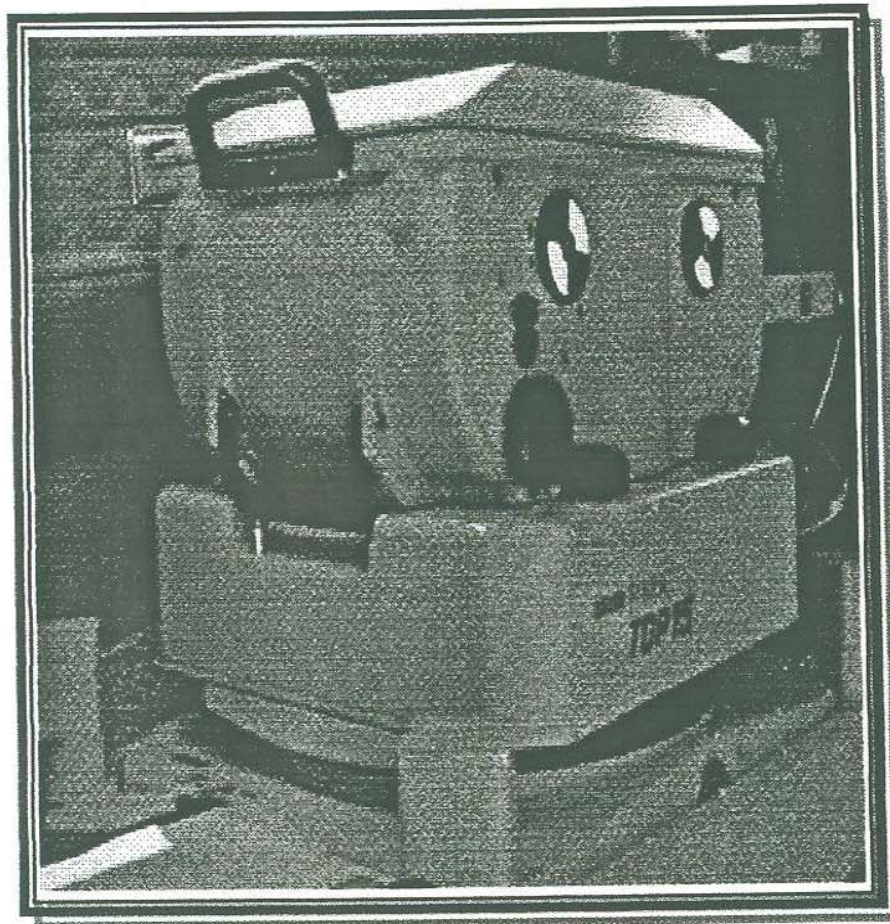


Fig. No.9 Cámara fotogramétrica automática modelo Zeiss RMK TOP 15 montada sobre base giro estabilizadora y mecanismo Forward Motion Compensation (FMC).

La cámara tiene la capacidad de marcar la hora de cada toma de fotografía, además de marcar la distancia focal, línea de vuelo, número de fotografía y alguna descripción del proyecto.

El FMC (Forward Motion Compensation), compensación por desplazamiento de la imagen en el momento de la exposición, lo cual nos garantiza una nitidez de imagen mucha mayor ya que este mecanismo lo que hace es avanzar la película para compensar el desplazamiento del avión en el lapso de tiempo que tarda la cámara en abrir y cerrar el obturador.

Es igualmente importante el contar con la base giro-estabilizadora ya que esto nos garantiza cumplir con los requerimientos de Deriva, Verticalidad e Inclinación relativa, dando como resultado fotografías con gran calidad de imagen, además de poder realizar la cobertura fotográfica de acuerdo a lo proyectado en el plan de vuelo.

AMC (Angular Motion Control) , compensación de movimientos angulares por estabilizadores de giros, utilizando este tipo de cámaras para unas especificaciones de precisión y de fotointerpretación, con FMC-AMC y el aumento de resolución de las lentes, se puede volar a mayor altura para una misma escala de cartografía, lo que reduce el número de fotos requeridas por unidad de área.

GPS Aerotransportado (Airborne GPS)

ABGPS es el término usado para la obtención de las coordenadas del centro de cada fotografía aérea, el tiempo de una foto es determinada por el envío de una señal eventual de la cámara al receptor GPS (Sistema de Posicionamiento Global), el cual graba precisamente el tiempo en que la foto fue tomada. Lo cual nos permite requerir de menos puntos de control terrestre.

Esta tecnología nos da más flexibilidad en la ubicación de los puntos de control lo que puede ser determinante en caso de no poder llegar a zonas donde un punto de control es indispensable (Sin esta tecnología) ya sea por restricciones físicas o por algún propietario que no permita el acceso. Al contar con esta capacidad es posible garantizar llevar a cabo la aereotriangulación, cumpliendo además con las especificaciones de este proyecto.

El equipo utilizado es una unidad (en la aeronave) GPS de doble frecuencia y marcador de eventos y otra unidad similar en tierra (Fig. No.10).

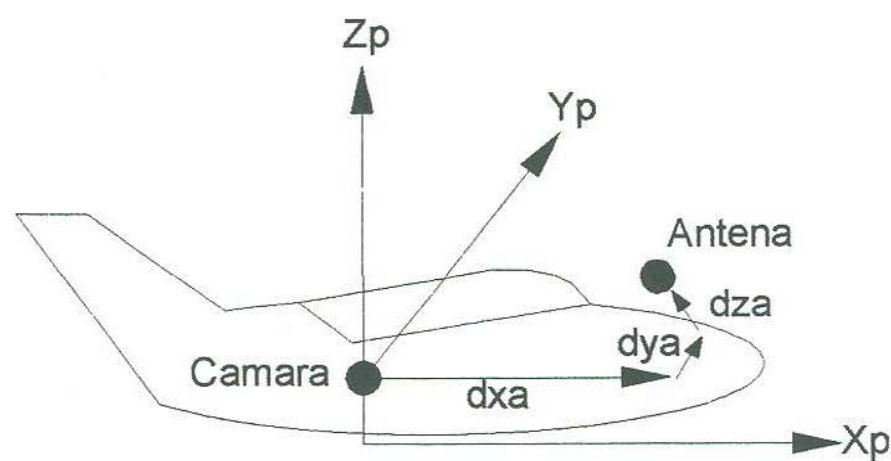


Fig. No.10 Esquema grafico del Funcionamiento del ABGPS

Estación Fotogramétrica Digital (EFD)

Una estación fotogramétrica digital es básicamente una computadora (PC) y una serie de dispositivos especiales y periféricos específicos, que permite realizar todas las funciones de un restituidor fotogramétrico analítico de forma totalmente digital. (Fig. No.11).

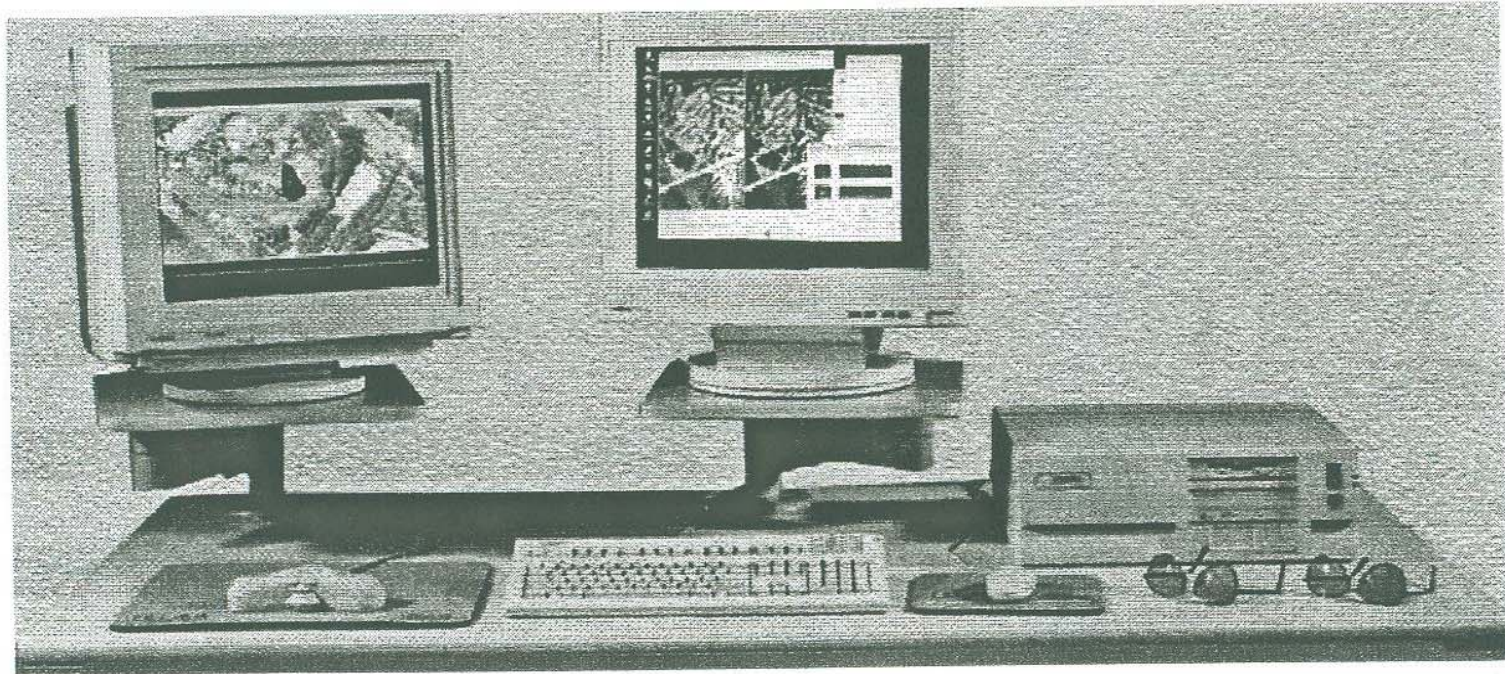


Fig. No.11 Estación Fotogramétrica Digital (EFD), que incluye: 3D mouse estereográfico sobre monitor izquierdo y lentes estereoscópicas.

El diseño está basado enteramente en algoritmos de fotogrametría analítica y tecnología de imágenes aéreas rasterizadas.

A diferencia de los restituidores analíticos convencionales, no utilizan subsistemas ópticos o mecánicos. La solución se implementa totalmente vía manipulación computarizada de imágenes rasterizadas. No requieren calibración alguna y sus prestaciones pueden ser mejoradas simplemente actualizando la PC o agregando nuevos módulos de software.

Adicionalmente al teclado y la consola del monitor, la estación de trabajo provee un mouse de tres botones y trackball (3D mouse) para el control interactivo de la estación fotogramétrica digital de trabajo, también provee un monitor de extracción estereo de imágenes.

El 3D mouse controla el movimiento horizontal (xy) del cursor de la imagen desplazada, el trakball muestra un control separado para la elevación (z), independiente al movimiento horizontal del mouse, se pueden configurar las funciones del mouse y del trakball de acuerdo a las preferencias requeridas del operador.



- Monitor de Extracción Estereo.

Las imágenes estereo digitales son observadas en la estación fotogramétrica digital (EFD) usando un dispositivo estereoscópico a color de cristal líquido polarizado y lentes sincronizados.

El lado de la pantalla con el modulador de cristal líquido provee una polarización diferente para el ojo izquierdo y el ojo derecho de cada imagen, los lentes especiales polarizados decodifican el polarizado de la visión que se le provee al ojo derecho e izquierdo. El modulador de cristal líquido es sincronizado con el procesador gráfico, entonces esto cambia la polarización a la misma frecuencia como las dos imágenes que son expuestas.

Escáner Fotogramétrico

Los escáneres fotogramétricos son dispositivos especiales con capacidad de almacenar imágenes de gran calidad y excelente exactitud de posición.

El uso de este tipo de escáneres conduce a exactitudes geométricas similares a las de los instrumentos tradicionales de fotogrametría análoga y digital. Estos escáneres son necesarios en aplicaciones fotogramétricas digitales que tengan requerimiento de alta exactitud.

La digitalización de imágenes analógicas se ha convertido en una nueva tecnología de hardware, clave para la moderna fotogrametría digital. Desde la introducción de escáneres fotogramétricos especializados a finales de los 80's, puede observarse un desarrollo gradual y una mejoría en la calidad de los escaneos resultantes, originalmente, la especificación más importante para estos equipos era la preescisión geométrica del scanner. Cada vez hay más preocupación por el buen color y el rendimiento radiométrico.

El escaneo fotogramétrico tiene un interés creciente con la llegada de la fotogrametría digital. Al final de la década de los '80, la tecnología de escaneo que existía entonces no tenía la estabilidad suficiente para transferir la precisión geométrica de la película fotogramétrica al formato digital.

Una vez procesada la película fotográfica, se procede al escaneo de las imágenes, que es la forma de convertir una fotografía aérea tradicional a formato digital, las imágenes se escanean a una resolución de 14 micrones en un escáner de alta resolución automatizado, en formato de Tipo: TIFF, IMG y VIT.

Los escáneres a utilizarse en este procedimiento son generalmente de cama plana, con el fin de evitar cualquier deformación debida al ritmo y forma de escaneo, e idealmente, conservar las marcas fiduciaras así como la información ubicada en los márgenes de cada fotografía aérea. (Fig. No. 12).

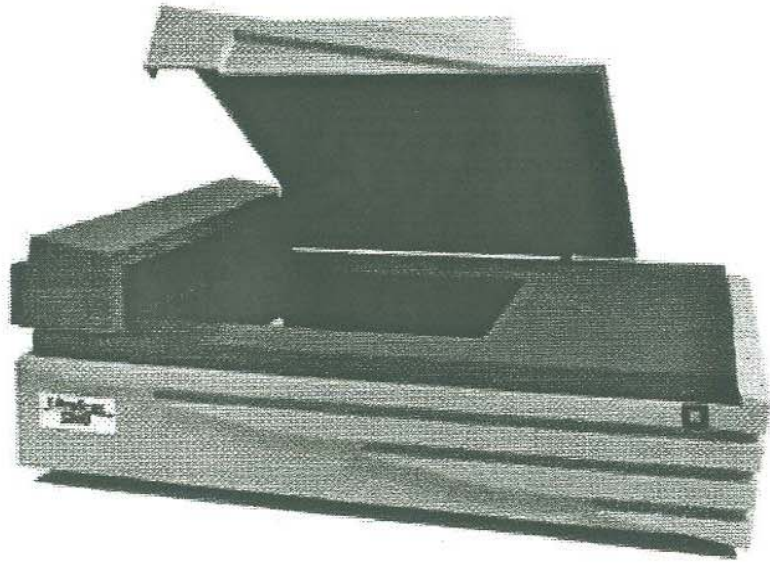


Fig. No.12 Escáner de alta resolución modelo UltraScan 5000, Vexcel Corporation.

Uno de los factores principales que contribuye a la exactitud general de la aerotriangulación y de la ortorectificación es la resolución de las imágenes que se están usando. La resolución de las imágenes es comúnmente determinada por la resolución de escaneo (cuando se están usando fotografías en película) o por la resolución del píxel del sensor. Con el objeto de optimizar la exactitud final de una solución hay que considerar la resolución de escaneo. La resolución apropiada de escaneo esta determinada comparando los requerimientos de exactitud y el tamaño del proyecto de cartografía lo mismo que el tiempo requerido para procesar el proyecto. La tabla No. 1 de resoluciones de escaneo (Scanning Resolutions) contiene una lista de las resoluciones de escaneo asociadas con varias escalas de fotografía y el tamaño de la imagen.

Tabla No.1 Resolución de escaneo

	12 micrones (2117 dpi)	16 micrones (2117 dpi)	25 micrones (2117 dpi)	50 micrones (2117 dpi)	85 micrones (2117 dpi)
escala fotográfica 1:	cobertura del terreno (mts)	cobertura del terreno (mts)	cobertura del terreno (mts)	cobertura del terreno (mts)	cobertura del terreno (mts)
1800	0.0216	0.0288	0.045	0.09	0.153
2400	0.0288	0.0384	0.06	0.12	0.204
3000	0.036	0.048	0.075	0.15	0.255
3600	0.0432	0.0576	0.09	0.18	0.306
4200	0.0504	0.0672	0.105	0.21	0.357
4800	0.0576	0.0768	0.12	0.24	0.408
5400	0.0648	0.0864	0.135	0.27	0.459
6000	0.072	0.096	0.15	0.3	0.51
6600	0.0792	0.1056	0.165	0.33	0.561
7200	0.0864	0.1152	0.18	0.36	0.612
7800	0.0936	0.1248	0.195	0.39	0.663
8400	0.1008	0.1344	0.21	0.42	0.714
9000	0.108	0.144	0.225	0.45	0.765
9600	0.1152	0.1536	0.24	0.48	0.816
10800	0.1296	0.1728	0.27	0.54	0.918
12000	0.144	0.192	0.3	0.6	1.02
15000	0.18	0.24	0.375	0.75	1.275
18000	0.216	0.288	0.45	0.9	1.53
24000	0.288	0.384	0.6	1.2	2.04
30000	0.36	0.48	0.75	1.5	2.55
40000	0.48	0.64	1	2	3.4
50000	0.6	0.8	1.25	2.5	4.25
60000	0.72	0.96	1.5	3	5.1
b/n (MB)	363	204	84	21	7
color (MB)	1089	612	252	63	21

la columna de cobertura del terreno se refiere al área que cubre un píxel en el terreno

Una fotografía a escala 1:40,000 escaneada a 25 micrones[(1,016 puntos por pulgada (dpi))
tiene un cubrimiento en el terreno por píxel de 1 metro x 1 metro.

El tamaño del archivo resultante es de aproximadamente de 85 megabytes, si se asume que
la fotografía tiene un formato de 9 x 9 pulgadas.

II.2.- Flujo de Trabajo de la Fotogrametría Digital

Las diferentes fases de que se compone un flujo de trabajo en fotogrametría digital, permitiendo la automatización de proceso, antes solamente manuales son:

- Planeación de Proyecto
- Vuelo fotogramétrico
- Puntos de Control (apoyo terrestre)
- Aerotriangulación
- Colección de datos

Planeación del Proyecto

Para llevar a cabo la planificación de un vuelo en determinada área, es necesario conocer lo siguiente: la ubicación, extensión y límites de dicha área los cuales se marcan sobre un plano topográfico.

El plan de vuelo se plantea de acuerdo a una escala de fotografía que permita una precisión adecuada y cobertura amplia de la zona.

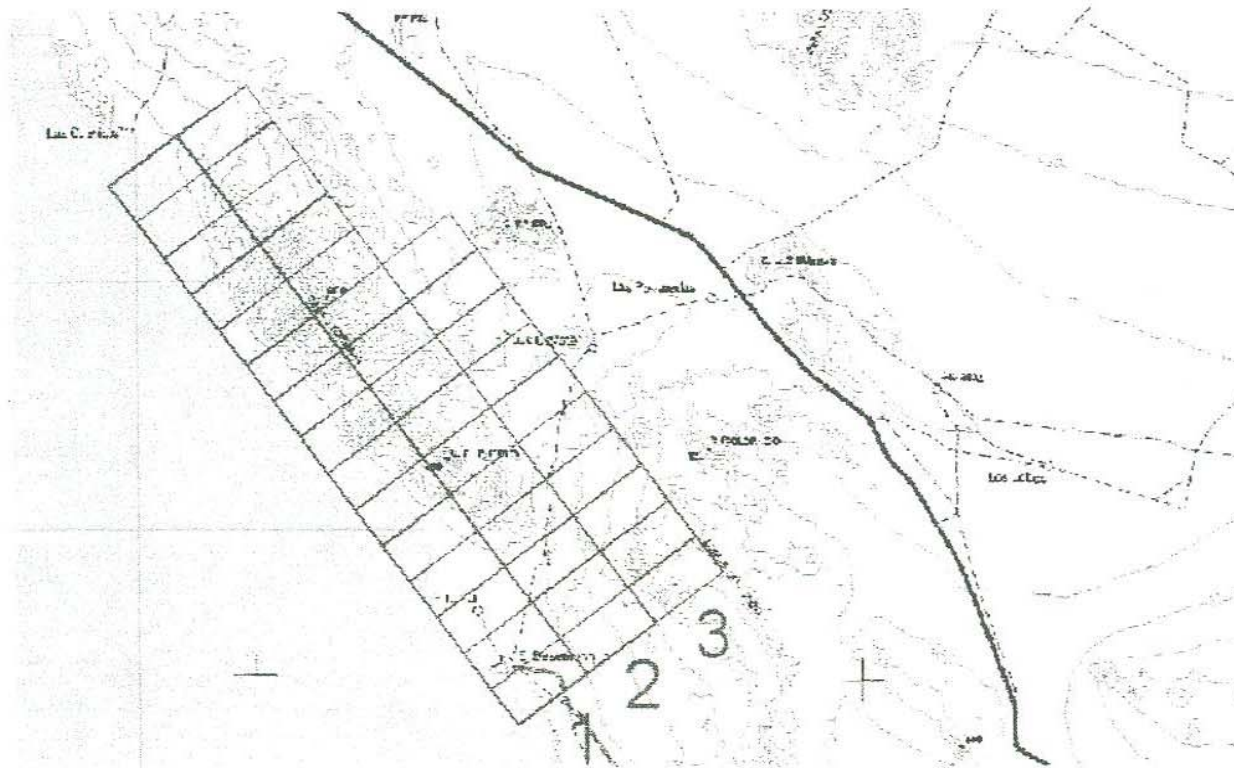


Fig. No.13 Plan de vuelo fotogramétrico mostrando líneas de vuelo cubriendo el área de interés.

Vuelo fotogramétrico

Cada fotografía o imagen que es expuesta tiene una escala de imagen correspondiente asociada con ella. La escala de imagen expresa la relación promedio entre una distancia en la imagen y la misma distancia en el terreno. Ella se calcula dividiéndola distancia focal entre la altura de vuelo respecto a la elevación promedio del terreno. Por ejemplo, con una altura de vuelo de 1,000 m y una distancia focal de 15 cm, la escala de la imagen sería 1:6667.

NOTA: Se debe usar la altura de vuelo sobre el terreno, en lugar de la altitud sobre el nivel del mar.

Un vuelo fotogramétrico generalmente se realiza cubriendo la superficie del terreno con fajas longitudinales de fotografías tomadas a una cierta altura del mismo, cada faja de fotografías consiste de una serie de imágenes capturadas a lo largo de una línea de vuelo, normalmente con un traslape o recubrimiento del 60%. Se asumen que todas las fotos de una faja han sido tomadas a la misma altura de vuelo aproximada y con una distancia constante entre las estaciones de exposición, lo que permitirá luego una buena formación del modelo estereoscópico facilitando de esta manera una mejor identificación de los detalles del terreno.

Las fotografías de varias líneas de vuelo pueden combinarse para formar un bloque de fotografías. Un bloque de fotografías consiste de un número de fajas paralelas, normalmente con un traslape o recubrimiento lateral de 20-30%. Las técnicas de triangulación en bloque se usan para transformar todas las imágenes del bloque y los puntos de terreno a un sistema de coordenadas homogéneo. Un bloque regular de fotos es un bloque rectangular en el cual el número de fotos en cada faja es el mismo (Fig. No. 14).

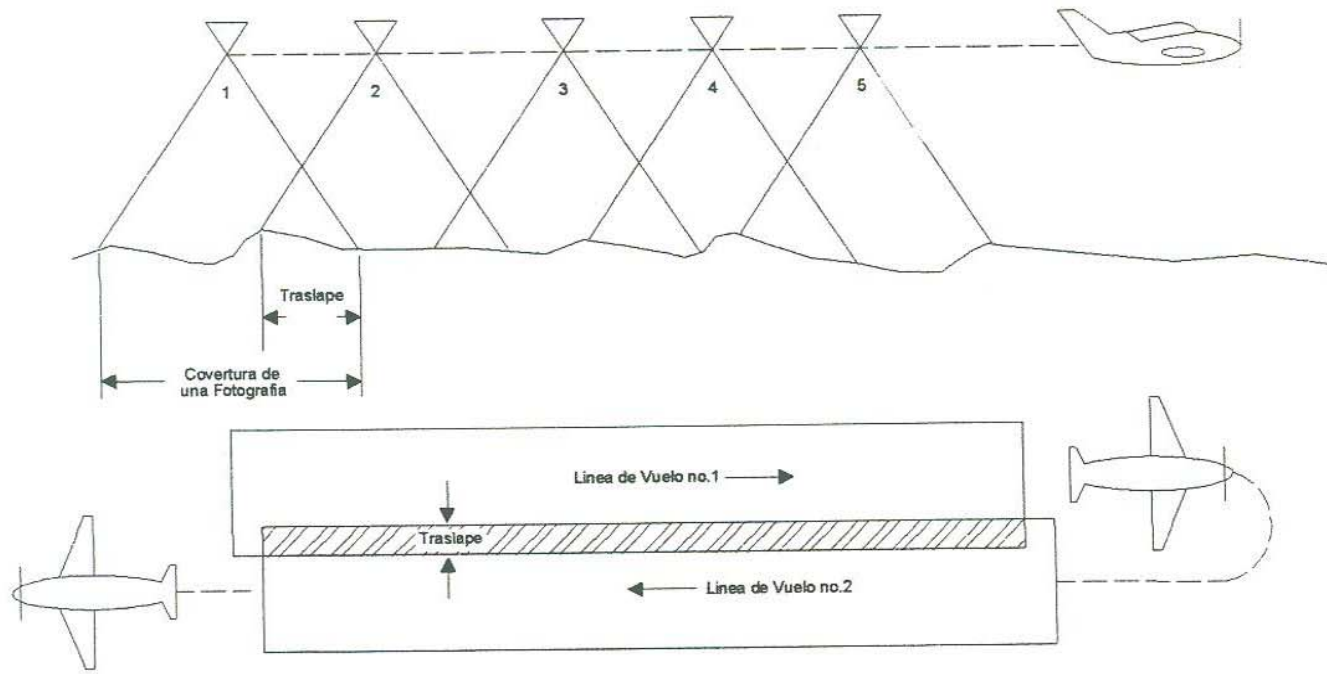


Fig. No. 14 vista de perfil y planta de una línea de vuelo mostrando cobertura de fotografía, así como traslape entre cada imagen.

Principalmente esto se manifiesta en el hecho de que es muy difícil mantener ideales que se establecen en la teoría. Principalmente esto se manifiesta en el hecho de que es muy difícil mantener el eje de la cámara absolutamente vertical en el momento de la toma y que por otra parte el terreno presenta accidentes geográficos. Para el primer caso se establecen ciertos límites en la inclinación del eje de toma tal que luego mediante procesos adecuados pueden compensarse de alguna manera las deformaciones producidas en las imágenes.

En cuanto a los desniveles del terreno, problema que plantea, es el de la uniformidad de la escala, lo cual nos lleva a considerar una escala media de las fotogramas obtenidos, además de esto para conseguir una correcta restitución se debe trabajar con procedimientos completos tendientes a disminuir la influencia de las deformaciones con el objeto de asegurar las precisiones requeridas.

Puntos de Control (apoyo terrestre)

Trabajar con imágenes aéreas en formato digital implica el uso de software con capacidad para efectuar análisis geoespacial de información, por lo que un requisito básico e indispensable es que las imágenes cuenten con georeferencia para que puedan ser desplegadas automáticamente en la posición que realmente ocupan en el espacio, y cualquier interpretación que sobre ellas se efectúe, contenga esas mismas características.

Los puntos de control para georeferencia deben estar lo mejor distribuidos geoméricamente entre ellos y con respecto a la imagen, para evitar deformaciones en algunas zonas de la misma, lo cual ocasiona errores en la posición. Por lo general todos los trabajos de georeferencia introducen deformaciones en la imagen, que deben de reducirse al mínimo vigilando tanto los residuales del proceso de georeferencia, como el ángulo de corte y proyección.

A partir de los datos de coordenadas planimétricas de la red geodesica, se efectúa el diseño y medición de la red topográfica de vértices que cubra el área geográfica a restituir, para luego lograr la densificación de los puntos de apoyo fotogramétricos a ser utilizados en la aerotriangulación para orientación de modelos de restitución.

Los puntos de control terrestre se realizan por medio de sistemas de posicionamiento global (GPS) con datum WGS84 y coordenadas geográficas en Sistema Universal Transversal de Mercator (UTM), utilizando la metodología y sistemas de medición necesarios para alcanzar la precisión requerida.

Las formas de georeferenciar una imagen son a partir de:

- a).- puntos de control de campo (PCCs).
- b).- un mapa digital georeferenciado del área cubierta por fotografía aérea.
- c).- un objeto o vector o CAD correctamente georeferenciado.

En todos los casos, el principal problema es encontrar puntos plenamente identificables en la referencia (campo, mapa u objeto vector o CAD) y que corresponda a puntos también plenamente identificables en la imagen aérea.

El tipo de georeferencia a realizar depende principalmente de la escala de la fotografía aérea a utilizar, la cual depende a su vez del tipo de proyecto en el que se está trabajando.

Existen diversas formas para georeferenciar, imagen por imagen, una secuencia de imágenes aéreas correspondientes a una línea de vuelo:

- a) Cuatro puntos de control de campo para cada fotografía;
- b) cuatro puntos de control de campo solo para la primera fotografía, la georeferencia se traslada hacia las demás imágenes aéreas a partir de la inmediata anterior;
- c) cuatro puntos de control de campo para la primera y dos para la última ubicados en el extremo de la secuencia de imágenes, los otros puntos de control se trasladan a partir de la inmediata anterior;
- d) solo dos puntos de control de campo para la primera imagen, a partir de donde se utiliza el modelo generado para auto sugerir coordenadas para otros puntos de la misma imagen; posteriormente, la georeferencia se traslada a las imágenes subsecuentes.

Los puntos de control de campo utilizados para georeferenciar las imágenes fueron tomados con equipos GPS (Sistema de Posicionamiento Global).

El georeferenciar imágenes con base en puntos de control, requiere de mayor tiempo que los otros métodos de georeferenciar, por lo cual, el costo es más alto. Sin embargo, se puede considerar que este sería el método ideal para georeferenciar imágenes aéreas debido a su alta precisión.

A su vez, la georeferencia precisa de imágenes aéreas de escala grande y sobre un relieve abrupto, con puntos de control en la primera imagen y el traslado de la misma a las demás imágenes de la secuencia, es uno de los métodos más rápidos, no obstante, la incertidumbre en la posición se incrementa con cada imagen a la que se traslada la georeferencia, hasta un punto que se considera degradada y no utilizable, lo cual ocurre en la cuarta imagen bajo las condiciones mencionadas.

El método de georeferenciar consiste en utilizar cuatro puntos de control en la primera imagen y dos puntos de control de cierre para la cuarta imagen, es un poco más costoso y requiere más tiempo que la anterior debido a que exige dos puntos de control más. Sin embargo, la cuarta imagen estará deformada en uno de sus extremos, por lo que el límite recomendado será también de cuatro imágenes en secuencia.

La forma más eficaz, económica y rápida, de georeferencia, es aquella en la que todos los puntos de control son trasladados a partir de cartografía escala 1:50,000. Esta puede aplicarse prácticamente a cualquier escala de fotografía aérea y obtener resultados considerados de buenos a regulares.

Otro método aplicable, es el combinar la georeferencia de puntos de control con la de trasladar puntos de control de la cartografía a la imagen aérea. Es decir, utilizar dos puntos de control al inicio, y dos más al final. Los demás puntos, serian trasladados a partir de la cartografía 1:50,000. Este es el método que obtiene los resultados más cercanos a utilizar solo puntos de control para georeferenciar todas las imágenes de una secuencia. Además, se puede aplicar a una secuencia que contenga prácticamente un número indeterminado de imágenes.

Se recomienda la utilización (en caso de existir) de rasgos físicos o infraestructuras foto identificables conjugados dependiendo su posición con puntos de control pre-marcados con tela blanca (targets), (Fig. No.12), con el propósito de obtener una marca en zonas naturales de terreno donde no hay infraestructura que pudiera ser utilizada para foto-identificarla en el restituidor.

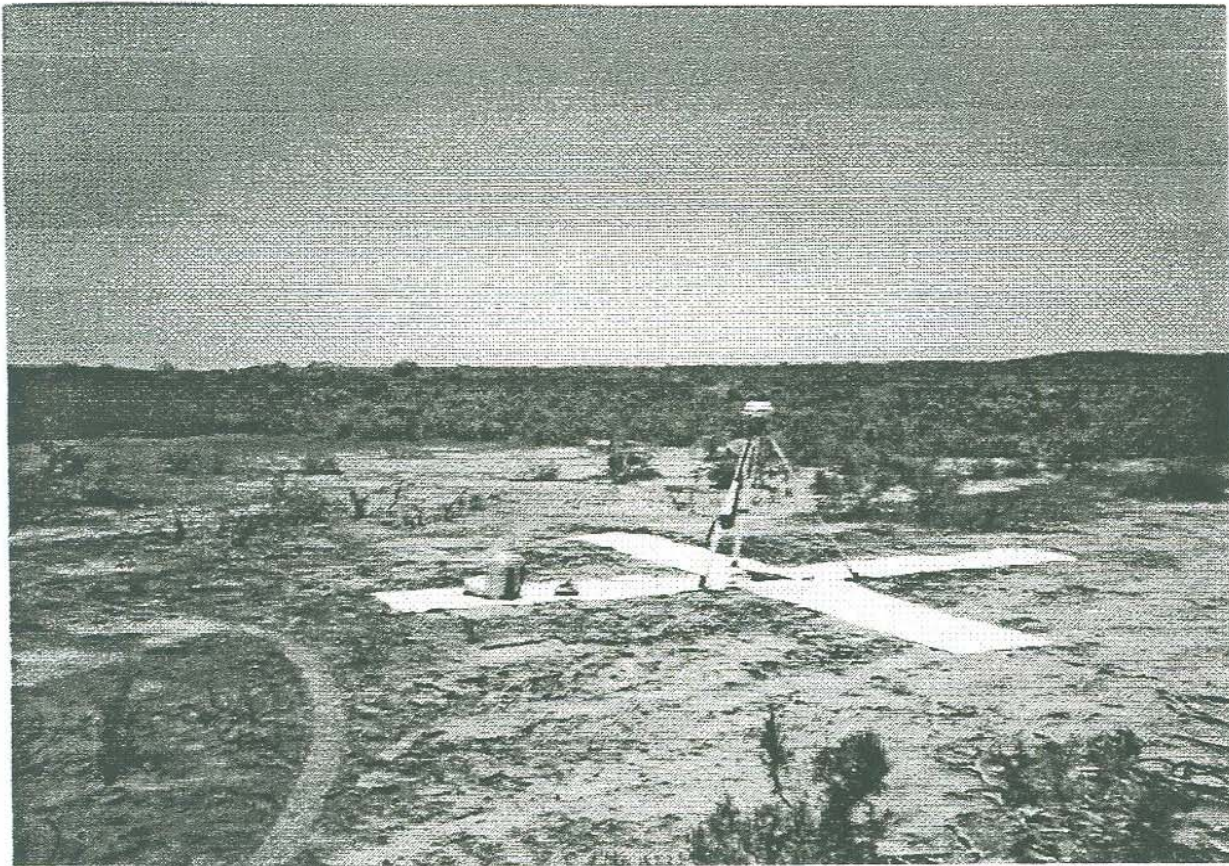


Fig. No.15 Target hecho por una cruz de tela color blanca para apoyo terrestre, medido con equipo GPS en modalidad cinamático.

Aertriangulación

Una vez obtenidos los puntos de control de apoyo fotogramétrico, se procede a seleccionar la ubicación de los lo punto de paso (pass points), o densificación de puntos, puntos de enlace, entre las fotografías consecutivas adyacentes y entre otras líneas de vuelo, para luego realizar la computación de la aerotriangulación, de los cuales, se utilizan un mínimo de tres puntos de paso (tie points) en el área de traslape y seis por "el modelo neto" (geoméricamente la zona estable del traslape de dos fotografías consecutivas).

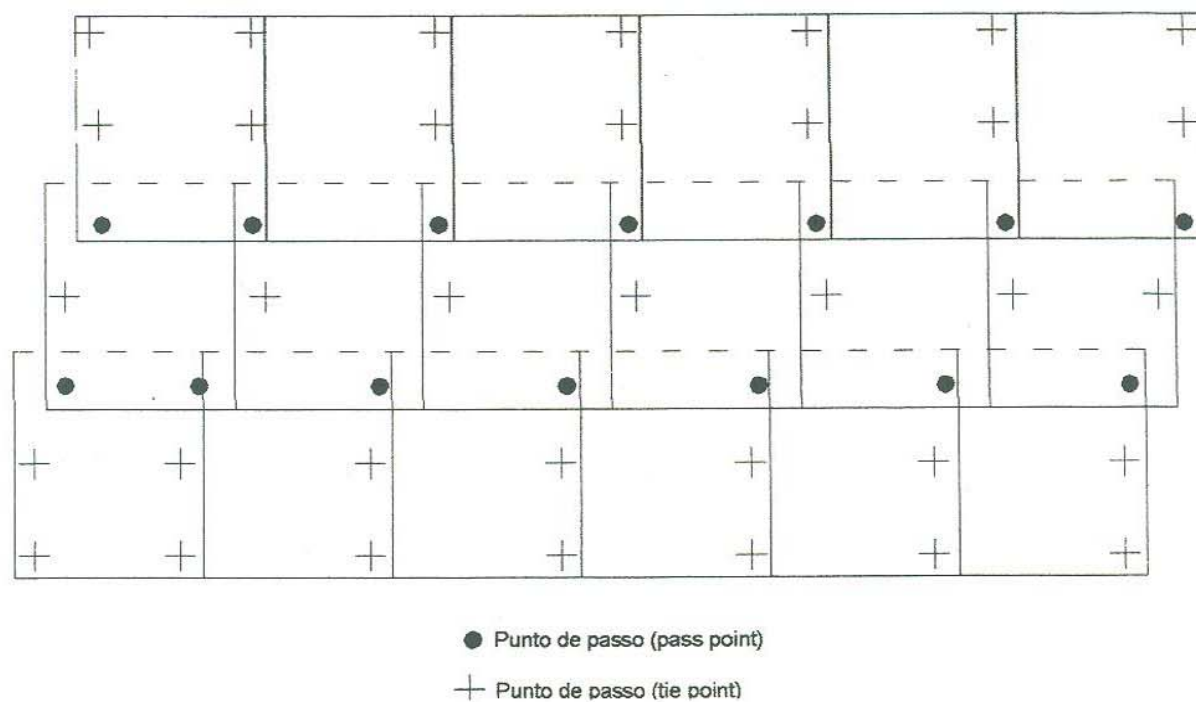


Fig. No.16 Esquema de ubicación de puntos de control.

Obteniendo así los puntos suficientes para poder realizar las orientaciones internas y externas de los modelos estereoscópicos

Además de las imágenes y las coordenadas de los puntos de control, tenemos las coordenadas del centro de cada imagen obtenidas con el GPS aerotransportado (AGPS) que son señales que se registra con el tiempo GPS del momento del disparo.

Este tiempo nos servirá para interpolar la posición del centro de proyección en postproceso a partir de las posiciones del GPS de vuelo antes después del disparo, ya que este va realizando observaciones cada 0.5 o 1 seg.

El método de ajuste de aerotriangulación es un método totalmente analítico digital, que proporciona una solución de ajuste de ecuaciones simultáneas de líneas que representan todos los rayos de la imagen en el proyecto.

El resultado incluye coordenadas ajustadas del terreno de cada punto de intersección de tierra así como la posición de la cámara y valor de la orientación requeridos para la entrada en la restitución estereoscópica (X , Y , Z , ω , ϕ , κ).

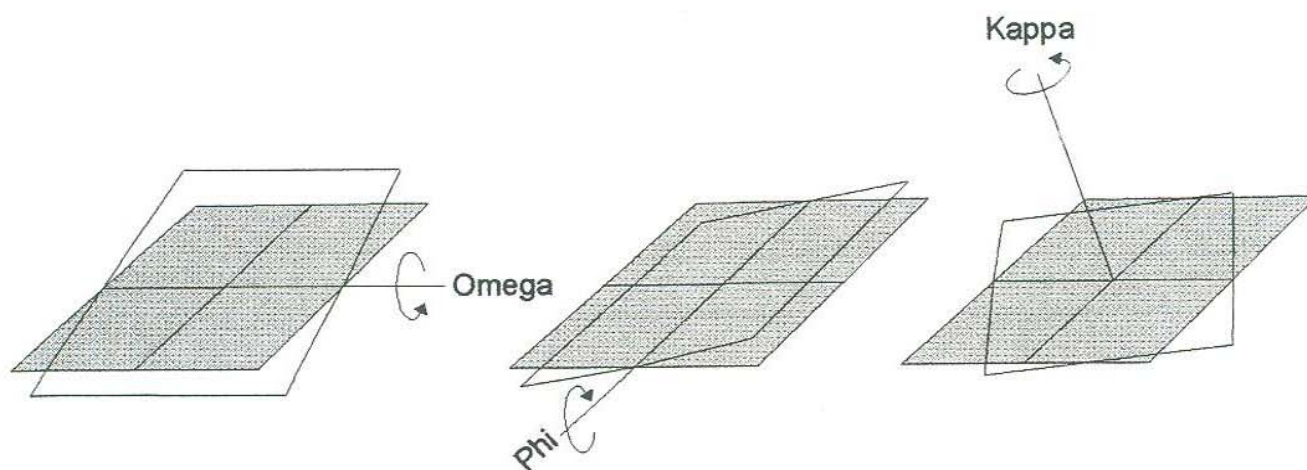


Fig. No.17 Representación grafica de los tres movimientos ocurridos durante el vuelo fotogramétrico.

II.3.- Procesamiento Fotográfico

- **Negativo:**

Se deberán presentar negativos nítidos y con densidades uniformes y libres de nubes, humo, marcas estáticas, manchas de naturaleza química o de agua.

La manipulación de las películas deberá ser cuidadosa para evitar estiramiento y otros tipos de deformaciones durante el proceso de revelado, secado, manipulación y conservación.

Se asegura una larga vida del negativo, siguiendo rígidamente las instrucciones del fabricante, principalmente en lo que respecta a temperatura y humedad relativa del laboratorio.

II.4.- Propiedades de las Fotografías Aéreas

Las fotografías aéreas deberán cumplir con las siguientes especificaciones:

- **Nubosidad:**

El área total de una fotografía no debe estar cubierta con más del 7% de nubes o sombras de nubes, y ninguna nube individual deberá cubrir más del 3% del área fotografiada. Las nubes o sombra de nubes no deberán cubrir los puntos principales ni sus homólogos. Para el conjunto de una línea o bloque, la nubosidad promedio no deberá exceder del 7% del área y deberá estar exenta de marcas estáticas, humos y bruma.

Los tiempos de exposición serán tal para que eviten el movimiento de la imagen.

- Deriva:

Todas las líneas de vuelo no presentarán deriva superior a 5° con relación al eje del vuelo programado para el cubrimiento aerofotogramétrico y la dirección entre líneas adyacentes deberá ser paralela dentro de $\pm 5^\circ$.

- Verticalidad:

Deberá mantener la verticalidad del eje de la cámara dentro de 4°

- Inclinación relativa:

La inclinación relativa entre dos fotografías sucesivas no deberá exceder a los 6 grados.

- Sobreposición longitudinal:

En lo general la sobre posición longitudinal promedio entre fotografías sucesivas deberá ser suficiente para proporcionar un cubrimiento estereoscópico completo y estar comprendido entre $60\% \pm 5\%$. En ningún caso, el traslape longitudinal deberá ser menor a 55% .

- Sobreposición lateral:

La sobre posición lateral entre líneas de vuelo adyacentes deberá estar comprendida dentro de $30\% \pm 10\%$.

- Influencia Atmosférica:

La luz solar que ilumina a los objetos del terreno atraviesa una capa de niebla formada por aire, polvo y pequeñas gotas de humedad, al ser reflejada nuevamente se encuentra con estos obstáculos antes de quedar impresa en la emulsión fotográfica: con ello se origina una reducción en el contraste de los objetos que se puede reducir mediante el uso de filtros adecuados.

Capítulo III

III.1.- Productos finales

- Modelo Digital del Terreno (DTM)
- Ortofotos
- Mosaicos de Ortofotos
- Vistas en perspectiva
- Vuelos simulados 3D (realidad virtual)

Modelo Digital del Terreno (DTM).

Un DTM es una malla o cuadrícula rígida de elevación "z" del terreno, obtenida por edición de procedimientos estereoscópicos

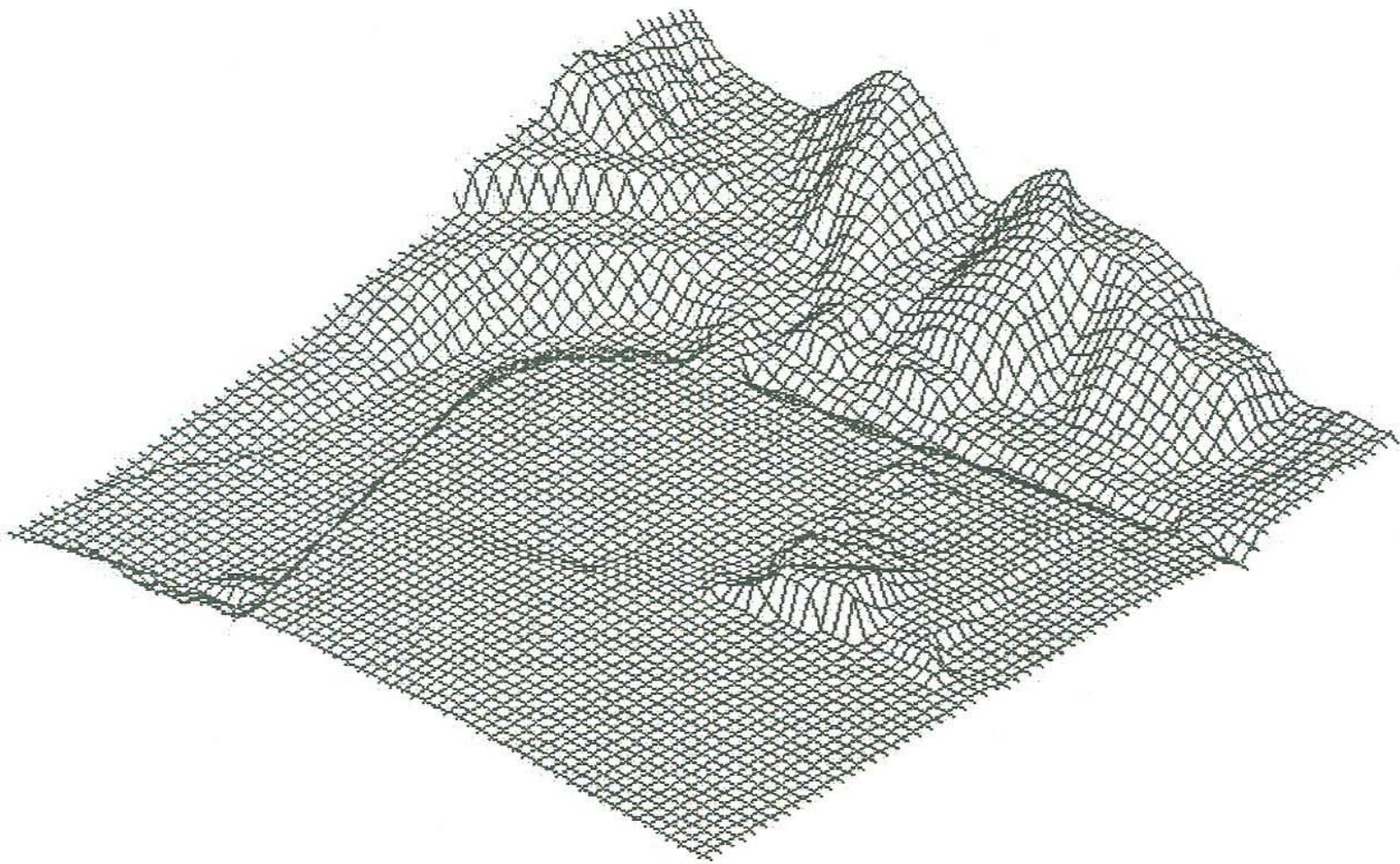


Fig. No.18 Modelo Digital de Elevación (DTM)

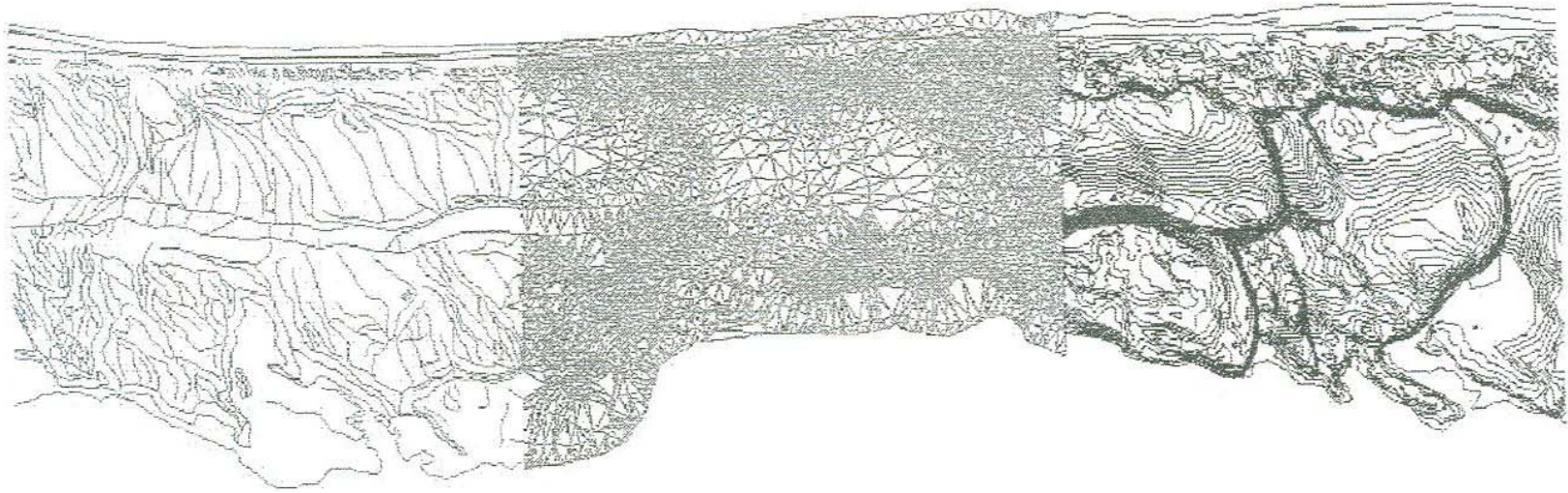


Fig. No.19 Mostrando tres etapas para la generación de un Modelo Digital de Elevación (DTM), primero la colección de datos morfológicos del terreno, posteriormente una Red Irregular del Terreno (TIN) que define la superficie del terreno.

Ortofotos

Las ortofotos son las imágenes procesadas para remover distorsiones causadas por diferencias en la elevación del terreno y rotaciones de cámara; las cuales pueden ser :

- Horizontalmente correcta a nivel de terreno
- Puede ser hecha para precisiones de mapa estándar

Ventajas de las ortofotos:

- ✓ Más rápidas y más baratas de hacer que los mapas.
- ✓ Fáciles de actualizar.
- ✓ Contienen todos los detalles visibles en las imágenes.
- ✓ Usadas como respaldo en Sistemas de Información Geográfica (GIS) y otros sistemas.

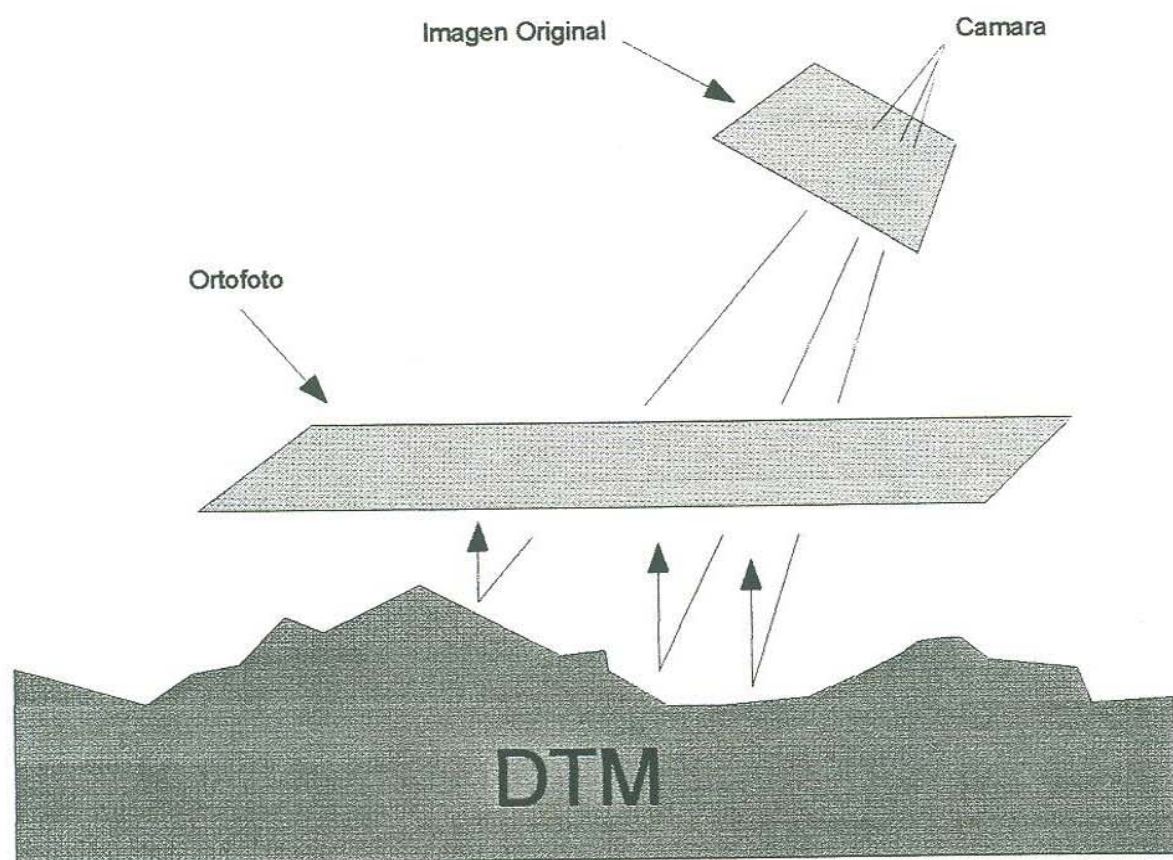


Fig. No.20 Modelo Digital de Elevación (DTM)



Fig. No.21 Imagen ortocorregida, localidad de Sherburne, USA

Mosaicos de ortofotos

Un mosaico es una imagen que es producida por agrupamiento de dos o más imágenes unidas, todos los mosaicos son ortocorregidos.

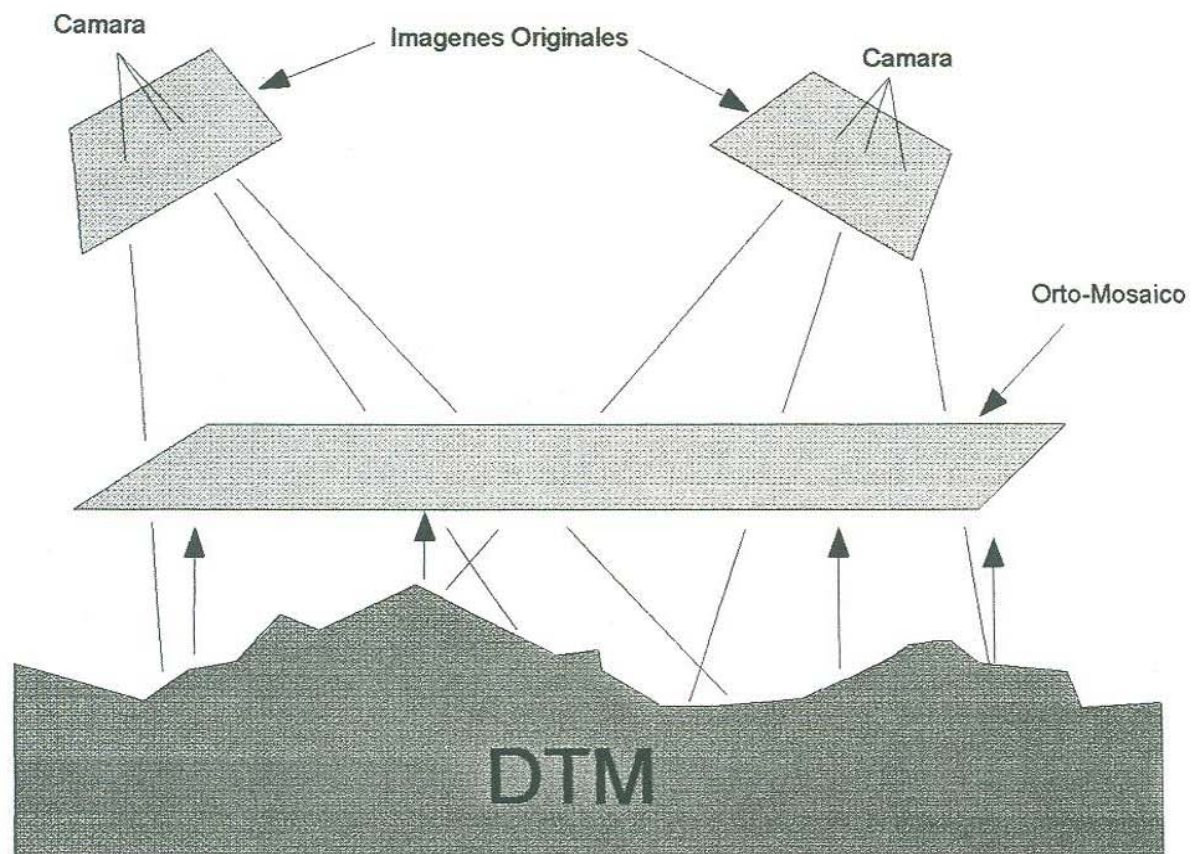


Fig. No. 22 Ortofoto , Mina La Caridad, Son.

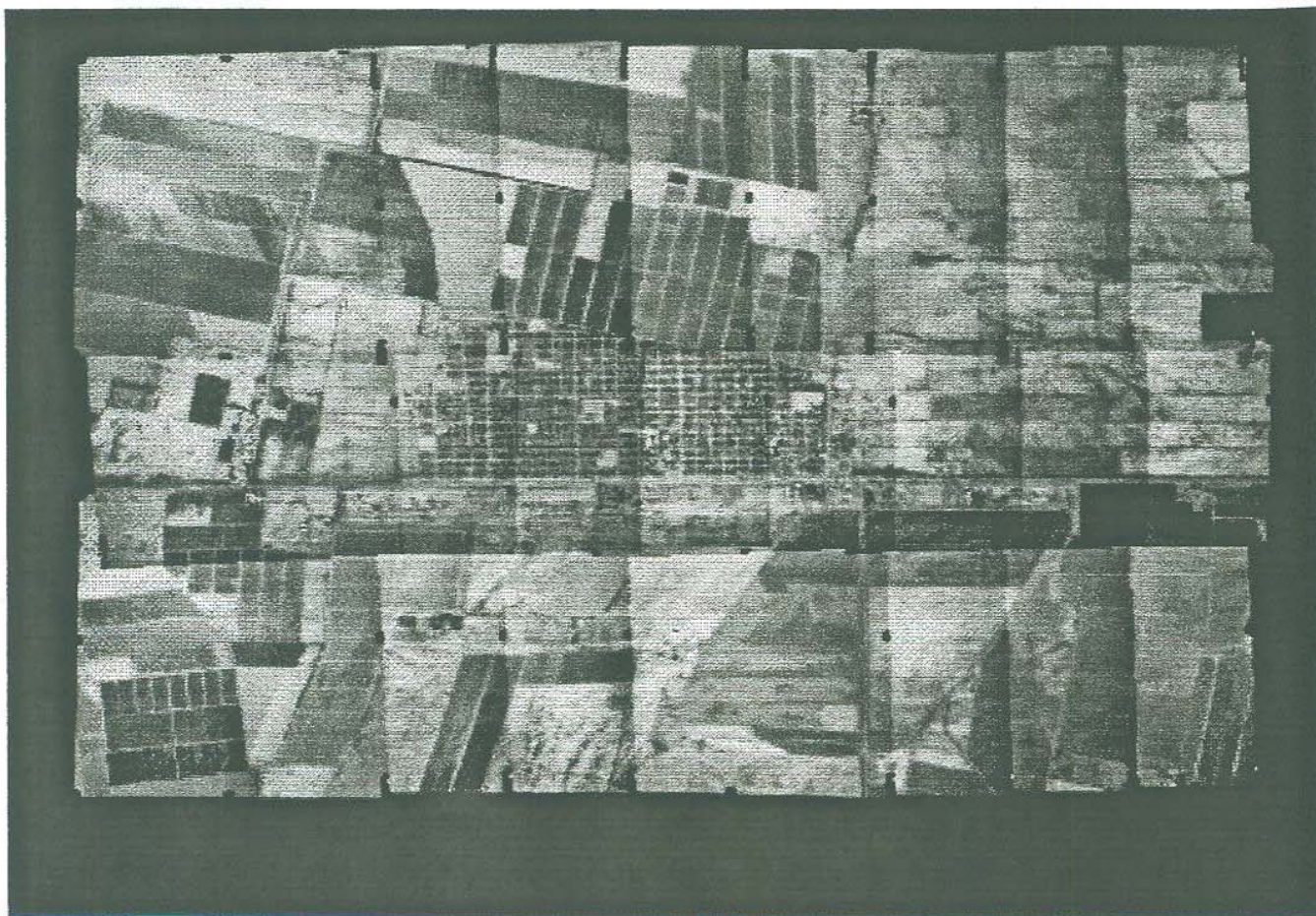


Fig. No. 23 Mosaico del Poblado Miguel Aleman, Son.

Vistas en Perspectiva

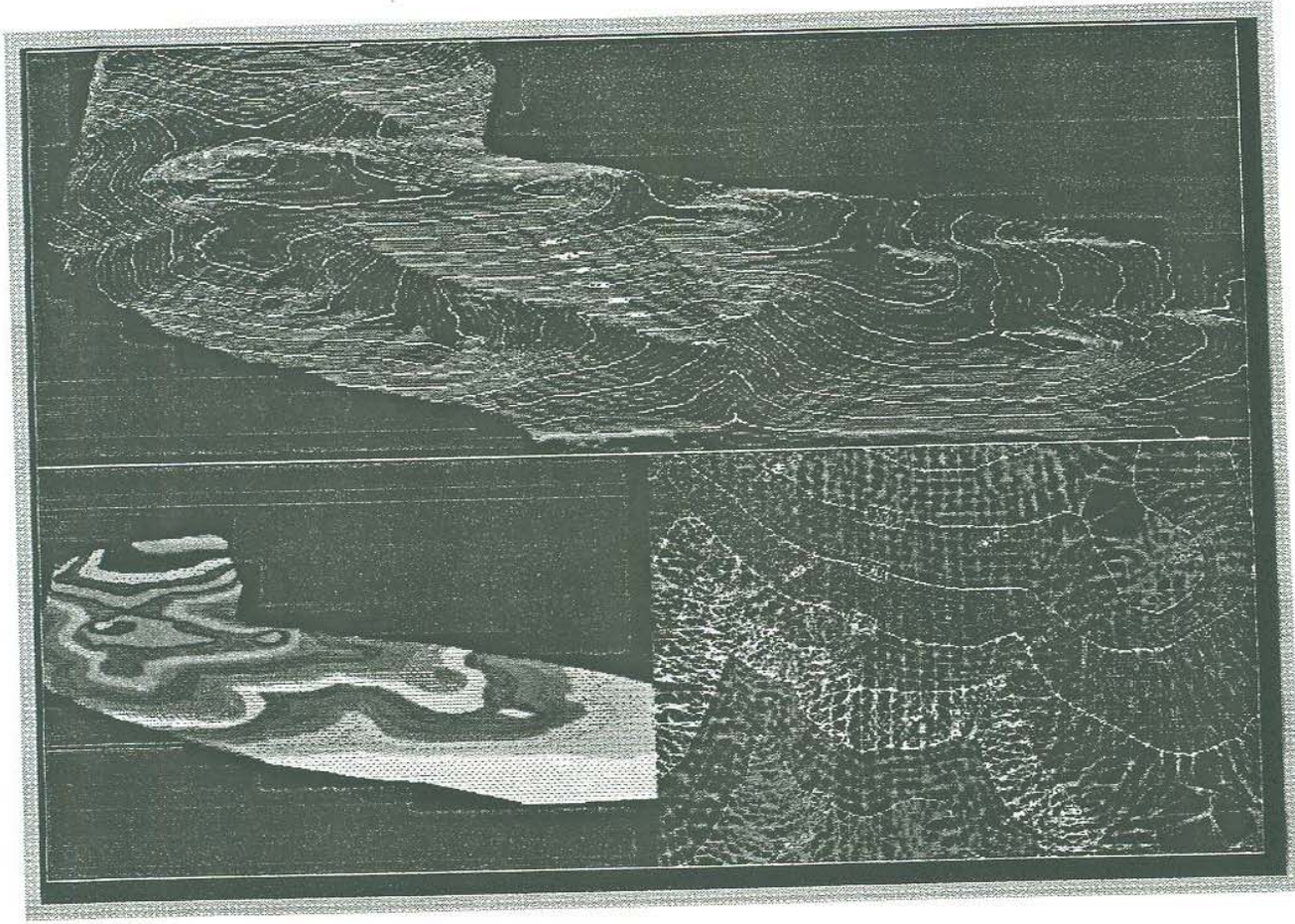


Fig. No. 24 Vista en perspectiva de un Modelo Digital de Elevación (DTM)

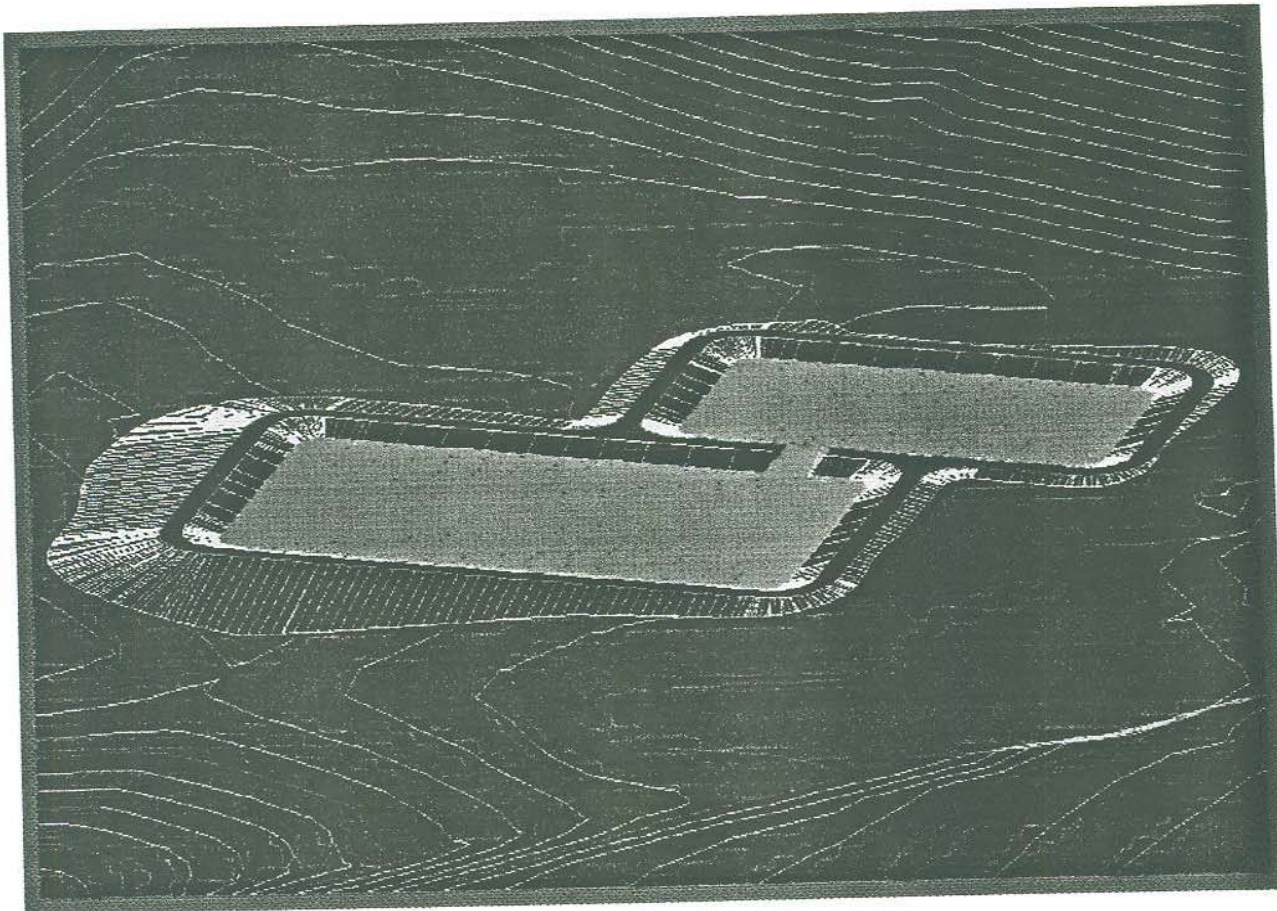


Fig. No. 25 Modelación perspectiva de presas de jales de una unidad minera

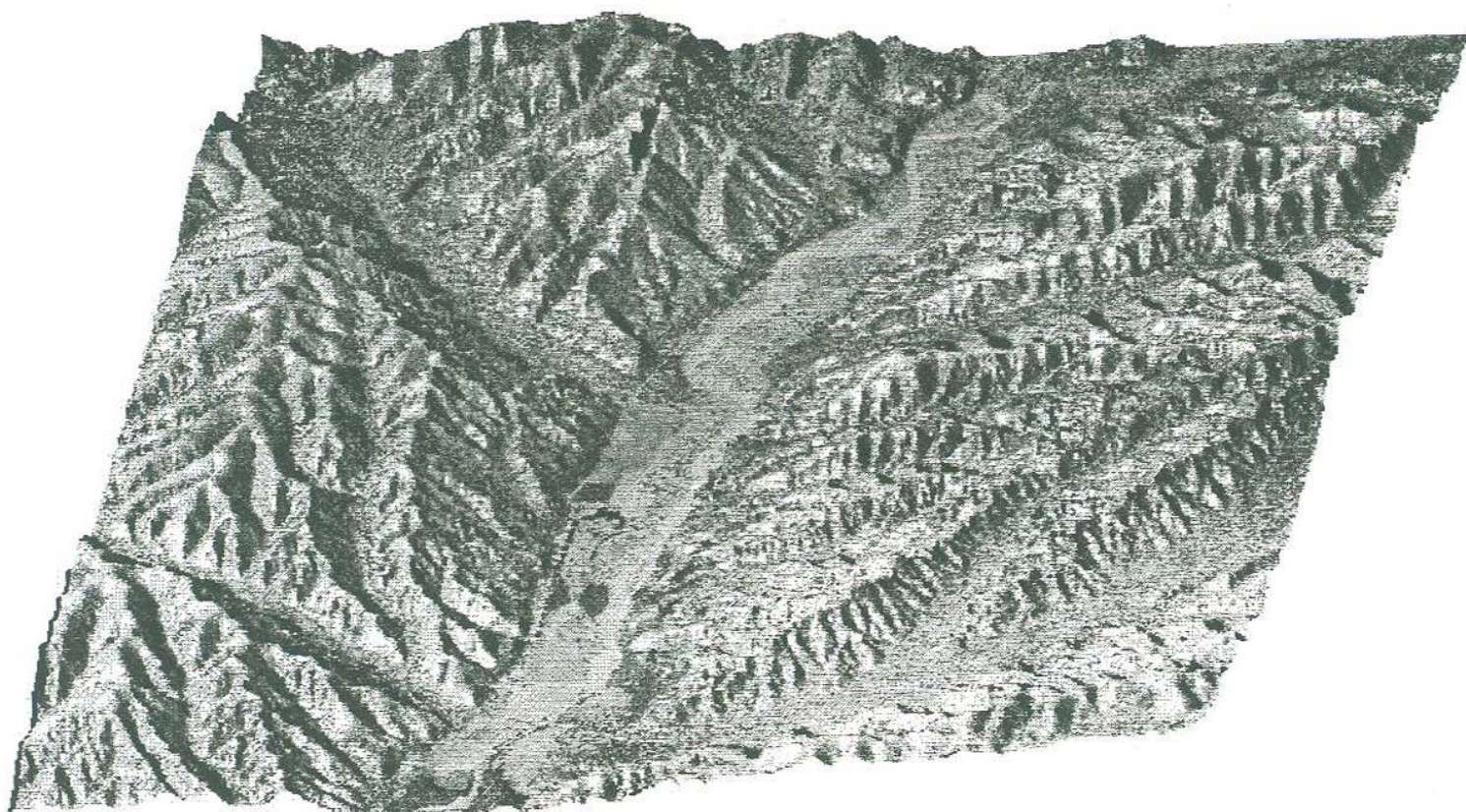


Fig. No. 26 Modelo Digital de Elevación sobre puesto en una ortoimagen, Rancho Las Sandias, Cananea, México.

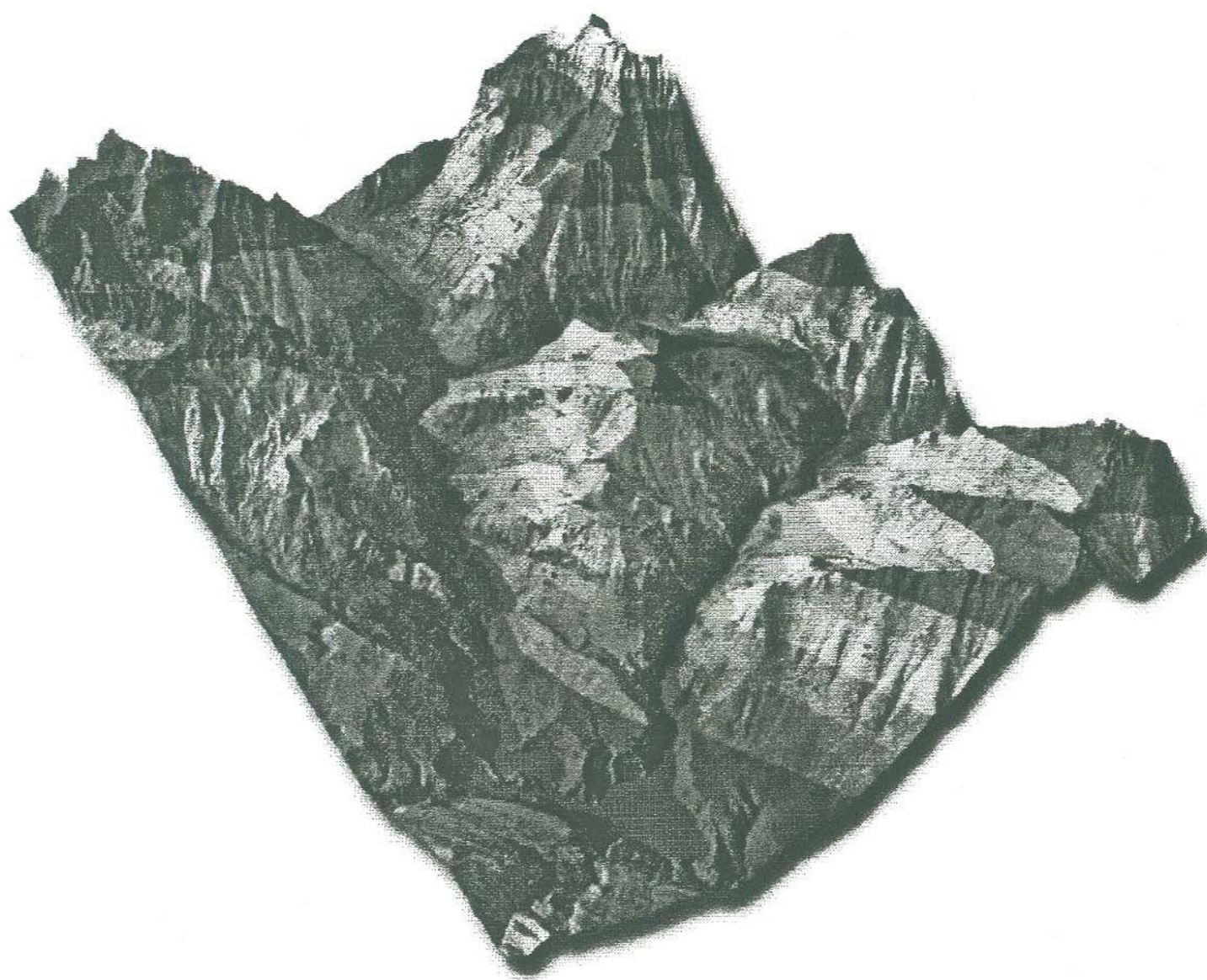


Fig. No. 27 Modelo Digital del Terreno sobre puesto en ortoimagen, Alpes Suizos.

IV.- Capitulo

IV.1.- Aplicaciones

La fotogrametría se encuentra hoy en día totalmente ligada a disciplinas, entornos y sistemas digitales que permiten la máxima automatización de las tareas que tradicionalmente venía utilizando el operador fotogramétrico.

Con la aplicación de la fotogrametría digital, las posibilidades de explotación de las imágenes se amplían y se simplifican permitiendo, por ejemplo, la generación automática de modelos digitales del terreno (DTM), de ortoimágenes, la generación y visualización de fotomodelos tridimensionales, la extracción automática de entidades y elementos cartográficos la captura y visualización de fenómenos dinámicos, etc.

La fotogrametría tiene multitud de aplicaciones entre las que destacan notoriamente los levantamientos topográficos y los Cartográficos, áreas en las que más se ha mostrado su capacidad y potencial.

La fotogrametría digital cuyo fundamento teórico son los algoritmos propios de la fotogrametría analítica junto con las técnicas y aplicaciones propias del tratamiento digital de imágenes.

El empleo de la fotogrametría en todos los campos es cada vez mayor. La fotogrametría se encuentra hoy en día totalmente ligada a disciplinas, entornos y sistemas digitales que permiten la máxima automatización de las tareas que tradicionalmente venía utilizando el operador fotogramétrico.

Disciplinas aplicables:

En *arqueología* se han descubierto, gracias a ella, monumentos, ciudades, calzadas, etc., cuya existencia no se hubiese conocido por otros medios o solo se hubiesen encontrado debido a un hecho casual.

En *estudios forestales*, el recuento de especies de árboles, extensión de bosques, estudio de plagas y enfermedades, cubicación de madera, etc., se hace actualmente a traves de fotografías.

En *agricultura* se utilizan para trabajos de concentración parcelaria, estudio de cosechas, de suelos, evaluación de estos, clasificación de las tierras mas apropiadas para un determinado tipo de cultivo, planeamiento de repoblaciones forestales, estudios sobre la erosión, etc.,

En *urbanismo y catastral*, muchos problemas sobre planificación de ciudades, vías de comunicación, estudios de trafico, construcciones, obras publicas, etc., son resueltos directamente sobre fotografías.

Sabemos que todo aquel rasgo geológico, topográfico, agrícola, urbano, etc., que pueda quedar impreso en una fotografía podrá dar lugar a un estudio exhaustivo del mismo a traves de esta, creándose la correspondiente rama de fotointerpretación.

IV.2.- Aplicaciones en la Geología

El uso de las fotografías aéreas para obtener la información geológica cualitativa y cuantitativa es llamado "fotogeología". Se usan ampliamente hoy las fotografías aéreas para identificar y trazar las formas de terreno, los modelos del desagüe, rasgos estructurales como fallas y pliegues, zonas de alteración y unidades litológicas. Además, actualmente se cartografía sobre la fotografía en lugar de sobre el mapa, como hasta ahora se venía haciendo.

El conocimiento de estos atributos superficiales de un paisaje también le permite a un geólogo de inferir o predecir las características y relaciones del subsuelo.

Las fotografías aéreas son examinadas para los siguientes tipos de estudios geológicos:

- Compilación de mapas topográficos y geológicos.
- Exploración para los depósitos de mineral, de hidrocarburo, y del agua subterránea.
- Identificando los rasgos o sitios tectónicos como fallas y lineamientos estructurales.
- Identificando y trazando cambios del paisaje causados por un evento de riesgo natural.
- Seleccionando los sitios potenciales para la construcción y planeación de mina.

La interpretación geológica de las fotografías aéreas es basada en el reconocimiento de los elementos fundamentales del terreno que incluyen la forma, el tamaño, el modelo, la sombra, el tono o el color, la textura, la asociación, y la ubicación.

La posibilidad de efectuar la fotogeología se debe a que tanto las rocas como los suelos, tienen cada uno su forma peculiar que los distingue de los demás y que por el análisis de la misma se pueden reconocer lo mismo en el campo como en las fotografías.

La cantidad y la calidad de la información geológica que puede interpretarse de las fotografías aéreas son dependientes en los siguientes factores:

- El tipo de terreno, vegetación y cubierta del suelo y la etapa de la erosión.
- El tipo y la escala de la fotografía.
- Entrenamiento y experiencia del foto interprete.

En el campo concreto de la geología, la utilización de fotografías aéreas es cada vez mayor; además del menor costo que ofrece el estudio fotogeológico sobre el trabajo de campo, se puede considerar como más completo en algunos aspectos y, desde luego, siempre complementario e imprescindible.

Criterios para la fotointerpretación de unidades litológicas

Una unidad litológica por lo general comprende una determinada área lo suficientemente visible para ser observable en las fotografías aéreas, su identificación se hará mediante el examen de ciertos factores que queden impresos en las imágenes y posteriormente servir para producción en el laboratorio.

Los factores que más se utilizan al analizar las fotografías en blanco y negro son: el tono, textura, drenaje, vegetación y relieve.

Tono: es el conjunto de tonos grises que aparecen en una fotografía en blanco y negro en forma gradual o muy densa. Los factores que lo afectan pueden ser tectónicos, de lo fotografiado, climatológicos o humanos.

Textura: H.T.U. Smith (1943), da una definición muy exacta ya que nos dice que "la textura es una apariencia constituida por un agregado de rasgos demasiado pequeños para ser individualmente distintos" por ejemplo: dolinas en calizas que dan una textura moteada, etc. hay que tomar en cuenta para este factor la escala de la fotografía.

Drenaje: aunque el drenaje esta gobernado por factores propios de la roca, estructurales y climáticos, es de suma importancia por los diferentes patrones que adapta sobre los tipos de roca en las que esta actuando; el drenaje puede ser espaciado, denso, uniforme, etc. pero siempre con la tendencia de indicarnos alguna diferencia entre las rocas, lo cual estamos buscando.

Vegetación: aunque depende de la humedad del terreno y composición de la roca siempre resulta una gran ayuda en el caso de obtener una diferencia entre la vegetación.

El relieve: al observar un par de fotografías aéreas bajo el estereoscopio la primera impresión que nos llevamos son los cambios en la topografía del terreno, es decir serranías abruptas contrastando con suaves lomeríos o con crestones alineados, etc.; Estos contrastes son debidos a tipos diferentes de roca o bien la misma, pero alternada en su composición o representar cierta estructura. Este factor es uno de los más importantes y más confiable a tomarse en cuenta para el análisis de imágenes fotográficas.

Existen otros rasgos que se pueden diferenciar propiamente por su forma o tamaño, como por la relación que entre ellas guardan, estas pertenecen a rasgos más pequeños que siempre están involucrados con las unidades litológicas por ejemplo: depósitos de talud, terrazas, etc. o bien una carretera o poblado, etc.

Fotointerpretación en rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas

Fotointerpretación de rocas sedimentarias

Características	Clastos gruesos	Clastos finos	Carbonatos
Estratigrafía	No presente (conglomerado) depende en parte del grado de compactación	Presente. En clima húmedo se dificulta observarla	Clara cuando hay alternancia de estratos y poca cuando la roca es muy homogénea
Fracturas	De formación fácil y esparcimiento grande.	Normalmente no existen	Claros
Relieve	Por su resistencia será abrupto.	Suave formando valles, y lomas arredondeadas.	En clima seco abrupto. En clima húmedo y suave.
Drenaje	Por la gran porosidad es poco denso. Cuando ocurre en quebradas estas serán en forma de "u" o "v"	Muy denso	Poco denso hasta ausente por ser interno.
Vegetación	Por la composición si es poco permeable y poca agua es escasa y en pequeños grupos	Bastante por la gran cantidad de materiales nutritivos,	Poco densa
Textura	Gruesa, burda.	Lisa	Lisa o moteada por dolinas.
Tono	Por composición, para retención de agua es clara a excepción de capas rojas.	Obscuras. Climas áridos, claros.	Claros o manchados.

Nota: todo depende de su composición, grado de compactación cementante, clima, etc.

Fotointerpretación en rocas ígneas

Características	Silícicas	Maficas
Tono	Claro	Obscuro
Vegetación	Densa	Menos densa o pobre
Relieve	Menos abrupto	Abrupto
Diaclasas	Mas pronunciado	Mas fino menos pronunciado
contactos	menos marcados	Mas marcados
Drenaje	Dendrítico y combinado con el frac. Existente	

Extrusivas

Formas	Se reconocen por la forma de sus volcanes y sus coladas.
Drenaje	Poco desarrollado por la alta permeabilidad.
Vegetación	Únicamente en zonas de alta meteorización.
Topografía	Se relaciona con la viscosidad, pudiendo ser planos o abruptos.
Color	Silícicas: claras. Maficas: Oscuras. También se relacionan con la edad, recientes: oscuras y antiguas: claras.
fracturas	Fuerte
estratificación	En todas. Es necesario la relación de campo.
cenizas	Claras, horiz. Poco drenaje para vegetación.

Intrusivas

Características	Batolitos	Sill / Lacolitos	stock	diques
Extensión	Grandes áreas	pequeñas	pequeñas	extensas
Climas tropicales fríos o secos	suaves con levantamientos abruptos, fuerte	no muy abrupto	no muy abrupto	destacan en crestones
drenaje	dendrítico a angular por diaclasas	radial	dendrítico	
Vegetación	Abundante, depende de la composición y clima			
contactos	definidos	definidos	definidos	definidos
diaclasas	Fuerte y espaciado en todos			

Rocas Metamórficas

características	bajo grado	alto grado
estratificación	algo	no se observa
clivaje	se observa	se observa
relieve	regular	compacto y abrupto
lineaciones	finas sin continuidad	continuo que se impone al relieve

roca	relieve	tono	drenaje	vegetación
cuarcita	abrupto, escarpes en topografía, baja	claros	Cierto paralelismo frac. Y fallamiento.	Escasa
mármol	abrupto, escarpes en topografía, baja	claros	Cierto paralelismo frac. Y fallamiento.	Escasa
pizarra	bajo en lomas	oscuro	dendrítico con influencia de clivaje	abundante
filitas	algo abrupto	oscuro	dendrítico con influencia de clivaje	abundante con climas húmedos
esquistos	algo abrupto esquistosidad paralelo al relieve	oscuro	dendrítico con cierto paralelismo por esquistocidad	abundante con climas húmedos
gneiss	relieve alto y bajo con bandeamiento	claros	paralelo controlado	abundante con climas húmedos
serpentinás	suave	oscuro	poco desarrollado, poca densidad	sumamente pobre

Criterio para la fotointerpretación estructural:

Se a mencionado anterior mente que para diferenciar unidades litológicas grandes se recurre a los factores de tono, textura, drenaje, etc., para identificar datos estructurales situados dentro de estas unidades hay que visualizar rasgos más pequeños pero más ampliamente diferenciables como son lineamientos de ciertos arroyos en determinado tipo de drenaje, o pequeñas franjas de vegetación que corren por una extensión considerable de terreno, como puede ser también el cambio abrupto entre dos tonalidades, drenaje, etc., diferentes.

La mayoría de estos rasgos se pierden al analizar en fotografías a escalas grandes, pero si utilizamos escalas pequeñas e podrá no tan claramente el contraste entre lo visto localmente comparado con lo observado regionalmente de ahí la necesidad de utilizar ambas escalas para fines estructurales.

A continuación se esboza los principales criterios a seguir en aquellos rasgos de mayor interés y con las que estamos familiarizados en el desarrollo de nuestro trabajo de campo.

Fallas: en rocas sedimentarias aparte de las lineaciones marcadas en arroyos y rompimientos en las formas del terreno se pueden distinguir por los desplazamientos y terminaciones de estratos claves y contactos o bien cambios abruptos en el rumbo y echado; otras veces se pueden manifestar como escarpes o depreciaciones rectilíneas al cambiar abruptamente de una roca a otra.

En rocas metamórficas siguen los mismos criterios que las rocas sedimentarias únicamente que estarán enmascaradas por un metamorfismo que dificultaran el análisis detallado de tales reglas.

Por el contrario en rocas ígneas, las lineaciones estarán mas definidas y las depresiones rectilíneas serán profundas como también lo son la mayoría de las veces los arroyos afectados por estas dislocaciones.

Facturas y diaclasas: sus características de lineacion son muy similares a los rasgos de identificación de fallas, únicamente que estas se encuentran en forma de sistemas con direcciones diferentes y longitudes cortas.

Estratos: queda determinada por la dirección e inclinación de los planos de estratificación. En estratos horizontales se encuentran generalmente formando anillos, si están intercalados horizontes resistentes se notaran fácilmente los cambios de pendientes entre ellos o que en un cañón destaque la estratificación. En estratos verticales su dirección pasara sobre los rasgos topográficos sin desviarse, su drenaje es paralelo o enrejado, cuando un río atraviesa la estratificación es muy necesario seguir la regla de las "V" en estratos inclinados se puede determinar por el relieve topográfico y la inclinación propia de la pendiente del terreno la que sigue generalmente la inclinación de la capa.

Pliegues: quedara determinada por la continuidad de la estratificación y el análisis de los rumbos y echados.

Contactos: en rocas ígneas y sedimentarias hay cierta facilidad para distinguirlos considerando el tono, textura, drenaje, relieve o rasgos más pequeños como son estratificación, diaclasamiento, etc. en cambio en rocas metamórficas es necesario analizar las fotografías en forma minuciosa para llevar a cabo la diferencia entre contactos de rocas.

Dique, Vetas: además de la forma alineada como se presentan, destacan por su forma acrestonada.

Foliación: se presenta en rocas metamórficas como una fusión en estratificación a causa del metamorfismo, además en los cambios de tonalidad, el ancho de las aureolas metamórficas de contacto.

Aureolas metamórficas: aunque presenta bastante grado de dificultad, muchas veces se puede apreciar en los cambios de tonalidad el ancho de las aureolas metamórficas de contacto.

Domos, cuellos volcánicos: por el drenaje radial, la morfología que destaca en forma acrestonada y la tonalidad que presentan se puede diferenciar domos o cuellos volcánicos.

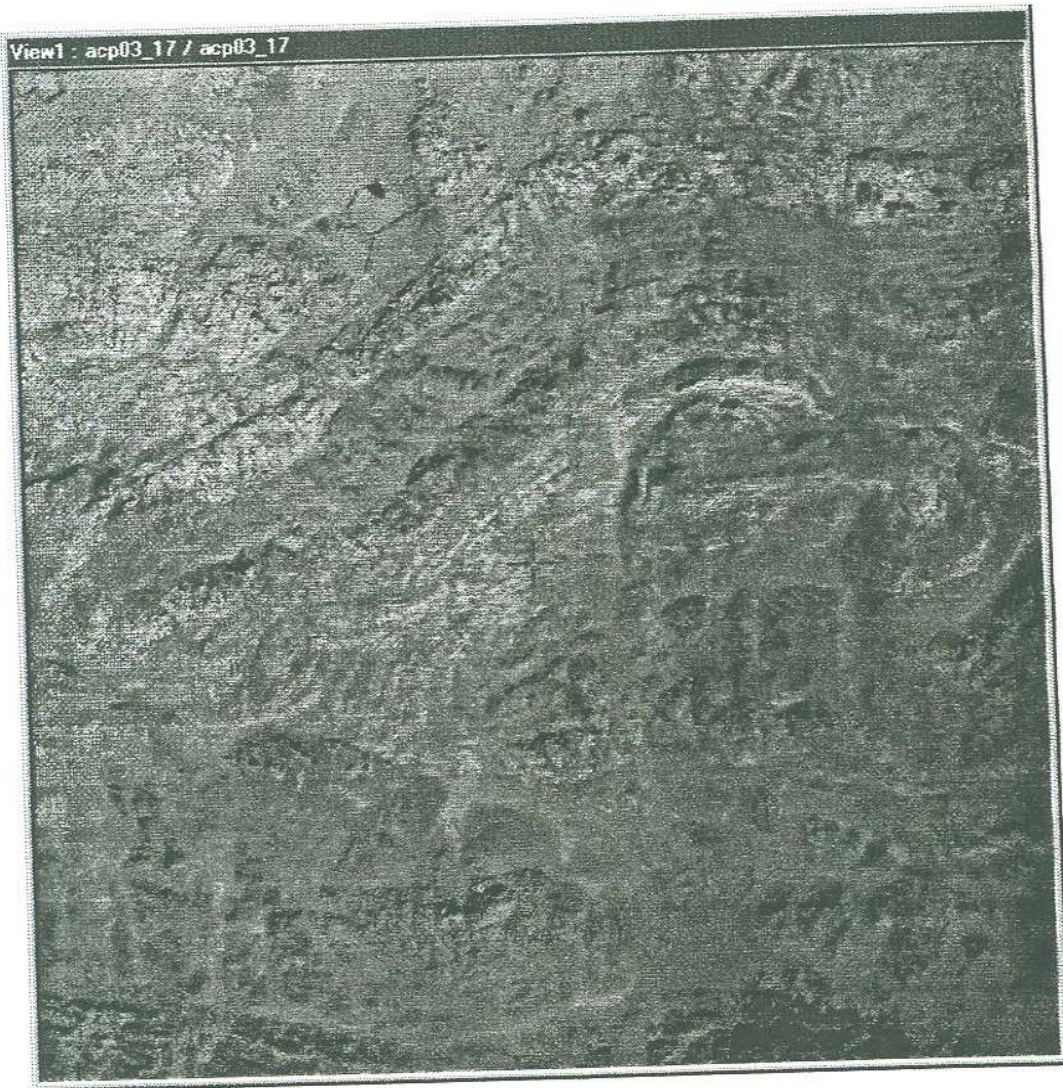


Fig. No.28 Plegamientos sobre rocas Metamórficas, localidad de Perú.

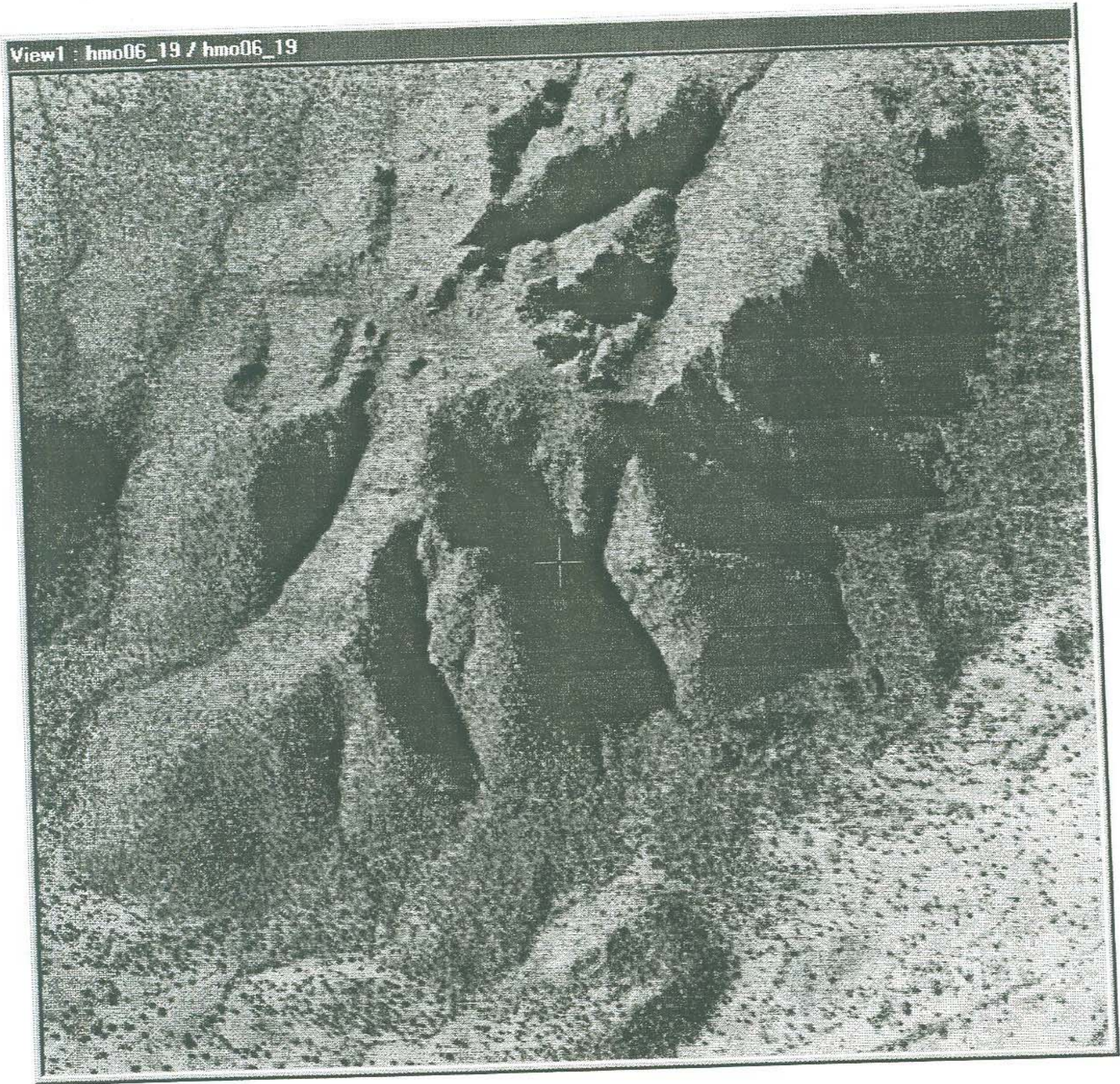


Fig. No.29 Rocas Ígneas Intrusivas , localidad NW Cd. Hermosillo, Sonora, fotografía escala 1:8000.



Fig. No.30 Rocas Ígneas intrusivas, localidad Bahía de Kino, Sonora, fotografías escala 1:8000.



Fig. No.31 cerro la coyotita.

Recomendaciones

- 1.- Con este método se puede obtener mayor precisión y reducción de costos en la producción fotogramétrica.
- 2.- Precisiones mas exactas en imágenes que métodos convencionales como la fotogrametría análoga.
- 3.- Los productos finales de la restitución son de productividad mas eficiente que productos levantados sobre el terreno.
- 4.-Software comercialmente disponible y de fácil manejo para el usuario.
- 5.- No utiliza dispositivos ni calibraciones mecánicas.

Bibliografías

Burtch Robert, History of Photogrammetry, Center for Photogrammetric Training
Ferris State University, E.U.A.

Castillo R. José A., (1977), Tesis "Apuntes de fotogeología para la carrera de
geología", Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, Facultad de
Ingeniería. 38-58 pp.

Deagostini Routin Daniel, (1984), Introducción a la fotogrametría,
CIAF- Centro Interamericano de Fotointerpretación, Bogota Colombia.

Ferris State University, History of photogrammetry, Surveying Engineering
Department, E.U.A.

García Dobarganes Juan Esteban, Efectos de traslado de georeferencia
efectiva en fotografía aérea de escala grande y con relieve abrupto. Facultad de
Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato, México., 38-61 pp.

Gómez Molina Alfonso, (1999), Flujo de Trabajo en Fotogrametría Digital,
Universidad Politécnica de Madrid.

www.mappinginteractivo.com

Gruber Michael, Leberl Franz , (2001), Escáneres Fotogramétricos de alta
calidad para la cartografía, Vexcel Imaging, Austria.

www.mappinginteractivo.com

LH Systems, (1999), Curso para el operador de estación de trabajo
fotogrametría digital (dpw), VERSION 4.2, E.U.A.

López Vergara M.L., (1971), Manual de Fotogeología, Publicación Científica de
la Junta de Energía Nuclear, Madrid. 20-21 pp.

Sosa Sergio Alfredo, (2002), Algunas Experiencias con Procedimientos Accesibles de Fotogrametría Digital, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.

www.mappinginteractivo.com

Wolf Paul R., (1983), Elements of Photogrammetry., Second Edition, McGraw-Hill, E.U.A. 356-357 pp.

Wong Patrick , Digital Photogrammetry.

www.Geoplance.com

DeLoach Stephen, Photogrammetry : A Revolution in Technology

www.profsurv.com

The Digitalization of Photogrammetry.

www.maps-geosystems.com

Fotogrametría Digital.

www.efn.uncor.edu/otros/foto/teoria.htm

Fotogrametría aérea, terrestre y de objeto cercano, Información sobre fotogrametría.

www.rediris.es

Fotogrametría Digital.

www.sap.com.mx

Fotogrametría Terrestre.

www.efn.uncor.edu

Photogrammetry.

[http://support.erdas.com/documentation/files/spanish_fiel_guide/7_conceptos_fo](http://support.erdas.com/documentation/files/spanish_fiel_guide/7_conceptos_fotogrametricos.pdf)

[togrametricos.pdf](http://support.erdas.com/documentation/files/spanish_fiel_guide/7_conceptos_fotogrametricos.pdf)

Photogrammetry.

www.ggy.edu/courses/geog4430_chpanglo/lecture.html

UNIVERSIDAD DE SONORA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**"ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS TECTÓNICAS CIRCULARES
Y SU RELACIÓN CON YACIMIENTOS MINERALES EN EL
NORESTE DEL ESTADO DE SONORA"**



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA

**BIBLIOTECA
DE CIENCIAS EXACTAS
Y NATURALES**

244

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

GEOLOGO

PRESENTA:

SOLIS LIMÓN MARIA FERNANDA



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
BIBLIOTECA DE CIENCIAS
EXACTAS Y NATURALES

HERMOSILLO, SONORA

MARZO DEL 2000

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer especialmente al M. C. Alfonso Rosas S., quien amable y atentamente hizo posible gran parte de la realización de este proyecto.

Igualmente por su colaboración, apoyo, instrucción, asesoría en este proyecto y en mi formación profesional, quiero expresar mi total gratitud y mi cariño a la Ing. Alma Patricia Sámano.

Al Dr. Lucas H. Ochoa , gracias por sus consejos académicos, su disposición, sus conocimientos compartidos y por su amabilidad, le estoy muy agradecida. A la Geol. Alejandra Montijo por haber aceptado ser sinodal en el presente trabajo.

Al Departamento de Geología, le agradezco por haberme ayudado en mi formación profesional.

De la misma forma les estoy muy agradecida, a Oscar Franco y a Saul Peña, por su tiempo, ayuda y disponibilidad para auxiliarme en la realización de este trabajo.

Agradezco especialmente al Sr. Adrian Ortiz de Geodigital, quien sin su apoyo no hubiese podido concluir totalmente este proyecto.

A mis padres:

Les dedico especialmente este trabajo porque ustedes lo forjaron desde mi niñez, orientándome, apoyándome e impulsándome para salir adelante y para alcanzar esta ansiada meta en mi vida. Principalmente a Dios y a ustedes les agradezco todo lo que han hecho de mí y por mí.

A mis hermanas y amigos:

Les agradezco su ayuda y su paciencia, así como su cariño y su amistad; agradezco especialmente a Karina Flores que me ha demostrado ser una verdadera amiga, y gracias por ayudarme en la parte más difícil de este trabajo.

Miguel:

Porque me has brindado tu ayuda y apoyo incondicional, principalmente en mis momentos más difíciles.

A mis maestros:

Por sus enseñanzas, sus consejos, y la transmisión de sus conocimientos, especialmente a la maestra Paty.

Con mucho cariño:

Fernanda.

ÍNDICE



BIBLIOTECA
DE CIENCIAS EXACTAS
Y NATURALES

PÁGINA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN.....1

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN.....3

LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO.....4

CLIMA.....7

METODOLOGÍA DE TRABAJO.....9

HIDROLOGÍA.....10

FISIOGRAFÍA.....12

GEOMORFOLOGÍA.....14

CAPITULO II

MORFOESTRUCTURAS.....15

Fases de una Caldera.....16

GEOMORFOLOGÍA ESTRUCTURAL.....20

Mapa Hipsométrico.....20

Mapa de Lineamientos.....20



NOMBRE DE LA TESIS:

**"ANALISIS DE ESTRUCTURAS TECTONICAS
CIRCULARES Y SU RELACION CON YACIMIENTOS
MINERALES EN EL NE DE SONORA"**

NOMBRE DE LA SUSTENTANTE:

MARIA FERNANDA SOLIS LIMON

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.


GEOL. ALEJANDRA MONTIJO GONZALEZ

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.


ING. ALMA PATRICIA SAMANO TIRADO

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.


DR. LUCAS HILARIO OCHOA LANDIN

**ATENTAMENTE
"EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA"**


**GEOL. J. ISMAEL MINJAREZ SOSA
Jefe de Departamento**

JIMS*ag



SECRETARÍA DE INVESTIGACIONES
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

CAPITULO III

GEOLOGÍA REGIONAL.....	21
Precámbrico.....	21
Paleozoico.....	22
Mesozoico.....	24
Cenozoico.....	26
TECTÓNICA.....	27
Orogenia Nevadiana.....	28
Orogenia Oregoniana.....	28
Evento Laramídico.....	29
Arco Continental	30

CAPITULO IV

GEOMORFOLOGÍA ESTRUCTURAL MEDIANTE LA INTERPRETACIÓN DE MAPAS HIPSOMÉTRICOS, DE LINEAMIENTOS Y LITOLÓGICOS ESC. 1: 250,000.....	33
Franja Sierra Madre Occidental.....	35
Franja Arco Continental.....	36
ÁREAS PROSPECTIVAS.....	52
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	57
APÉNDICE.....	59
Simbología de las Unidades.....	59
Tabla No. 1.....	64
BIBLIOGRAFÍA.....	70

RESUMEN

El noreste del Estado de Sonora ha sido afectado por varios sistemas de fallamientos regionales, los cuales generan áreas de "debilidad cortical". Dichas áreas se encuentran constituidas por múltiples intersecciones de sistemas de lineamiento y por estructuras circulares desarrolladas principalmente en la provincia de la Sierra Madre Occidental. Aunque la geología y tectónica de Sonora es muy compleja, este trabajo aporta un avance regional de los principales lineamientos y estructuras tectónicas circulares, las cuales pueden estar asociadas a mineralizaciones.

La presencia de estas áreas de debilidad cortical asociadas a la actividad magmática definen "áreas favorables" para localizar yacimientos minerales, ya que estos requieren para su formación varias condiciones como son: la presencia de un sistema hidrotermal que sugiera la presencia de un intrusivo como fuente térmica, la preparación estructural y trampas estructurales que definan su localización y que sirven como conducto para el flujo de las soluciones hidrotermales.

Ahora bien, la técnica de la geomorfología estructural es una herramienta importante que nos permiten definir las estructuras tectónicas circulares, lineamientos regionales y semirregionales presentes en una área y así localizar las áreas de debilidad cortical y por consiguiente las posibles áreas favorables para la mineralización.

Los pórfidos de cobre son un ejemplo clásico donde se observa la coincidencia de estas áreas de debilidad cortical (estructuras tectónicas circulares y lineamientos) con evidencias de mineralización. Por ejemplo: El sistema Cananea y sistema Nacozari, son estructuras tectónicas circulares que presentan mineralización de cobre principalmente y además son los principales productores de dicho mineral a nivel nacional, este tipo de yacimiento se relaciona a gran escala con batolitos y stocks granitófilos emplazados durante el evento Laramide del Cretácico Superior-Terciario Inferior (C. R. M. del Edo. de Sonora, 1992)

INTRODUCCIÓN

Los yacimientos minerales para que se formen requieren de varias condiciones; entre las más importantes se tiene la presencia de un sistema hidrotermal, por ejemplo, cuerpos intrusivos como fuente térmica, cuyo reflejo en geomorfología estructural podrían corresponder a estructuras tectónicas circulares, trampas estructurales que definan su localización (fallas, cruce de fallas y en general áreas de debilidad estructural), que sirven como conductos para el flujo de las soluciones hidrotermales.

La geomorfología estructural, es una herramienta importante, que mediante la utilización de planos topográficos e hipsométricos, espaciogramas, imágenes en gris, técnicas de relleno y secciones con escalas verticales exageradas, entre otros, nos permiten definir algunas estructuras tectónicas circulares, lineamientos regionales y semirregionales presentes en un lugar, mediante este análisis se puede inferir la presencia de complejos magmáticos

El análisis geomorfológico de estas estructuras tectónicas circulares nos pueden ayudar a definir:

- Centros de actividad magmática, presencia de intrusivos y sistemas hidrotermales relacionados.
- Áreas estructuralmente favorables para la circulación de soluciones hidrotermales que coincidan con las áreas de intersección de varios sistemas de fallamiento.
- La coincidencia de centros de actividad magmática con lineamientos estructurales nos pueden definir áreas con posibilidades de localizar yacimientos minerales. El uso de la geomorfología estructural, en conjunto con ocurrencias minerales, geología y metalogénesis, nos dará una buena perspectiva para definir áreas favorables para contener yacimientos minerales.

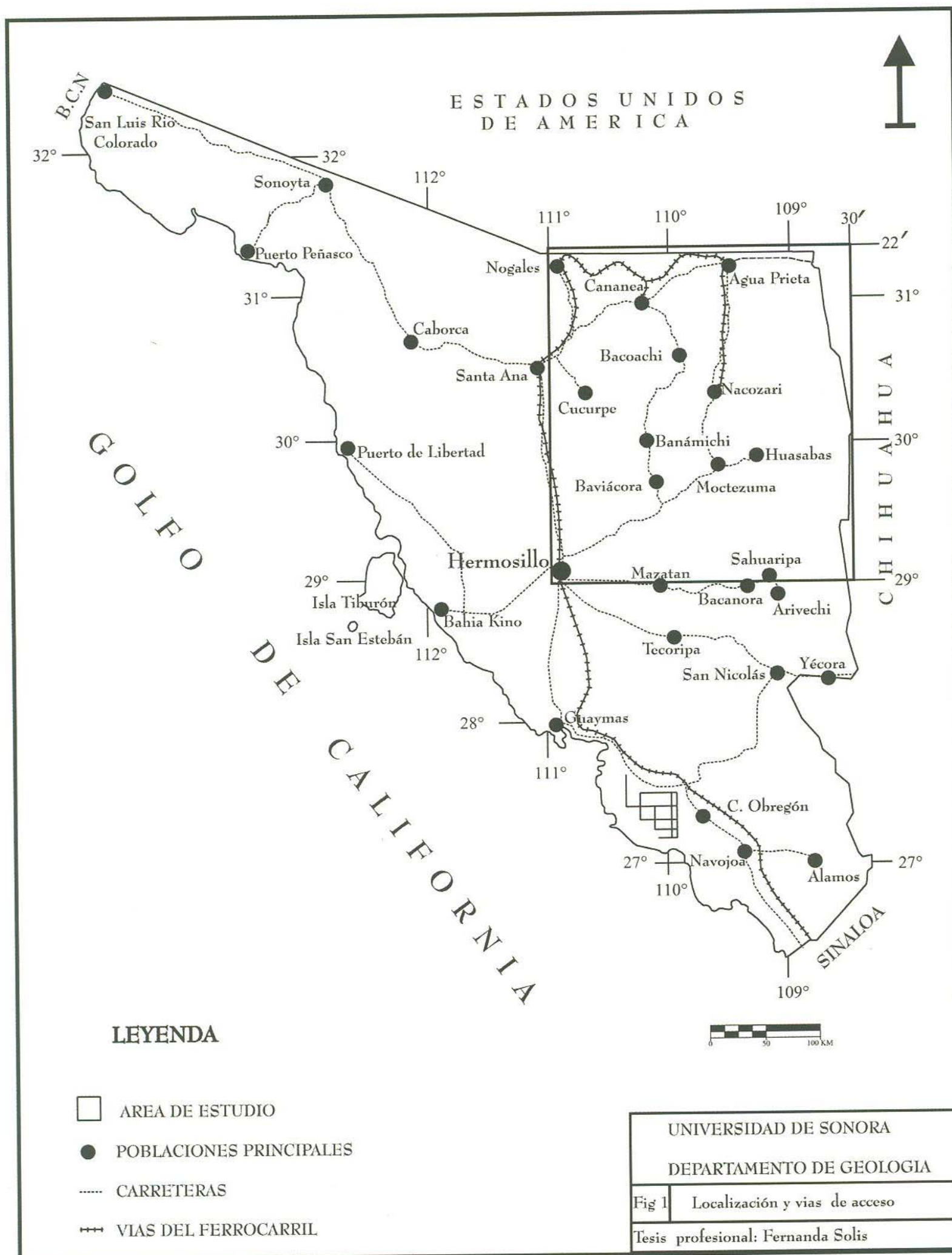
El objetivo principal de esta tesis es analizar la mayoría de las estructuras tectónicas circulares mediante la aplicación de la técnica de geomorfología estructural, esta técnica consiste en utilizar diversos tipos de mapas e imágenes (topográficos, hipsométricos, espaciomapas e imágenes en gris) y relacionar dichas estructuras a la mineralización y así contribuir con la definición de nuevas áreas potencialmente económicas, en el NE del Estado de Sonora.

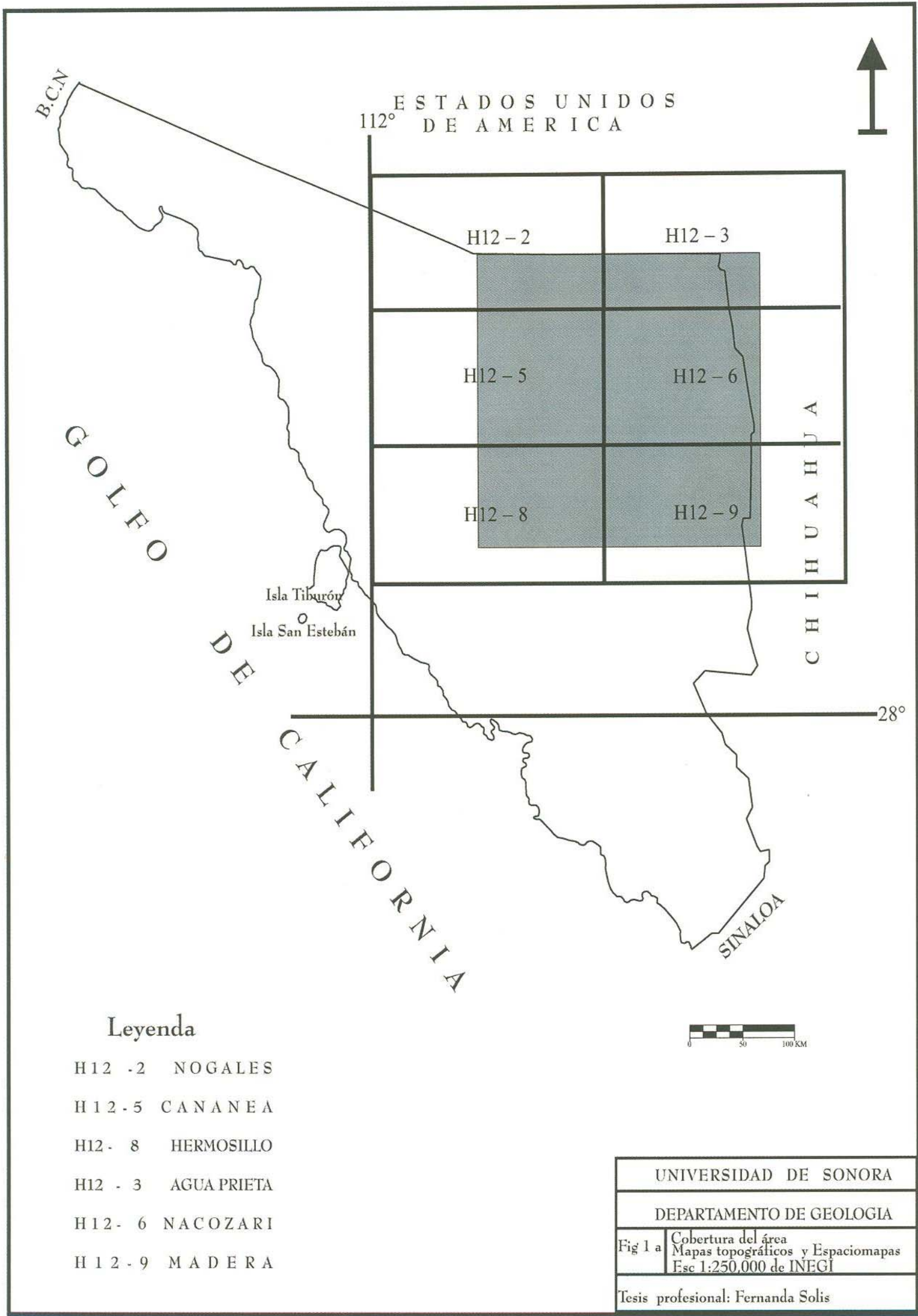
LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El área de estudio comprende la porción noreste del Estado de Sonora (Fig. 1), la cual se encuentra representada por un 53.5 % de la superficie de Sonora, los municipios más importantes en el área son: Hermosillo, Santa Ana, Nogales, Cananea, Agua Prieta, Nacozari de García y Moctezuma, principalmente, algunos de ellos con gran tradición minera. Dicha área se encuentra limitada por las coordenadas geográficas 31° 22' y 29° 00' Latitud Norte, 111° 00' y 108° 45' Longitud Este.

Se encuentra comprendida dentro de las cartas topográficas escala 1: 250,000 editadas por INEGI, estas cartas son: Nogales (H12-2), Agua Prieta (H12-3), Cananea (H12-5), Nacozari (H12-6), Hermosillo (H12-8) y Madera (H12-9) (Fig. 1a).

El acceso al área se puede hacer de varias maneras, siendo las principales vías las siguientes: Partiendo de Hermosillo capital del Estado, hacia el norte, por la carretera federal No. 15 que atraviesa el estado de sureste a noroeste, pasa por las principales ciudades como lo son Santa Ana, Magdalena de Kino y Nogales, otra posibilidad es siguiendo por esta misma carretera federal hasta el entronque con el poblado de Imuris, ahí se desprende la carretera estatal que comunica a las ciudades de Cananea y Agua Prieta. Hacia el este, las poblaciones del valle del Río Sonora se encuentran comunicadas por la carretera estatal y por caminos vecinales de terracería. Otra importante vía de acceso

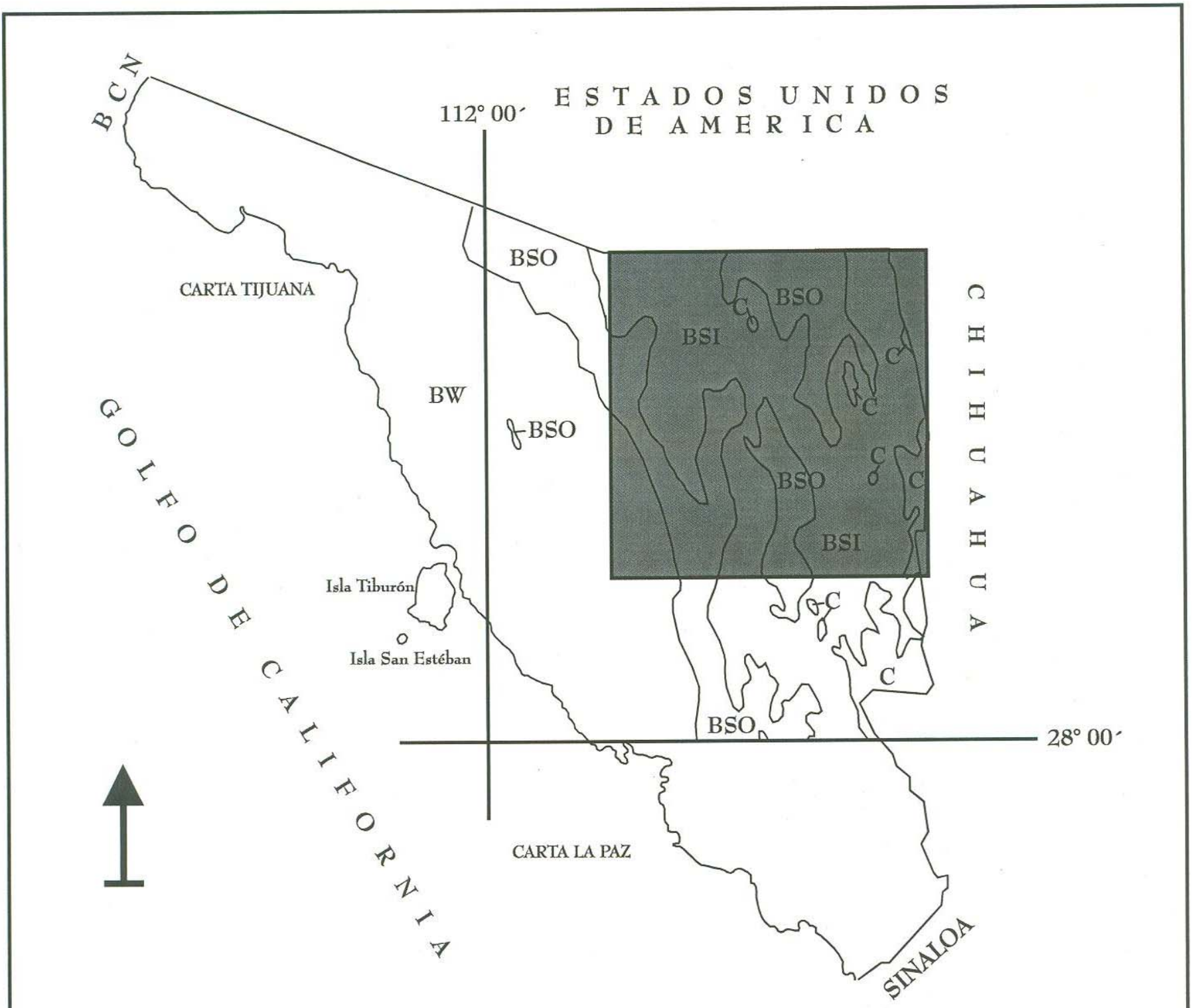




es la carretera estatal que comunica a la ciudad de Hermosillo y Nacozari de García, la cual pasa por los poblados de Ures, Cumpas y Agua Prieta. Además se cuenta con aeropistas en Imuris, Cananea, Agua Prieta, Nacozari y Cumpas; teniéndose pistas de tierra para avionetas pequeñas en un gran número de poblaciones. El ferrocarril Sonora-Baja California comunica a Hermosillo con Benjamin Hill, a partir de alguna estaciones de estas vías férreas surgen ramales secundarios que comunican a Santa Ana, Imuris, Nogales, Naco, Cananea, Agua Prieta y Nacozari de García. En general la infraestructura del área estudiada es buena, lo que ayuda a la exploración.

CLIMA

En la amplia región de estudio la cual comprende la porción noreste del Estado, como se puede observar en la Fig. 2, se cuenta con una variedad de climas, (Köppen modificado por García, 1973), los cuales se agruparan en forma general en dos grupos: Los del grupo B comprenden los tipos de clima **muy secos, secos, semisecos**, caracterizados por lluvias de verano, con un 10.2% de precipitación invernal y en algunas regiones como en Agua Prieta sobrepasa a los 10.5%, con verano cálido e invierno fresco y los del grupo C que corresponden a los **templados**, comprende las partes altas del Estado, son tipos de climas templados subhúmedos con lluvias en verano y con un 10.2% de precipitación invernal.



LEYENDA

GRUPO B

GRUPO C

BW MUY SECO

C TEMPLADO

BSO SECO

BSI SEMISECO

AREA DE ESTUDIO



UNIVERSIDAD DE SONORA DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA	
FIG 2	CLIMAS KOPPEN Modificado por García
Tesis profesional: Fernanda Solis	

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se hizo la cartografía geológica general del área de estudio en gabinete tomando como base a los espaciomapas (imagenes en infrarrojo) escala 1:250,000, utilizándose los siguientes: Nogales (H12-2), Agua Prieta (H12-3), Cananea (H12-5), Nacoziari (H12-6), Hermosillo (H12-8) y Madera (H12-9).

Para hacer la interpretación de las imagenes y delimitar las distintas unidades litológicas se tomó en cuenta: las distintas tonalidades de gris para diferenciar roca y suelo, así como también, patrón de drenaje, resistencia a la erosión, estratificación, etc., haciéndose un mapa base geológico preliminar, y auxiliándose de un mapa geológico escala 1:500,000 del Estado de Sonora (Gobierno del Estado de Sonora, 1993) para complementar la cartografía del área.

Una vez hecha la cartografía geológica para cada espaciomapa, se analizó la topografía del área apoyándose en cartas topográficas escala 1:250,000 editadas por INEGI las cuales son: Nogales (H12-2), Agua Prieta (H12-3), Cananea (H12-5), Nacoziari (H12-6), Hermosillo (H12-8) y Madera (H12-9); posteriormente se hicieron los siguientes mapas:

Mapa Hipsométrico: Para realizar este mapa se tomó como base el mapa topográfico escala 1:250,000 y se colorearon las curvas de nivel con intervalos de 500 metros entre cada curva maestra. Los colores que se escogieron fueron tonos fríos para indicar las máximas alturas y los tonos amarillos para las curvas más bajas topográficamente. Esto hace que un mapa topográfico sea comprendido más fácilmente y facilita su interpretación geomorfológica. Debido a que se utilizó el programa GEMA de INEGI, fue imposible utilizar esta escala de colores por lo que en las imagenes finales se muestra una escala de alturas y de colores diferentes a las que se utilizaron originalmente.

Mapa Tectónico de Lineamientos: El mapa tectónico de lineamientos se hizo con ayuda de los mapas; geológico, topográficos e hipsométricos, espaciomapas e imagenes en

gris, donde se marcaron todos aquellos lineamientos y curvilineamientos apoyándose en el patrón de drenaje sobre todo aquellos que son anulares, radiales o que presentan cauces rectos por grandes tramos, técnicas de relleno, topografía, fallas, fracturas, etc. Realizados estos mapas, el siguiente paso fue analizar cada estructura circular y/o lineamientos.

Posteriormente se recopiló información bibliográfica sobre los yacimientos minerales del área, ubicándose éstos en el mapa tectónico para analizar la relación existente entre los yacimientos y las morfoestructuras.

Una vez hechos todos éstos mapas por separado, se reunió toda la información del área en un sólo mapa, donde se observan los rasgos geológicos, tectónicos y su asociación a zonas mineralizadas

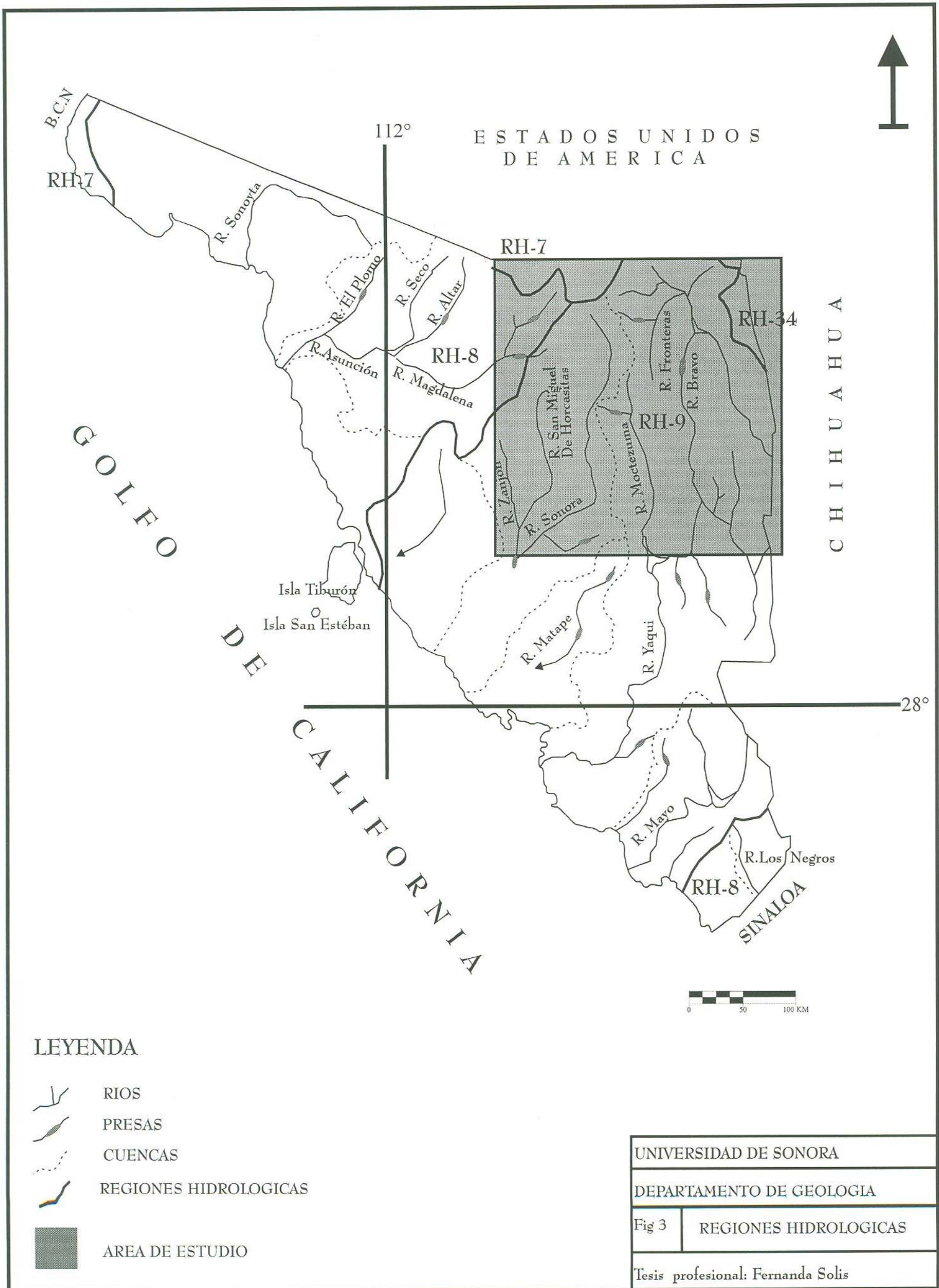


EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA

**BIBLIOTECA
DE CIENCIAS EXACTAS
Y NATURALES**

HIDROLOGÍA

Con base en la clasificación de cuencas hidrológicas, el área de estudio cuenta con cuatro regiones hidrológicas conformadas por: Río Colorado (RH-7), Sonora Norte (RH-8), Sonora Sur (RH-9) y Cuencas Cerradas del Norte (RH-34) (Fig. 3). El área se encuentra en la vertiente del Pacífico drenada por varios ríos importantes dentro del área de estudio, entre los cuales tenemos a los ríos Zanjón, San Miguel de Horcasitas, Sonora, Moctezuma, Fronteras y Bavispe. Todos ellos se encuentran en la Región Hidrológica de Sonora Sur (RH9), como se puede observar ésta región hidrológica ocupa casi la totalidad del área de estudio. Los Ríos San Miguel de Horcasitas y Sonora siguen un patrón estructural ya que presentan cambios abruptos en la dirección de sus causas, esto es norte-sur en las partes altas y en las partes bajas del relieve cambian su dirección a NE-SW, para desembocar en la presa Abelardo Rodríguez.



LEYENDA

-  RIOS
-  PRESAS
-  CUENCAS
-  REGIONES HIDROLOGICAS
-  AREA DE ESTUDIO

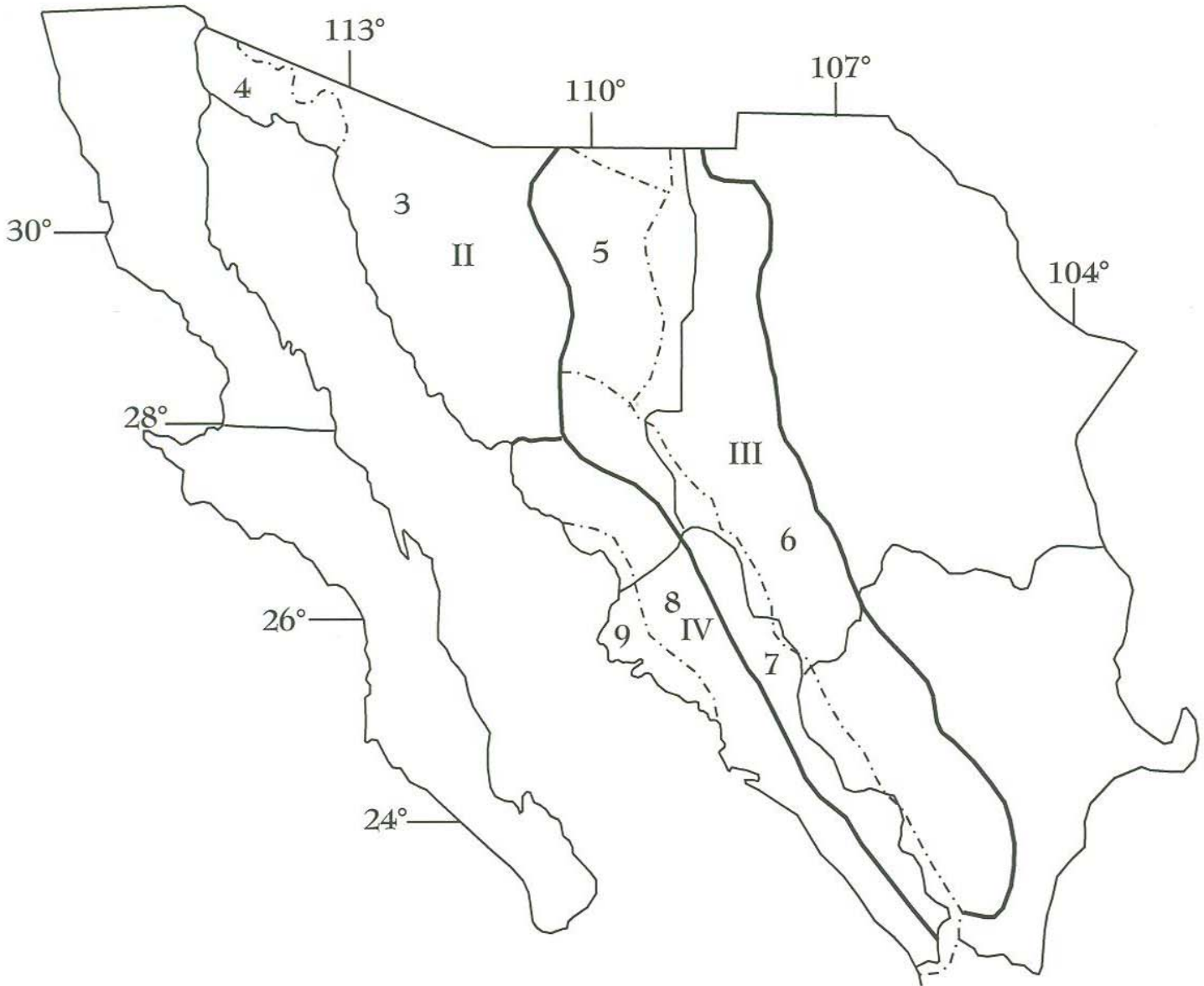
UNIVERSIDAD DE SONORA	
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA	
Fig 3	REGIONES HIDROLOGICAS
Tesis profesional: Fernanda Solis	

FISIOGRAFÍA

El área de estudio queda comprendida dentro de las provincias fisiográficas, Desierto y Llanuras Sonorenses y Provincia Sierra Madre Occidental, Raíz, (1959) modificado por Inegi, (1981).

La provincia fisiográfica Desierto y Llanuras Sonorenses se divide en una subprovincia llamada Sierras y Llanuras Sonorenses. En el área de estudio se caracteriza dicha subprovincia por desarrollar grandes planicies compuestas por sedimentos poco consolidados de gravas, arenas, limos y arcillas del Cuaternario; los cuales presentan elevaciones de 500 m.s.n.m. en promedio y de 900 m.s.n.m. para las partes altas correspondientes a pequeñas sierras de composición ígnea con una orientación NNW - SSE, donde el drenaje se extiende hacia el Pacífico.

La provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental se divide en dos subprovincias, denominadas: de Sierras Alargadas, la cual comprende más del 50% del área y Sierra Madre Occidental. (Raíz, 1959, modificado por Inegi, 1981). (Fig. 4). La subprovincia de Sierras Alargadas es la más grande del área de estudio formada principalmente por rocas ígneas del Cretácico-Terciario. Las máximas elevaciones se encuentran en la parte norte del Estado así como al este con un promedio de 2000 m.s.n.m. Además se caracteriza por desarrollar valles intermontanos orientados NNW-SSE. La provincia geológica Sierra Madre Occidental es de las más grandes de la República Mexicana formada principalmente por rocas ígneas extrusivas, donde el drenaje es hacia el Pacífico. La Sierra Madre Occidental se extiende desde la línea internacional con Estados Unidos en dirección sureste a través del NW de Sonora, Chihuahua y Durango con una longitud de 1400 km. y en promedio unos 200 km. de anchura.



Leyenda

- LIMITE DE PROVINCIA
- - - - - LIMITE DE SUBPROVINCIA

- II PROVINCIA DESIERTO Y LLANURAS SONORENSES
- 3 Subprovincia de Sierras y Llanuras Sonorenses
- 4 Subprovincia Desierto de Altar
- III PROVINCIA SIERRA MADRE OCCIDENTAL
- 5 Subprovincia de Sierras Alargadas
- 6 Subprovincia Sierra Madre Occidental
- 7 Subprovincia Sierras de Pimonte
- IV PROVINCIA DE SIERRAS SEPULTADAS
- 8 Subprovincia de Sierras sepultadas
- 9 Subprovincia los Deltas

UNIVERSIDAD DE SONORA	
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA	
Fig 4	PROVINCIAS FISIOGRAFICAS RAIZ, 1959, INEGI, 1981
Tesis profesional: Fernanda Solis	

GEOMORFOLOGÍA

La Geomorfología del área esta representada por grandes valles hacia el suroeste del área de estudio, los cuales se encuentran en una fase de madurez teniéndose extensiones muy amplias de acumulación de sedimentos provenientes de las partes altas donde los Ríos Zanjón, San Miguel de Horcasitas y Sonora sirven como medio de transporte fluvial especialmente en las épocas de lluvia en los meses de Julio-Agosto. Estos ríos aportan grandes cantidades de material superficial no consolidado como gravas, arenas, limos y arcillas que forman los valles que son aprovechados para la agricultura y ganadería.

La región de valles al suroeste del área tienen elevaciones máximas de 500 metros s.n.m. esta zona se encuentra en la fase de madurez , sólo se encuentran pequeños cerros testigos de erosión. Esta amplia zona abarca al municipio de Hermosillo, Carbó, San Miguel de Horcasitas y Ures.

La fase juvenil se encuentra representada hacia el este del área de estudio donde se tienen elevaciones que sobrepasan los 2000 metros s.n.m. que corresponden a la Sierra Madre Occidental. En la porción central del Estado de Sonora con dirección hacia el noroeste, cuenta con una menor elevación respecto a la Sierra Madre Occidental, se trata del Batolito de Aconchi que tiene elevaciones máximas de 2180 metros s.n.m. en sus picos más altos y una longitud de 67.5 kilómetros aproximadamente.

Existen numerosas cañadas y valles intermontanos angostos, a medida que se avanza hacia el oeste del área de estudio, aumentan sus dimensiones volviéndose más amplios y orientados principalmente hacia el noroeste-sureste y localmente norte-sur como lo es en sus inicios el valle del Río San Miguel de Horcasitas.

Así como existen valles orientados NW - SE, también existen numerosas sierras orientadas en esta dirección producto de la etapa distensiva del Basin and Range. Las sierras más evidentes son: El Batolito de Aconchi, Sierra Azul y Sierra La Madera.

CAPITULO II

MORFOESTRUCTURAS

El término morfoestructura fue utilizado inicialmente por Guerasimov, (1946) para referirse a formas del relieve originadas esencialmente por procesos endógenos (movimientos que ocurren en el interior de la tierra y que son los creadores de las formas del relieve, que se manifiestan por medio de sismicidad, volcanismo, magmatismo intrusivo, ruptura de rocas y sus deformaciones) en interacción con los exógenos, (procesos niveladores de la superficie terrestre mediante la destrucción de las elevaciones y la acumulación) a los que corresponde determinada estructura geológica. Algunos otros autores le llaman formas tectónicas o formas estructurales.

Originalmente el objetivo de los estudios geomorfológicos estructurales era relacionar la estructura geológica con las formas de la superficie terrestre. Así, a partir de la observación de ésta es posible, en muchos casos inferir la arquitectura del subsuelo. Posteriormente este tipo de estudios fue abarcando el reconocimiento de estructuras ocultas y la determinación de movimientos neotectónicos. Para esto es necesario no solamente analizar las formas del relieve, sino los procesos exógenos actuales, además de apoyarse en estudios geológicos y geofísicos, (Lugo, 1988). En este trabajo se hará una descripción de las morfoestructuras del área de estudio las cuales se definen como elementos de los continentes que se originan por acción mutua de procesos endógenos y exógenos Guerasimov, (1946), un ejemplo de morfoestructura son los lineamientos y estructuras circulares. Los lineamientos son aquellos elementos del relieve dispuestos en una dirección dominante y condicionados por la actividad endógena, se caracterizan por tener una geometría de líneas rectas o ligeramente curvas (Lugo, 1988). Las Estructuras Circulares podrían corresponder al reflejo de intrusiones magmáticas que evolucionaron con el tiempo. En este trabajo sólo se hará referencia a dichas morfoestructuras: Lineamientos y Estructuras Circulares, por considerarse de mayor importancia.

Para un mejor entendimiento de las morfoestructuras circulares se toma el trabajo de Smith and Bailey (1968), en el que se muestra la evolución de estructuras tipo caldera desde su formación hasta su resurgencia, y las cuales fueron divididas por estos autores en las siguientes fases:

FASE I, Tumescencia regional y generación de fracturas anulares.

“Tumescencia Regional” se refiere al levantamiento de una área extensa debido a una intrusión magmática, esto infiere un levantamiento progresivo en un período de tiempo relativamente largo y por consiguiente la formación de fracturas concéntricas y radiales en que eventualmente tienen lugar erupciones catastróficas de flujos de cenizas (Fase Ia). La tumescencia regional termina con esta fase de erupciones que dan lugar a la formación de calderas. La evidencia de tumescencia en lugares de calderas es ambiguo, y quizás en muchos lugares la principal evidencia es el sistema de fracturas anulares y el volcanismo andesítico. (Fig. 5).

FASE II, Colapso de caldera.

Los procesos de erupción y colapso pueden lógicamente ser concurrentes, especialmente cuando grandes volúmenes de materiales son eruptados. Sin embargo pueden seguir grandes colapsos como una consecuencia de la extracción eruptiva de magma.

Se forman diques anulares durante la fase de erupciones que dan lugar a la formación de calderas. La evidencia de tumescencia en lugares de calderas es usualmente ambiguo, y quizás en muchos lugares la principal evidencia es el sistema de fracturas anulares. El colapso forma en la zona de hundimiento valles en forma de “Y” que se caracterizan por ser favorables por la presencia de vetas. (Fig. 5).

FASE IIa, Volcanismo prerresurgente y sedimentación.

El período que sigue inmediatamente al colapso de una caldera puede ser un tiempo de desequilibrio extremo, ambos en la cámara magmática y dentro de la caldera. Indudablemente el escarpe y las paredes inestables de la caldera experimentan cavidades, avalanchas y deslizamientos gravitacionales. Con restauración parcial de la presión magmática, esta sedimentación granular puede ser acompañada por erupciones piroclásticas o lava. (Fig 5).

FASE III, Levantamiento resurgente.

Con excepciones, las otras fases de una caldera que se han descrito tienen domos centrales estructurales bien definidos. Estos son caracterizados por ser longitudinales, radiales o tener graben apical u otras fallas distensivas o ambos. En algunas calderas, el levantamiento es acompañado por volcanismo en fracturas anulares y una u otra intrusión o efusión o ambas a lo largo del graben u otras fracturas en el domo. (Fig. 5).

FASE IIIa, Principal volcanismo en fracturas anulares.

El volcanismo de la zona de fracturas anulares, formación siguiente al domo resurgente, esta fase es la primera de grandes postsubsidiencias de actividad volcánica superficial, y la de mayor duración que cualquier otra fase, excepto quizás la fase I. La fase IIIa termina con la última erupción del ciclo de caldera, y puede requerir más subdivisiones en algunas calderas, basadas en notables variaciones en la composición de productos de la erupción. (Fig. 5).

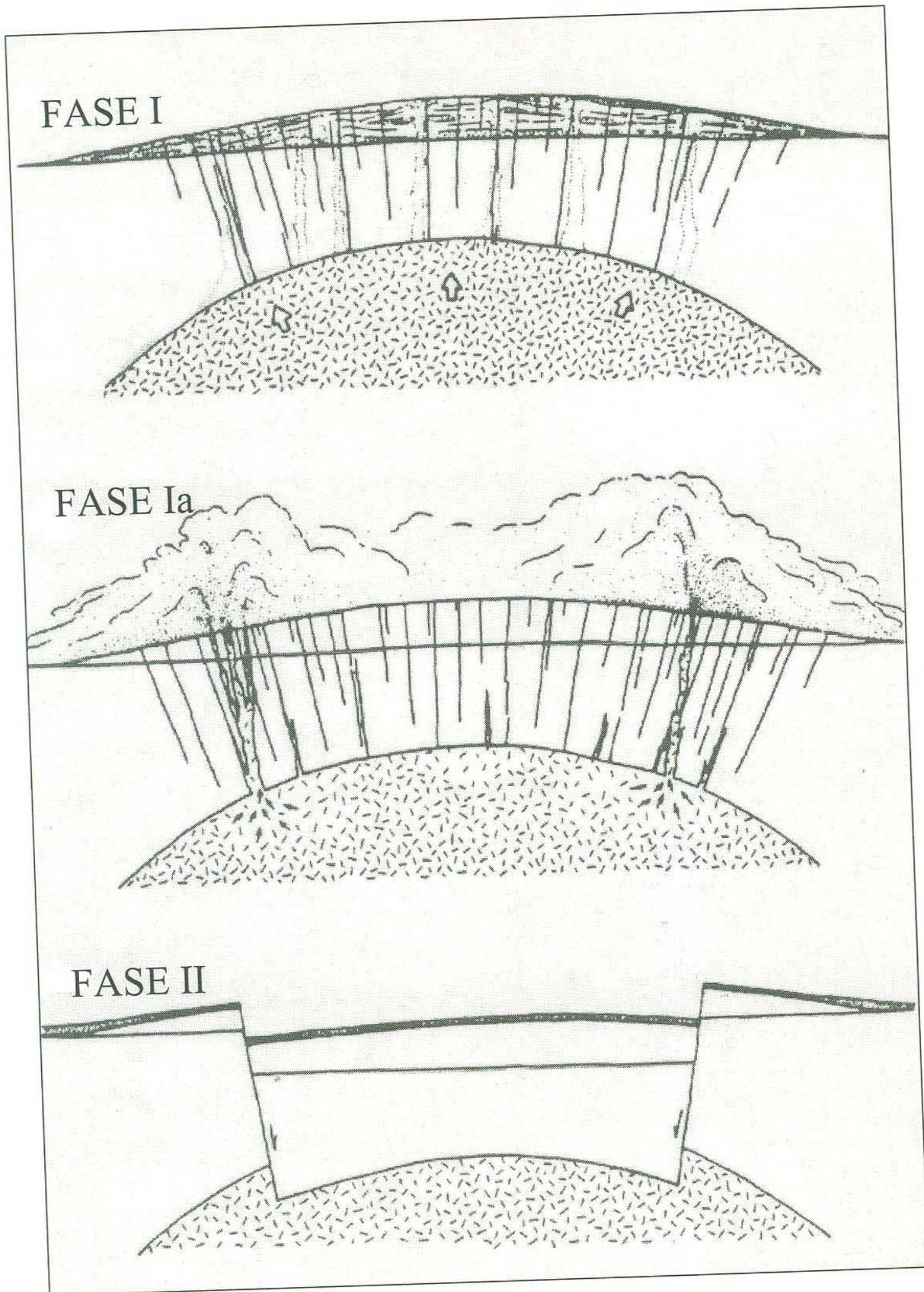


Fig. 5 Fases de una caldera resurgente (Smith and Bailey, 1968)

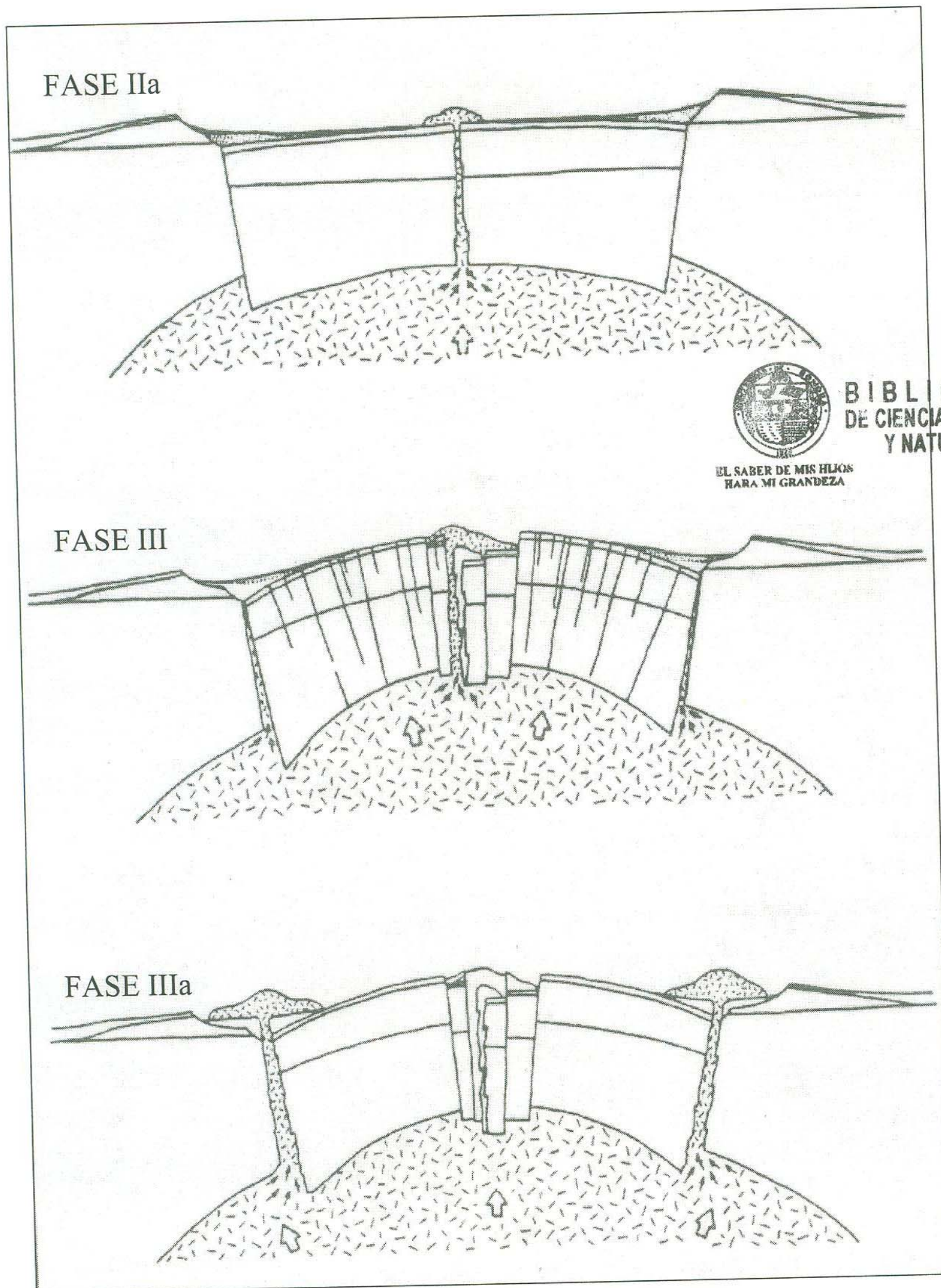


Fig. 5 Fases de una caldera resurgente (Smith and Bailey, 1968)

GEOMORFOLOGÍA ESTRUCTURAL

Para el estudio geomorfológico estructural, se analizó la tectónica regional del área de estudio, se utilizaron mapas hipsométricos escala 1:250,000, complementándolos con mapas geológicos, así como la interpretación de lineamientos a partir de espaciomapas.

Mapa Hipsométrico

El mapa hipsométrico es el inicial y uno de los más importantes (Lugo, 1988), a pesar de la simplicidad con que se elabora. El problema fundamental consiste en definir, a partir de las alturas máxima y mínima en el mapa topográfico original, los intervalos de valores que han de delimitarse (para lo cual no existen reglas, sino criterios), con el fin de que exprese de manera inmediata y clara el relieve y las estructuras tectónicas en su totalidad. Esta es su gran virtud: simplifica enormemente la comprensión de un mapa topográfico.

La elección de colores no es arbitraria, sino que se apoya en un sistema internacional que, bien aplicado, da la impresión de observar el mapa en tercera dimensión. Esta secuencia de colores, de los fríos a los cálidos, se utiliza, asimismo, en gran parte de la cartografía geomorfológica, en la que siempre existe una jerarquía que se define con la secuencia de colores apropiada. La información que proporciona la hipsometría es fundamental para la interpretación geomorfológica (Lugo, 1988).

Mapa Tectónico de Lineamientos

Es un método con gran aplicación en geomorfología, estos lineamientos son la expresión en el relieve de posibles estructuras geológicas (Lugo, 1988).

Como ya se ha mencionado anteriormente, los lineamientos son los elementos del relieve dispuestos en una dirección dominante y condicionados por la actividad endógena. Por ejemplo un lineamiento puede ser el cauce de un río dispuesto en línea recta a través de

grandes distancias, escarpes de montañas, de laderas, formas posibles de productos de fallas, estructuras circulares u oblicuas las cuales sugieren intrusiones magmáticas o diapirismo, además también se incluye la red fluvial, es una expresión fiel de fracturamientos en las rocas. Además el drenaje radial puede indicar estructuras circulares.

Las zonas de mayor fracturas, eliminando aquellas en las que la influencia es esencialmente litológica, pueden corresponder a crestas de formas plegadas, a domos, a zonas de falla, intersección de grietas o fallas de grandes dimensiones, etc. Por esto son de un apoyo importante en los estudios morfoestructurales y tienen aplicación en los trabajos preliminares de geotécnica, exploración de yacimientos minerales y estructuras petrolíferas.

CAPITULO III

GEOLOGÍA REGIONAL

Las siguientes descripciones de los diferentes tipos de roca que afloran en el área de estudio son descritos siguiendo la simbología de la carta Geológica de Sonora, escala 1:500,000, (1993). Dicha descripción se hará tomando paquetes litológicos debido a la escala que se maneja en el presente trabajo.

Precámbrico

En la Porción noreste de Sonora, afloran rocas (ígneas, metamórficas y sedimentarias), de edad precámbrica, las cuales están conformadas por afloramientos muy locales que no pueden ser cartografiados a escala 1:250,000.

Al noroeste del área de estudio cerca de la mina de Cananea aflora el granito Cananea (Prmi), que Anderson y Silver (1977), dataron con una edad de 1440 ± 15 ma.

Hacia el nor-oriente de Sonora, las rocas que conforman el basamento, corresponden al Esquisto Pinal (Prim) a la cual le han asignado una edad del Proterozoico temprano. Estas rocas metamórficas se encuentran representadas por esquistos constituidos por cuarzo, sericita y ocasionalmente turmalina y anfíboles (Ransome, 1904). La localidad tipo de estas rocas se encuentra en las Montañas Pinal al Este del Estado de Arizona. Otras localidades en Sonora en que se han reportado rocas Precámbricas es en la Sierra Los Ajos, al sureste de las Montañas Morita (Taliaferro, 1933) y en la Sierra de Las Mesteñas (Gómez Tagle, 1967).

El granito Las Mesteñas (Prmi), se sitúa en el Proterozoico Medio (Viveros, 1965), esta roca se caracteriza por contener xenolitos de la Formación Esquisto Pinal; teniendo su localidad tipo en la Sierra Las Mesteñas, en el municipio de Fronteras. Este mismo granito aflora en la Sierra de Cabullona, localizado en una pequeña ventana de erosión.

Las rocas sedimentarias precámbricas (Prss), están representadas por la Formación Las Víboras, la cual aflora en la región noreste del ejido Cerro de Oro. Estas rocas están representadas por lutitas, lodolitas fisiles de estratos delgados y dolomias con horizontes oolíticos y algunas algas estromatolíticas. El espesor para esta formación es aproximadamente de 2000 m. González (1989). Castro y Morfín (1989), le han asignado una edad Precámbrico tardío, ya que la correlacionan tanto en litología como en fósiles con las rocas de esta edad que afloran en el área de Caborca.

Paleozoico

En el área de estudio se encuentran representados el Cámbrico medio, Devónico y Mississippico como pequeños afloramientos de secuencias sedimentarias y debido a sus dimensiones no pueden ser cartografiados a escala 1:250,000, por lo que sólo se hace referencia a ellos. En cambio, el Paleozoico Superior se encuentra ampliamente distribuido en la porción norte y en menor proporción hacia el este del Estado de Sonora.

Rocas paleozoicas de edad Cámbrico al Ordovícico fueron descritas por Rangin (1978), como facies de plataforma variando hacia el norte del Estado a facies de plataforma externa, mientras que en el sur corresponden a facies de plataforma interna. Para los períodos del Carbonífero al Pérmico, las secuencias calcáreas presentan facies más homogéneas en todo el Estado.

En la región de Agua Prieta-Cabullona afloran rocas correspondientes al Cámbrico medio, estas rocas están representadas por la Formación Cuarcita Bolsa (Cm), definida por Ransome (1904), al sureste de Arizona; Estas mismas rocas afloran en la sierra Las Mesteñas, las cuales fueron reportadas por Gómez-Tagle (1967), y descritas como una secuencia de intercalaciones rítmicas compuestas de areniscas y lutitas micáceas. Hacia la base esta formada por horizontes conglomeráticos, presentando una estratificación cruzada. Esta unidad también aflora en el distrito minero de Cananea, en la sierra Los Ajos (López Ramos, 1980), en la sierra Del Tule (González, 1986) y en el cerro de Cabullona (Viveros, 1965).

Rocas pertenecientes al Devónico superior, afloran en el Distrito Minero de Cananea (Mulchay y Velasco, 1954), Estas rocas están representadas por calizas compactas de color gris oscuro, de estratificación mediana a gruesa. Estas mismas rocas se han reportado en el Cerro de Cabullona (Viveros, 1965) y en la sierra de Los Ajos (López Ramos, 1980).

Rocas de edad Mississippico están representadas por la Caliza Escabrosa que aflora en el Distrito Minero de Cananea (Mulchay y Velasco, 1954), en el Cerro de Cabullona (Viveros, 1965), en la sierra de Las Mesteñas (Gómez-Tagle, 1967), en la sierra de Los Ajos (López Ramos, 1980) y en la sierra Del Tule (González, 1986). Estas rocas están constituidas por calizas granulosas de estratificación gruesa, con tallos de crinoides, y su localidad tipo se encuentra en la Sierra La Escabrosa en Arizona.

Las rocas paleozoicas de edad Pensilvánico medio-superior (Pz), se encuentran representadas por la Formación Horquilla, que aflora en el Distrito Minero de Cananea, con

Rocas de edad Jurásico superior afloran en Cucurpe, están compuestas por una gruesa secuencia volcánico-clástica (J), con potentes intercalaciones volcánicas, de tipo andesítico, y contenido faunístico rico en amonitas las cuales fueron descritas por Rangin (1977), dichas secuencias se encuentran abundantemente distribuidas en la porción norte del Estado.

En el noreste del Estado, aflora una serie sedimentaria continental y marina con material piroclástico a la cima, estas rocas están datadas como Cretácico superior y denominado Grupo Cabullona (Ks), el cual presenta fósiles de invertebrados marinos y de vertebrados continentales. Este grupo ha sido dividido en las siguientes formaciones, siendo de la más antigua a la más moderna: Conglomerado Snake Ridge, Areniscas Cama, Lutitas Packard, Capas Rojas Superiores y tobas riolíticas; están presentes en la Sierra de Cabullona el Conglomerado Snake Ridge (fragmentos de calizas y esquistos), que descansa discordantemente sobre la Formación Morita; y posiblemente las tobas riolíticas, que afloran en el río Cabullona, C. R. M. del Edo. de Sonora (1994).

La Formación La Palma (Ks), es considerada de edad Post-Albiano medio, debido a que sobreyace discordantemente a la Formación Cerro de Oro. Aflora entre el ejido La Palma y Rancho de Aguilar, en Sonora Central. Dicha formación está representada hacia la base por un conglomerado con areniscas, y lodolitas hacia la cima, es definida informalmente por Carlos González (1989). La Formación La Palma puede ser cronocorrelacionable con el Grupo Cabullona, así como con algunas cuencas aisladas de depósitos molásicos, que según Rangin (1978), afloran al sur de Magdalena, Castillo (1992).

Rocas ígneas intrusivas afloran en el área de estudio en forma de cuerpos irregulares de composición granodiorítica (KTi), afectan solamente a las rocas sedimentarias del Cretácico temprano. En el área del Distrito Minero de Cananea, Anderson y Silver (1977) fecharon a la Granodiorita Cuitaca por el método U/Pb asignándosele una edad de 65 ± 3 m. a. En el área de Villa Pesqueira, Sonora central se ha reportado también una granodiorita a la cual se le ha asignado una edad tentativa de Cretácico y se le relaciona al plutonismo Laramídico, donde se considera para ello la datación hecha a la granodiorita de Cobachi que describe Noll (1981). En el Municipio de Hermosillo, Castillo y Grijalva (1988), reportan un cuerpo intrusivo de composición granodiorítica, la cual es muy abundante en el sitio El Coloso, ha sido afectada

moderadamente por el intemperismo. Estos cuerpos intrusivos denominados KTi se encuentran ampliamente distribuidos en la porción central del estado de Sonora, como lo es el Batolito de Aconchi que corresponde a un evento intrusivo regional resultado de la Orogenia Laramide (Damon et al, 1964) al cual se le asigna una edad Paleoceno tardío-Eoceno temprano para su formación, Castillo, (1992).

Cenozoico

Al inicio del Terciario se emplaza en la región centro-noreste de Sonora, un importante conjunto volcano-plutónico, alineado NNW-SSE desde Cananea a Nacozari, al cual se le asocia la mayoría de las mineralizaciones de cobre diseminado, Rangin (1978).

En la región de Cananea, Valentine (1936), definió tres unidades volcánicas (Tv), llamadas Formación Elenita, Formación Henrietta y Formación Mesa. La Formación Elenita está constituida por traquita y riolita; la Formación Henrietta y Mesa se presentan como flujos, tobas y brechas de flujo. Se forman de complejos volcánicos (derrames, tobas y aglomerados). El espesor de las rocas volcánicas es aproximadamente 5,000 m. Han sido datadas por métodos radiométricos entre 47 y 67 m. a. (+ 3.4) m. a. (Cretácico-Terciario). La distribución de estas rocas es más importante en la provincia de Sierras y Valles Paralelos, en el centro-este del Estado, C. R. M. del Edo. de(1992).

A fines del Terciario inferior sucede el principal evento volcánico de la región (Tov), depositando grandes volúmenes de material de composición riolítica, con esporádicas emisiones de coladas de basaltos y depósitos de tobas y piroclastos, de edad Oligoceno-Mioceno. Su máximo espesor se encuentra en la provincia de la Sierra Madre Occidental, adelgazándose hacia la provincia de Sierras y Valles, C. R. M. del Edo. de Sonora (1992).

Durante el Plio-Cuaternario se presentan importantes redes de fallamiento, de rumbo general NNW-SSE, el cual es cortado por otro sistema norte-sur, aún activo

(Aguilera, 1920 en C. R. M. del Edo. de Son. 1992), dando como resultado la formación de amplias depresiones que fueron rellenadas rápidamente con potentes espesores de sedimentos continentales detríticos, que constituyen a la Formación Baúcarit (Tn); representando un volcanismo basáltico interestratificado.

El Cuaternario está representado por un volcanismo basáltico (Qv), cuyos centros de emisión se localizan a lo largo de las fallas relacionadas con la apertura del Golfo de California los cuales afloran en Moctezuma y Arizpe, Correa (1983). Además se han depositado las terrazas aluviales y aluvión (Q), los cuales están compuestos por sedimentos superficiales, como gravas, arenas y limos, y cubren la mayor parte de la región oeste del estado. También existen sedimentos que generalmente se encuentran en la base de las montañas, rellenando valles y cauces de ríos y arroyos (Qa), formando lomerios alargados, etc. Los sedimentos poco consolidados (Qt), como grava, arena y limos se encuentran ampliamente distribuidos y representados por una gran variedad en tamaños, litología y grado de redondez, variando su abundancia con respecto a la cercanía y naturaleza de la fuente, se forman como producto de la erosión de rocas preexistentes y depositados en un ambiente continental.

TECTÓNICA

La tectónica en el NW de México es muy compleja y poco entendida. Sin embargo, algunos trabajos a nivel regional han aportado información importante sobre la geología estructural que nos ayudan a entender un poco la evolución tectónica en esta región

En la siguiente sección se hará una descripción sobre la evolución tectónica del NW de México considerando sólo los eventos más importantes desde el Triásico-Jurásico hasta el Cenozoico, considerando el poco conocimiento que se tiene sobre las orogéneas anteriores.

Orogenia Nevadiana (Final del Jurásico)

Las estructuras formadas durante esta orogenia constituye la médula de su actual edificio caracterizada por una tectónica tangencial, que superpuso durante una colisión, varios dominios paleogeográficos. Esta colisión superpuso terrenos acarreados gondwanianos a América (Laurencia). Los terrenos acarreados sobre el dominio americano son: La napa Aibó, estos terrenos son alóctonos sobre el Jurásico y en ocasiones sobre el basamento metamórfico de este último Radelli (1990). Esta estructura esta expuesta principalmente en el área de Caborca, y se prolonga hasta el área al noreste de Opodepe y al norte del granito de Huépac Macías (1992). Otro de los terrenos acarreados que se reconocen en varias localidades de Sonora es la napa Cobachi, la cual se encuentra constituida por la plataforma carbonatada del Paleozoico de Sonora. Esta napa se reconoce principalmente en el área de Caborca la cual se encuentra cabalgando a su antecesora la napa Aibó, mientras que en Sonora central descansa sobre el Jurásico fosilífero; Y por último la napa Trigo la cual corresponde a un dominio complejo de rocas metamórficas que ha sido acarreada sobre las dos anteriores, Lucero (1992).

Orogenia Oregoniana, (final del Cretácico inferior)

Esta orogenia empieza en Sonora con una distensión que da lugar a las cuencas donde se depositó el Grupo Bisbee. Mientras que en la costa Oeste de Baja California, se edifica el arco Alisitos. Simultáneamente ocurre la apertura de un mar marginal denominado "Olvidada" Radelli (1988), representado por una secuencia metamórfica de facies de esquistos verdes a anfibolitas que incluyen ofiolitas, Lucero (1992).

Para este período Grijalva (1991), reconoce en Sonora tres dominios:

- Dominio marino hacia el Este del estado (Lampazos, Arivechi, Arizpe, Sahuaripa, etc.).
- Dominio mixto, abarca la mayor parte las localidades (Agua Prieta, Santa Ana, Cerro de Oro, etc.), típicamente representado por el Grupo Bisbee.
- Y por último considera con mucha reserva un dominio volcánico hacia el Oeste.

Mientras tanto en el Cretácico superior, en el noreste de Sonora corresponden a este tiempo los depósitos del Grupo Cabullona, y en el resto del Estado se inicia a 90 Ma el volcanismo andesítico calcoalcalino Cochemé y Demant (1991), representado por el complejo volcánico inferior de la Sierra Madre Occidental, y casi seguramente por la Formación Tarahumara. Este magmatismo evolucionará para originar al Batolito de Sonora durante el período 67 ± 10 Ma Damon (1989), es decir durante el Evento Laramídico, Lucero (1992).

Evento Laramídico, (Cretácico superior-Paleoceno)

Este evento en Sonora consistió en un magmatismo calcoalcalino representado por el Batolito Laramídico de Sonora y sus rocas volcánicas asociadas. La actividad correspondiente a este magmatismo calcoalcalino, se inició en Sonora durante el Cretácico Superior a los 90 Ma con las secuencias andesíticas de la Formación Tarahumara. Este volcanismo evolucionará para dar lugar a las rocas plutónicas Laramídicas. Este magmatismo es considerado como producto de un arco volcánico (o magmático) relacionado con una zona de subducción (Placa Farallón bajo Placa Americana). El Batolito Laramide de Sonora, fue afectado por la gran distensión del Mioceno al igual que las estructuras Nevádicas y Oregonianas (mesocretácicas). Lucero (1992).

Estudios en la región NW de la Sierra Madre Occidental, Cochemé y Demant (1991), ponen en evidencia tres eventos magmáticos del Terciario, posteriores al Evento Laramídico. El primer evento ocurre durante el Eoceno-Oligoceno, alrededor de los 35 Ma. Este evento se representa por una secuencia de andesitas calcoalcalinas pero sobre todo ignimbritas potásicas que representan un volumen realmente importante. El segundo evento es un volcanismo bi-modal durante el período 27-17 Ma representado por basaltos y andesitas basálticas alternando con tobas ácidas calcoalcalinas. El último evento es el del volcanismo que da lugar a los basaltos miocenos, asociados a la Formación Baúcarit (17-12 Ma), Lucero (1992).

Arco Continental (Eoceno-Oligoceno)

En Sonora existen leucogranitos del Eoceno-Oligoceno, los cuales pertenecen al cinturón interior cordillerano de granitos de dos micas definido por Miller y Bradfish (1980), posteriormente White et al, (1986), los clasifican como tipo I, producto de la contaminación del magma en los niveles altos de la corteza.

Por consiguiente, se sugiere que estos leucogranitos de Sonora por ejemplo el Granito de Huépac, fueron emplazados en un ambiente tectónico de Arco Volcánico Continental, Lucero (1992).

Un Arco Volcánico Continental desarrollará una cuenca trasarco en la cual no llegará a formar una corteza oceánica, como ocurriría en un Arco Insular. La cuenca ante-arco se caracterizará por una fuerte sedimentación molásica. En Sonora el arco volcánico se extendía hacia el este hasta el límite actual de la Sierra Madre Occidental, hacia el oeste, debido a las distenciones y a las secuencias posteriores que lo cubren su límite es difícil de precisar, pero aparentemente se encontraba muy cerca a la costa oriental actual del Golfo de California, donde se conocen depósitos clásticos del Eoceno, Lucero (1992). (Fig. 11)

Comparando este sistema de arco volcánico continental con la de un sistema de arco volcánico insular se tiene que: En ambos sistemas se tiene una zona de subducción, en éste caso la zona de subducción sería en la margen Pacífica de América, a la cuenca ante-arco correspondería una cuenca molásica representada por la Formación Rosario, el arco volcánico corresponde la zona de los granitos alcalinos, y el mar marginal está representado por la cuenca de la Sierra Madre Occidental, Lucero (1992)

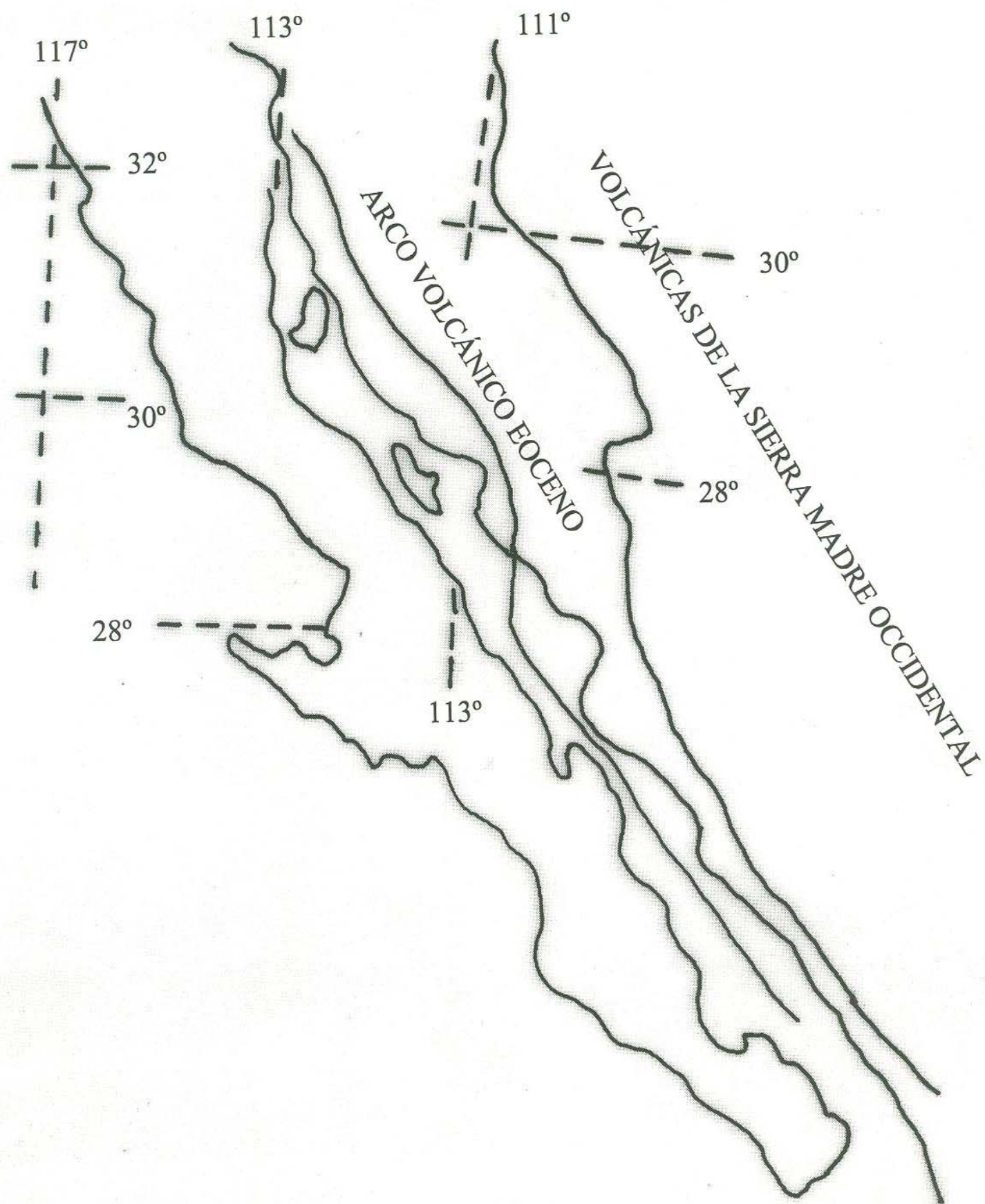


Fig. 6 Arco continental del Eoceno (Ortiz, 1998)

La porción NW de México se vio afectada por el fenómeno de subducción de la Placa Farallón bajo la Placa Americana, generando cuatro tipos de fallamiento (Rosas, 1999; Com. Pers.).

- * Sistema NW-SE, el cual es el más antiguo y el más persistente, está íntimamente asociado al límite de placas definido por la Placa Americana y la Placa Pacífico (Farallón). Este tipo de fallamiento es el que define el estilo tectónico de Basin and Range, típico de las áreas donde la subducción ha terminado.
- * Sistema NE-SW, el cual se desarrolló posteriormente al sistema NW-SE al cual desplaza. Se le considera el más importante ya que la mayor parte de la mineralización en vetas en Sonora está contenida en este sistema.
- * Sistema E-W, se le considera el sistema de fallamiento más joven, actualmente activo. Está íntimamente asociado al fenómeno de velocidad angular generado por la rotación terrestre, mismo que ayuda a producir las fallas transformes y transcurrentes.
- * Sistema N-S, es un sistema de fracturas tardías que cortan a las fallas NW-SE y tienen poco desplazamiento. Íntimamente asociado y es complementario del sistema E-W.

CAPITULO IV

GEOMORFOLOGÍA ESTRUCTURAL MEDIANTE LA INTERPRETACIÓN DE MAPAS HIPSOMÉTRICOS, DE LINEAMIENTOS Y LITOLÓGICOS ESCALA 1:250,000.

Basado en el trabajo realizado por Ortiz (1998), en el cual determina el límite tectónico del Arco Volcánico del Eoceno en el NW de México y tomando en cuenta los rasgos geomorfológicos, estructurales y litológicos, se definieron dos franjas a las cuales llamaremos “Franja Sierra Madre Occidental” y “Franja Arco Continental”.

Sólo una porción de la “Franja Sierra Madre Occidental” es incluida en la parte este del área de estudio (Fig. 6), y se caracteriza por presentar estructuras circulares de gran complejidad, producto del volcanismo calcoalcalino de la Sierra Madre Occidental. Por otro lado la “Franja Arco Continental” geomorfológicamente esta constituida por sierras y valles paralelos con dirección NW-SE y volcanismo calcoalcalino relacionado a la etapa de subducción en el oeste de México. En la mayoría de las estructuras circulares en esta franja, presentan diámetros más pequeños y estructuras circulares más sencillas que los observados en la Franja Sierra Madre Occidental.

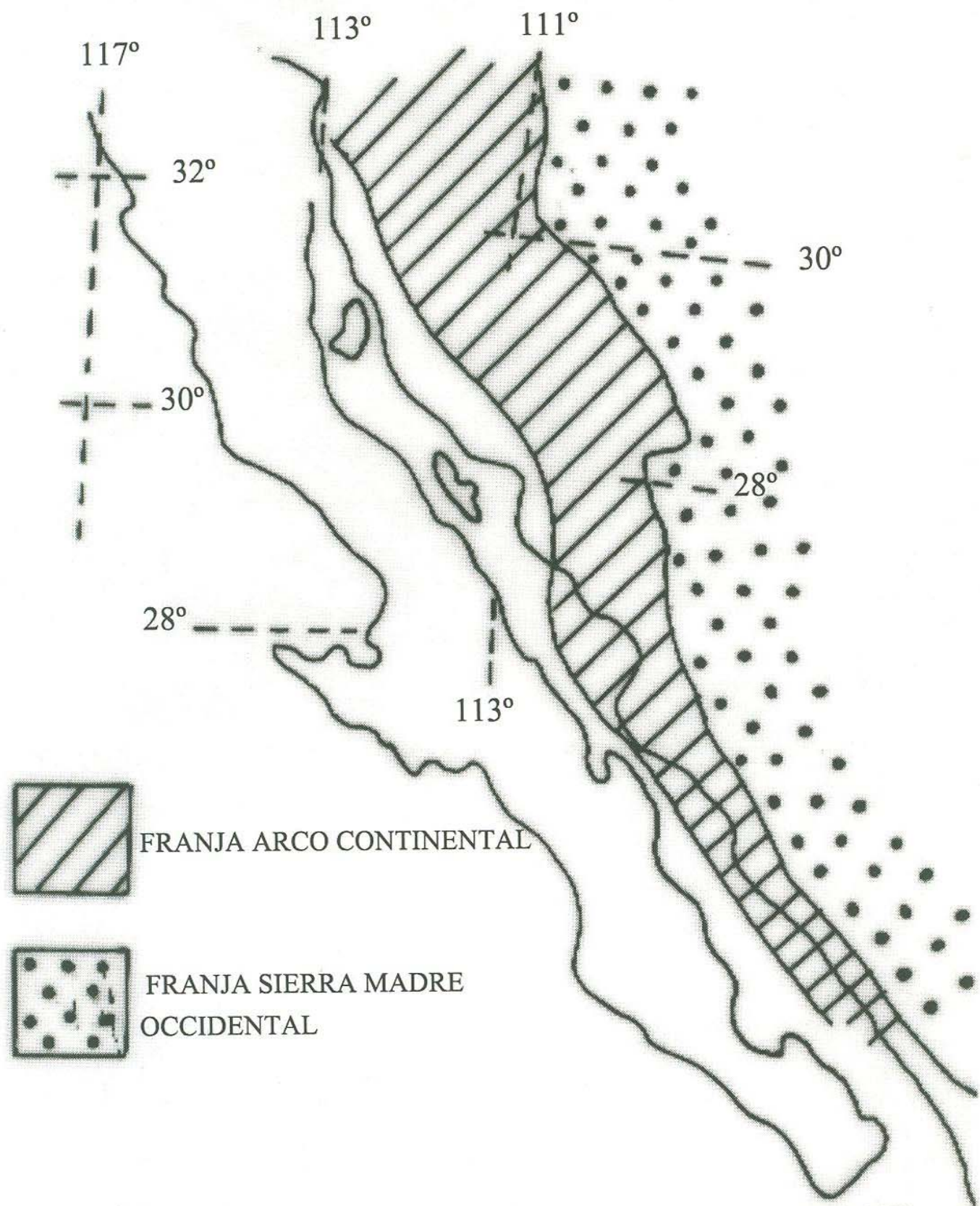


Fig. 7 Mapa del Arco Continental del Eoceno tomado de Ortiz, (1998) donde se muestran las franjas Sierra Madre Occidental y Arco Continental.

En algunas partes la localización de varios y distintos tipos de yacimientos minerales a lo largo de lineamientos y estructuras circulares en estas dos franjas parecen guardar una estrecha relación en tiempo y espacio. Muchas de estas estructuras presentan sus rasgos geomorfoestructurales muy bien definidos, sin embargo parecen carecer de mineralización relacionada. En las siguientes secciones se hará sólo una breve descripción de los sistemas no mineralizados, en cambio se enfatizará más en aquellas estructuras tectónicas circulares y/o lineamientos más importantes donde se observen yacimientos minerales localizados en cada franja correspondiente. Cada franja presenta una serie de zonas, las cuales presentan una expresión geomorfológica muy interesante con lineamientos (intersección de estructuras) y curvilineamientos los cuales, para una mejor y fácil descripción han sido divididos en sistemas.

Franja Sierra Madre Occidental

La franja de la Sierra Madre Occidental, como ya se mencionó anteriormente se caracteriza por desarrollar estructuras circulares de diversos diámetros, formando campos volcánicos las cuales podrían estar relacionados a intrusiones subvolcánicas múltiples, batolitos ó estructuras tipo calderas. Dichas estructuras circulares se localizan en la región oeste del Estado de Chihuahua y este de Sonora.

1. En esta franja sólo se tiene una parte de una gran estructura circular denominada sistema "Hachita hueca". Esta estructura se localiza al noreste del área de estudio, en la sierra del mismo nombre al noreste del poblado La Morita; Su diámetro es aproximadamente de 30 kilómetros (Lámina 4). Se encuentra truncada en la parte central por una serie de estructuras lineales con dirección N-S. En el lado suroeste de la estructura circular, se localiza en el borde de dicha estructura la mina Hachita hueca, la cual se caracteriza por ser un yacimiento tipo skarn de Fe (Ag,Pb,Zn) dispuesto en mantos y en cuerpos irregulares más o menos concordante con la estratificación. La roca encajonante

corresponde a una secuencia formada de esquistos, rocas volcanosedimentarias, lutitas y calizas de edad Jurásico-Cretácico, Perez, 1985.

En este sistema la mineralización se localiza en el borde de la estructura circular como se puede observar en la lámina 4, donde esta estructura circular afecta a rocas de edad Jurásica-Cretácica, por lo que la edad mínima de formación para esta estructura pudiera haberse iniciado a principios del Terciario ya que la mineralización presente en este ambiente corresponde a esta edad.

Franja Arco Continental

La franja Arco Continental coincide con el arco volcánico continental de edad Eoceno definido por Radelli y Lucero (1997), el cual se extiende por todo el Estado de Sonora con una dirección NW-SE. Esta franja abarca gran parte del área de estudio y del mismo modo que la franja Sierra Madre Occidental, ha sido dividida en sistemas.

2. El Sistema "Cananea" se encuentra al SE de la Ciudad de Nogales, se compone de una estructura circular elongada con dirección NW, cuyo diámetro de su máxima elongación es de 25 kilómetros aproximadamente. Esta estructura se encuentra afectada por lineamientos que la cruzan con direcciones NE-SW, NW-SE. En este sistema se reconocen varios yacimientos minerales entre los más importantes se tiene el Distrito Minero de Cananea el cual se localiza hacia el borde de dicho sistema, este yacimiento mineral se caracteriza por presentar una mineralización tipo Pórfido Cuprífero de Cu-Mo relacionada a zonas de stocworks, disseminaciones y estructuras de brechas. El ambiente geológico esta representado por granitoides de dimensión batolítica (granodiorita Cuitaca) de 64 ± 3 Ma. (Mapa Geológico de Sonora, 1993) el cual intrusiona a una secuencia de rocas del Triásico-Jurásico compuestas por derrames, tobas y aglomerados variando de andesitas a dacitas. Este gran sistema hidrotermal produjo una extensa zona alteración hidrotermal de varios km², la cual se centra cerca y dentro de los cuerpos intrusivos (Ochoa, L. com. pers.). Esta zona de alteración varía en intensidad desde una roca con débil a profunda

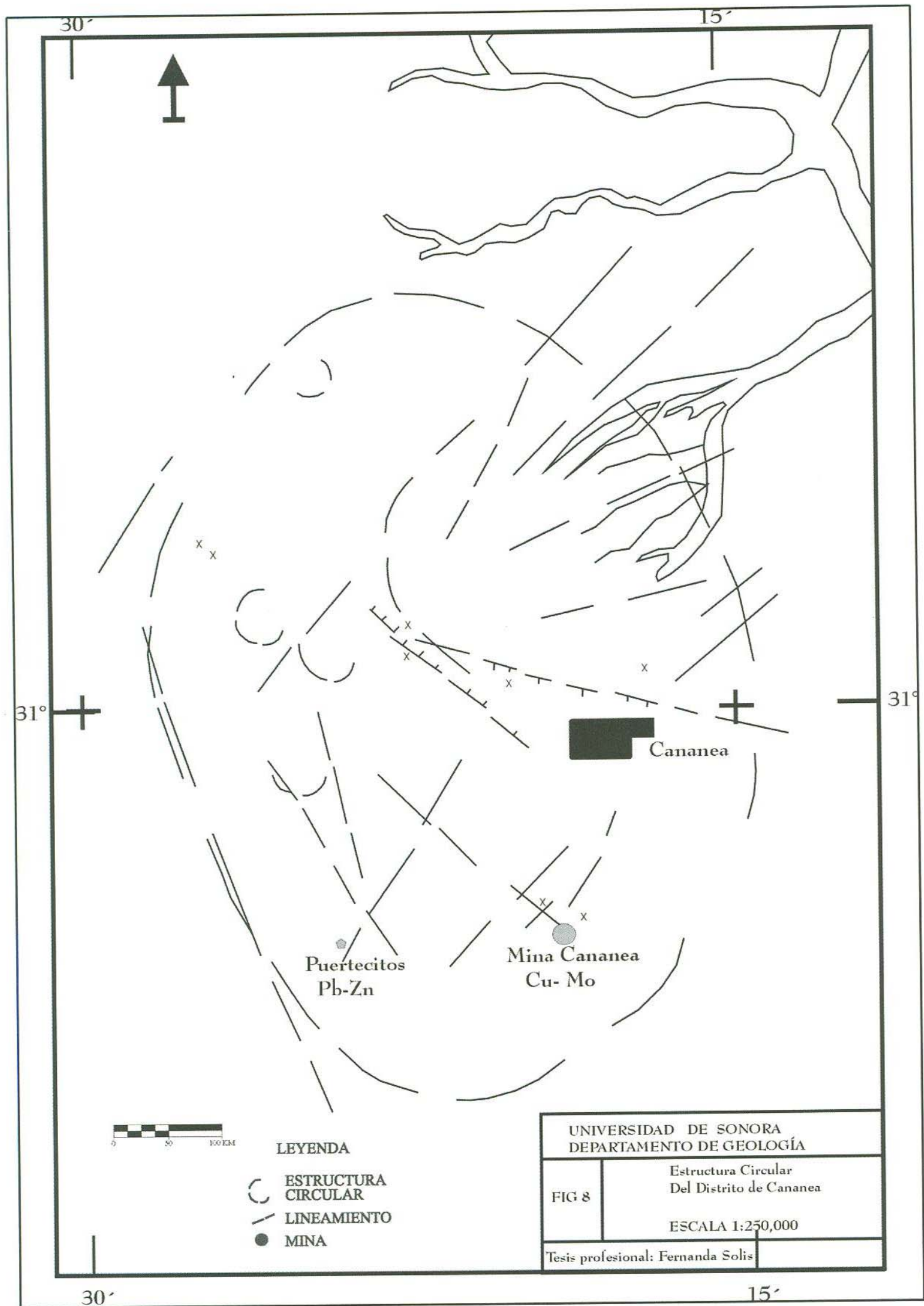
alteración en las cuales la textura original ha sido completamente borrada, la intensidad de la alteración hidrotermal se interpreta como el resultado de un gran número de emplazamientos de pórfidos cuarzomonzónicos, los cuales propiciaron una gran actividad hidrotermal, C. R. M. del Edo. de Sonora (1992).

En conjunto con la zona de mineralización diseminada presente en este Distrito, se observa otro tipo de depósito mineral pero relacionado al mismo sistema de Pórfido de Cobre como son: Depósitos de skarn de Pb,Zn,Cu en el área de Puertecitos al oeste de Cananea, donde el ambiente geológico de este yacimiento son rocas de edad Paleozoica. Otro yacimiento mineral es la brecha María, es un depósito de Cu-Mo relacionado a brechas Pneumatolíticas en las partes superiores de los cuerpos intrusivos, además, de una serie de brechas hidrotermales que incrementan el potencial económico de este distrito minero (Ochoa, L. Com. pers.). (ver Fig. 7 y Tabla No. 1).

Como se puede observar en la figura 8, este sistema esta compuesto por una estructura tectónica circular y por lineamientos que afecta tanto a rocas de edad Paleozoica (Puertecitos) como a rocas de edad Cretácico Superior-Terciario Inferior (Cananea), y en ambos casos las mineralizaciones son de edad Terciaria, por lo tanto la edad de formación de esta estructura circular pudiera haberse iniciado a principios del Terciario.

3. El Sistema "El Durazno" se localiza al NW del sistema Cananea comprendido entre la sierra El Chivato y cerro Los Tubos, es un sistema no mineralizado, compuesto por dos estructuras circulares cuyos diámetros son de 15 y 10 kilómetros aproximadamente. Dichas estructuras se encuentran orientadas sensiblemente hacia el NE, y existen intersecciones múltiples que lo afecta en varias direcciones. Ver Lamina 7 y Tabla No. 1.

4. El sistema "San Luis" se localiza hacia el este de la Ciudad de Agua Prieta, en la Sierra San Luis entre las localidades Rancho Nuevo y Pan Duro al noreste del Estado de Sonora. Se trata de un sistema no mineralizado, compuesto por dos estructuras circulares con diámetros aproximados de 11.25 Kilómetros, acompañándolas de manera paralela e



30'

15'



31°

31°




Cananea

Puertecitos
Pb-Zn

Mina Cananea
Cu- Mo



LEYENDA

-  ESTRUCTURA CIRCULAR
-  LINEAMIENTO
-  MINA

UNIVERSIDAD DE SONORA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

FIG 8

Estructura Circular
Del Distrito de Cananea

ESCALA 1:250,000

Tesis profesional: Fernanda Solis

30'

15'

independiente se encuentran otras dos estructuras más pequeñas con diámetros de 9.2 y 6 kilómetros aproximadamente. La estructura circular más pequeña se encuentra truncada por lineamientos NE-SW y E-W, y de manera general se encuentran interceptadas por numerosos lineamientos con direcciones preferenciales NE-SW, N-S y en menor proporción NW-SE. Ver Lamina 9 y Tabla No. 1.

5. El sistema "Los Ajos" se localiza al sur de la población de Naco. Dentro de este sistema se incluyen tres estructuras circulares, una de ellas localizada en la sierra Los Ajos con un diámetro 20 kilómetros aproximadamente. La segunda estructura circular se encuentra en la sierra San José, teniendo su máxima elongación hacia el NW, con un diámetro de 19 kilómetros aproximadamente. La última estructura circular es más pequeña, se localiza en el cerro Las Mesteñas y tiene un diámetro de 6 kilómetros aproximadamente. Las estructuras circulares se encuentran afectadas por una serie de lineamientos con dirección al NW-NE y no presentan mineralización. Ver Lamina 7 y 8 y Tabla No.1.

6. El sistema "San Juan" esta localizado al sureste de la población de Ures, (Lamina 1). Este sistema esta compuesto por dos estructuras circulares concéntricas; la estructura circular mayor tiene un diámetro aproximado de 10 kilómetros y la segunda estructura circular incluida dentro de la primera, tiene un diámetro de 6.5 kilómetros aproximadamente. Dichas estructuras circulares se encuentran truncadas en su porción oeste por lineamientos con dirección NW - SE y no se reporta mineralización alguna. Ver Tabla No. 1.

7. En la región de Nacozari se desarrolla uno de los sistemas más importantes en la zona de estudio. Este sistema lo denominaremos "Nacozari", el cual esta formado por una estructura circular de carácter regional, con un diámetro de aproximadamente 66 kilómetros. Varias estructuras circulares de menores dimensiones han sido desarrolladas en los bordes de esta gran estructura circular (ver lámina 5) con diámetros más pequeños que varían desde los 3.2, hasta los 15 kilómetros. En la parte central de este sistema presenta un graben central cubierto por material Reciente (aluvión) y con dirección N-S. El sistema

Nacozari es interceptado por varios lineamientos N-S así como E-W, NW-SE, y NE-SW que conforman un "enjambre" de múltiples intersecciones. La mineralización conocida se localiza en los bordes de la estructura mayor; la cual contiene diversas mineralizaciones entre las que destacan por su importancia y volumen, la mina La Caridad la cual constituye el depósito mineral más grande de este sistema, la mina Pilares, La Gloria y San Nicolas, la segunda de ellas se encuentra en la parte externa del borde de la estructura principal y concuerda con el borde de una estructura circular de menor dimensión. Su mineralización es principalmente Cu-Mo-W, morfológicamente presenta una forma ovalada en planta, con mineralización tanto en los fragmentos como en el cementante de la estructura de brecha, (Ochoa, L. com. pers.). Este depósito presenta una clara relación con el sistema tipo Pórfido de La Caridad, la cual se relaciona a una serie de rocas graníticas, Laramidicas intrusionando a un grueso paquete de rocas de composición andesítica de esta misma edad y consiste de una zona de enriquecimiento de 90 metros de espesor, con reservas de 800 millones de toneladas y con leyes de 0.7% de cobre y 0.12% de molibdeno. La calcosita es el principal mineral de mena, que cubre en capas finas a la pirita y calcopirita, C. R. M. del Edo. de Sonora, 1992. Ver Tabla No. 1.

En la mina La Caridad se presenta un zoneamiento clásico de los pórfidos de cobre el cual consiste de una alteración propilítica, argílica, fílica y potásica. La zona fílica concuerda con las zonas brechadas con leyes altas de cobre, mientras que la alteración potásica se asocia con los valores altos de molibdeno. (C. R. M. del Edo. de Son. 1992)

Cerca del borde oeste de la estructura circular del Sistema Nacozari (Lamina 5), se encuentran dos yacimientos de Ag (Pb-Zn-Cu), conocidos como La Gloria y San Nicolás, se trata de yacimientos en vetas tipo Sistema Pórfido Cuprífero para el primer yacimiento y en filones hidrotermales para el segundo, ambos tienen la misma litología que son andesitas del Cretácico superior - Terciario inferior, (Perez, 1985). Ver Tabla No. 1.

Hacia la parte este del Sistema Nacozari se encuentran los yacimientos de Pilares de Teras y El Tigre (Lámina 5). El primero de ellos presenta mineralización Ag (Pb-Zn-Cu)

40

de la mina Las Unispas, la cual corresponde a vetas hidrotermales, hospedadas en rocas de composición andesíticas de edad Cretácico superior-Terciario inferior (Perez, 1985).

De la misma forma que en el sistema Nacozari, los depósitos minerales se localizan hacia el borde de la estructura circular, los cuales corresponden a una edad Terciario

41

en rocas del Paleozoico como zonas de reemplazamiento en una secuencia conformada por calizas, cuarcitas, y lutitas (Perez, 1985). Se encuentran afectados hacia el norte por lineamientos regionales con dirección NE - SW. La mina El Tigre cuya mineralización es Au-Ag (Pb-Cu), se localiza dentro de una pequeña estructura circular al oeste del poblado de Bavispe, y es intersectada por un lineamiento regional con dirección este-oeste. La mineralización se presenta a lo largo de fallas con pequeñas zonas de diseminación a sus costados, y cortan al paquete de rocas riolíticas, ignimbríticas y andesíticas de edad del Terciario superior, Perez, 1985. (ver Lamina 5 y Tabla No. 1).

Las diferentes estructuras circulares y lineamientos relacionados en este sistema Nacozari parecen corresponder a una tectónica que afectó a rocas de edad Paleozoico como lo es en el caso del yacimiento de la mina Pilares de Teras, así como a rocas más recientes de edad Mioceno-Plioceno que hospedan depósitos minerales típicos epitermales como es el caso de El Tigre en la parte NE del sistema. Sin embargo, la mineralización tipo Pórfido de Cobre con sistemas de brechas relacionados, las cuales coinciden con el borde de algunas estructuras circulares podrían dar una edad mínima de formación de estas estructuras, las cuales pudieron haberse iniciado desde el Terciario temprano, dando un tiempo de formación desde el final del Cretácico al Terciario medio.

8. El sistema "El Carmen" se localiza al oeste del sistema Nacozari, al noreste de la población de Arizpe (Lamina 5 y 6). Este sistema incluye una estructura circular un diámetro de 35 kilómetros aproximadamente, con una estructura circular de menor dimensión en su parte interna con un diámetro de 5 kilómetros. Este sistema ha sido afectado por lineamientos con dirección N-S. Algunas minas se encuentran localizadas en los bordes de la estructura circular con mineralización de Au-Ag (Pb-Cu), como es el caso de la mina Las Chispas, la cual corresponde a vetas hidrotermales, hospedadas en rocas de composición andesíticas de edad Cretácico superior-Terciario inferior (Perez, 1985).

De la misma forma que en el sistema Nacozari, los depósitos minerales se localizan hacia el borde de la estructura circular, los cuales corresponden a una edad Terciario

temprano, por lo tanto, la edad mínima de formación para esta estructura circular podría haber empezado a principios del Terciario, ya que esta estructura circular afecta a rocas tanto de edad Jurásica como de edad Cretácico superior-Terciario inferior .

En la región centro del área de estudio existen varias estructuras circulares sencillas (ver Lamina 2), nombradas de norte a sur respectivamente los siguientes sistemas: **9.** “Hornito”, **10.** “La Cieneguita”, **11.** “La Tinaja”, **12.** “El Comedero”, **13.** “La Igualama”, **14.** “Los Teranes”, **15.** “Crestón” y **16.** “El Cobre”, forman cadenas de estructuras circulares independientes no mineralizadas, con diámetros menores que varían entre los 6 y 7 Kilómetros, presentan una tendencia hacia el norte y se extienden desde la presa Plutarco Elías Calles hasta Moctezuma, y se encuentran afectadas por lineamientos N- S, NE -SW y NW - SE. (Tabla No. 1).

Los sistemas **17.** “La Madera”, **18.** “Montecristo”, **19.** “Los Pavos”, **20.** “Santa Rosa”, **21.** “La Lechuguilla” y **22.** “El Chiltepin” forman un segundo tren de estructuras circulares sencillas no mineralizadas (ver Lámina 2), estos sistemas están localizados en la porción sureste del área de estudio, se encuentran orientadas al NW, y presentan diámetros entre 10 y 27 kilómetros aproximadamente. Estos sistemas se encuentran afectados por lineamientos con una dirección preferencial hacia el NW, sólo se han reportado mineralizaciones en algunas de estas estructuras circulares, pero no se tiene más información acerca de ellas. Tabla No. 1.

23. El sistema “El Pinito” se localiza en la Sierra del mismo nombre, al oeste de la Ciudad de Cananea (ver Lamina 6), se trata de una estructura circular sencilla truncada por lineamientos NW-SE principalmente, su diámetro es aproximadamente de 7.5 kilómetros, en esta estructura circular se presentan varias mineralizaciones de las cuales no se tiene información. Tabla No. 1.

24. La “Estrella” es otro sistema importante, se encuentra localizado al noreste de la población de Cucurpe (ver lámina 6), y tiene un diámetro de 12.5 kilómetros

aproximadamente. Se trata de una estructura circular afectada por lineamientos E-W principalmente así como NE-SW y N-S. En esta área existen varios yacimientos con mineralizaciones de Au-Ag (Pb-Cu) en vetas, localizados en el la parte central de la estructura circular. El tipo de yacimiento corresponde a vetas hidrotermales, algunos de ellos son importantes económicamente y se encuentran incluidos dentro de rocas andesíticas de edad Cretácico superior-Terciario inferior (Perez, 1985).

Como se puede observar en la Lamina 6, la mayoría de los yacimientos minerales se encuentran en la parte central de la estructura, estos yacimientos estan relacionados a estructuras en vetas. Por otra parte, tomando en cuenta la relación que existe entre las edades de las mineralizaciones, y de la roca hospedante, se puede determinar que la edad mínima de formación para esta estructura circular sería del Terciario temprano, ya que dicha estructura afecta a rocas tanto de edad Jurasico como de edad Cretácico superior-Terciario inferior, dado que la edad de la mineralización es Terciario temprano.

25. El sistema "Cucurpe" se localiza en la Sierra Cucurpe al oeste del poblado del mismo nombre (ver Lámina 6), se encuentra conformado por tres estructuras circulares entrelazadas cuyos diámetros varían desde 3.5 a 12 kilómetros. Los lineamientos que lo interceptan tienen una dirección N-S principalmente. No se tiene reportada alguna mineralización en esta área. Tabla No. 1.

26. El sistema "Opodepe" se localiza al sur del sistema "La Estrella" (ver Laminas 1 y 6), en los cerros de Los Changos, El Cobre y La Raja, consta de tres estructuras circulares, una de ellas tiene un diámetro de 22.7 kilómetros y dos estructuras pequeñas en su borde de aproximadamente 4 kilómetros de diámetro, se encuentran afectadas por lineamientos NE-SW, en este sistema no se reporta mineralización. (Tabla No. 1.)

Hacia el este de la cabecera municipal de Opodepe se localizan varios sistemas de estructuras circulares entrelazadas (ver Lamina 1), las cuales son: **27.** "El Borrego", **28.** "Aconchi", **29.** "La Cobriza", **30.** "La Mesa de Jituche" y **31.** "El Sunibiate". Donde las

estructuras de mayor dimensión son los sistemas “El Borrego”, “Aconchi” y “La Cobriza” con diámetros de 12.5, 11.0 y 6.2 kilómetros respectivamente. Además se encuentran afectados por lineamientos NE-SW y NW-SE; de todos estos sistemas sólo tres de ellos presentan mineralización, por ejemplo el sistema Aconchi, presenta mineralizaciones tipo skarn localizados en los bordes de la estructura circular, con mineralizaciones de (Pb-Zn-Cu) en la mina Los Locos y de W en la mina Lorena, ambos yacimientos se encuentran alojados en rocas graníticas de edad Cretácico superior-Terciario inferior. Por otra parte el sistema La cobriza presenta yacimientos minerales de contacto, distribuido en el centro de la estructura circular, como es el caso de la mina Santa Rosa con mineralizaciones de Pb-Zn-Cu, hospedada en rocas riolíticas de edad posiblemente Cretácico superior-Terciario inferior. Y por último el sistema Mesa de Jituche, presenta yacimientos minerales tipo skarn, distribuidos en el borde de la estructura circular, los cuales corresponden a las minas Santo Niño, San Antonio, Contrabando y Santa Elena, con mineralizaciones de W hospedadas en rocas graníticas de edad Cretácico superior-Terciario inferior Perez, 1985. Ver Tabla No. 1.

En estos sistemas la mayoría de las mineralizaciones se localizan preferencialmente hacia los bordes de las estructuras circulares, siendo este caso para los sistemas Aconchi y Mesa de Jituche, mientras que en el sistema La Cobriza la mineralización se localiza en el centro de dicha estructura circular, los yacimientos minerales son tipo skarn y en vetas con mineralizaciones de W y (Pb-Zn-Cu) de edad Terciario temprano, la edad de la roca hospedante es Cretácico superior-Terciario inferior. Esto hace suponer que el origen de dichas estructuras esten relacionadas a los cuerpos intrusivos, ya que la mineralización se encuentra principalmente en los bordes de las estructuras, por lo tanto es posible que la edad mínima de formación para estas estructuras en cuestión haya empezado a principios del Terciario.

El sistema “Cerro de Oro” esta localizado en el municipio de Rayón (ver Lamina 1), es un sistema formado por dos estructuras circulares enlazadas a las que corta el Río San Miguel de Horcasitas en la parte sur, sus diámetros son de 8.7 y 12.5 kilómetros, se encuentra

intersectada por lineamientos en varias direcciones siendo los más frecuentes los NE-SW. La mineralización que presenta es de Au-Cu, Fe-Au y Zn-Cu-Fe en skarn en la mina Cerro de Oro localizada en la parte central de las estructuras circulares, así como, mineralización de Ag (Pb, Zn, Cu) en la mina Maranatha ubicada hacia la periferia de la estructura mayor al noroeste del ejido La Palma, dicha mineralización se encuentra distribuida en vetas. La roca hospedante en ambos tipos de depósitos está representado por calizas, cuarcitas, lutitas y pedernal de edad Paleozoico. (Perez, 1985). Ver Tabla No. 1.

En el área de Cerro de Oro, la mineralización es muy variada y se presenta en varios tipos de rocas, formando yacimientos minerales de diferentes tipos, destacando tres tipos de cuerpos: Mantos de sulfuros de forma lenticular, los cuales se consideran cuerpos de reemplazamiento metasomático en Skarn. Mantos con mineralización de oro de alta ley en skarn oxidados con sílice, con valores de cobre y en menor escala Pb-Zn y Ag. Existen brechas hidrotermales y vetillas con avanzada oxidación en las rocas volcánicas con mineralización de Au-Cu de alta ley en bolsadas, y oro libre diseminado asociado a óxidos de hierro (C. R. M. del Edo. de Son. 1992). (ver Lamina 1). Tomando en cuenta la relación que existe entre las edades de las rocas hospedantes y las edades de las mineralizaciones en ambos depósitos, se puede decir que el tiempo de formación mínima para estas estructuras circulares pudiera haberse iniciado desde el Terciario temprano, ya que estas estructuras circulares afectan tanto a rocas de edad Paleozoico como es el caso de la mina Maranatha la cual se localiza en el borde de la estructura circular, y a rocas de edad Cretácico superior-Terciario inferior del área de Cerro de Oro, en este caso dicha mina se encuentra en el centro de la estructura circular, y ambos presentan mineralizaciones de edad Terciario temprano.

33. El sistema "Los Diques" se localiza al sur del sistema anterior, al este del poblado Fábrica de los Ángeles (ver Lamina 1). Se trata de una estructura circular con un diámetro de 12.5 kilómetros, aproximadamente, la cual posee dos estructuras más entrelazadas en su borde, estas dos estructuras tienen diámetros de 6.5 kilómetros aproximadamente. Lo cruza un lineamiento principal con dirección N-S, así como NE-SW. Se reporta mineralización en

la parte central de la estructura circular mayor, se trata de la mina Campodónico la cual presenta mineralización de Fe dispuestos en mantos más o menos concordantes con la estratificación, el tipo de yacimiento es en Skarn hospedado en rocas calizas, cuarcitas, lutitas y pedernal del Paleozoico (Perez,1985). También se reporta mineralización en el borde de la estructura inferior que tiene un diámetro de 6.5 kilómetros aproximadamente, se encuentra al norte de El Gavilán por la carretera Hermosillo-Ures. La mina se llama Santo Niño y presenta mineralizaciones de Ag (Pb, Zn, Cu) en vetas. El tipo de yacimiento es en filones hidrotermales hospedado en rocas graníticas del Cretácico superior-Terciario inferior (Perez, 1985, ver Tabla No. 1).

Este caso es muy similar a los anteriores, ya que la relación que existe entre rocas hospedantes y mineralizaciones son las mismas. Estas estructuras circulares parecen corresponder a una tectónica que afecto tanto a rocas de edad Paleozoica (mina Campodónico) como a rocas de edad Cretácico superior-Terciario inferior (mina Santo Niño); y ambas se encuentran en los bordes de dichas estructuras, por lo tanto estas relaciones nos podrían dar una edad mínima de formación desde el Terciario temprano para las estructuras circulares.

34. El Sistema "Las Palomas" se localiza al noreste del poblado de Aconchi en la sierra Las Palomas (ver Lamina 1). Es una estructura circular sencilla, tiene un diámetro aproximado de 11.5 kilómetros, y la intersectan varios lineamientos de carácter regional orientados N-S, E-W y NE-SW, siendo los más abundantes los últimos. Hacia el sur y en los bordes de la estructura se localiza la mina Washington con mineralización de W, con leyes de Cu: 1.6 %, Mo: 0.11 % y WO₃: 0.14 % C. R. M. del Edo de Son. , 1992. La brecha Washington presenta mineralización de W en zonas de stockworks y disseminaciones en brechas y vetas a lo largo de fallas o fracturas. El tipo de yacimiento esta relacionado a un sistema de Pórfidos Cupríferos en brechas, y se encuentra emplazado en rocas volcánicas andesíticas de edad Cretácico superior-Terciario inferior (Perez, 1985). La mineralización esta ligada genéticamente a intrusiones del tipo granodiorítico, se presentan como stocks, representada por pirita, calcopirita, molibdenita, bornita, galena, esfalerita, hematita,



scheelita, etc.. Estas estructuras están relacionadas con la evolución magmática e hidrotermal de las intrusiones, durante las cuales se produjeron conductos por donde los fluidos mineralizantes circularon y depositaron sus contenidos metálicos, (C. R. M. del Edo. de Sonora, 1992).

En este sistema la estructura circular parece afectar a las rocas andesíticas de edad Cretácico superior-Terciario inferior presentes en el área, las cuales hospedan a los yacimientos minerales tipo Pórfido de Cobre localizados hacia los bordes de dicha estructura y los cuales corresponden a una edad del Terciario temprano. Tomando en cuenta las relaciones genéticas tanto de la mineralización como del ambiente geológico en que se hospedan, se puede concluir que la edad mínima de formación de la estructura circular es de edad Terciario temprano y que el origen de la mineralización y de la estructura circular esta relacionada a cuerpos intrusivos.

35. El Sistema “La Bolsa” se localiza al norte del Estado de Sonora en la frontera con Estados Unidos de América (ver Lamina 8), esta compuesto por una parte de una estructura circular, con un radio aproximado de 16.5 kilómetros, los lineamientos que la afectan tienen una dirección NE-SW y SW-NE, no presenta evidencia de mineralización.

36. El sistema “La Cabellera”, se localiza al norte del Estado de Sonora, hacia el Sureste del sistema anterior (ver Lamina 4), compuesto por dos estructuras circulares dispuestas una dentro de otra, la más pequeña tiene un diámetro de 9.25 kilómetros, se encuentra intersectada por lineamientos NE-SW, y localizada en la Sierra Pan Duro, mientras que la otra estructura circular sólo es un fragmento que abarca a las Sierras Pitaycachi y La Cabellera ubicadas al noreste de La Colonia Morelos, se encuentra afectada por lineamientos con dirección NE-SW, no se reporta mineralización .

37. El Sistema "El caballo" se localiza al sureste de la Sierra El Manzanal (ver Lamina 6), esta compuesta por una pequeña estructura circular con un diámetro de 2.5 kilómetros, aparentemente no la afecta ningún lineamiento y no presenta mineralización evidente.

38. El Sistema "El Picacho", se localiza al este del poblado de Bacanuchi (ver Lamina 6), se trata de una estructura circular sencilla con un diámetro de 5 kilómetros, no se aprecia ningún lineamiento que la afecte, además no se reporta mineralización en el área.

39. El Sistema "El Cacaxtle" sigue una tendencia de estructuras circulares sencillas y pequeñas, esta localizado al norte de la Sierra San Antonio, ubicada en el cerro del mismo nombre (ver Lamina 6), tiene un diámetro de 2 kilómetros y lo intersectan lineamientos NE-SW y NW-SE, no reporta mineralización en el área.

40. El Sistema "El Apache" esta localizado en el límite estatal de Sonora-Chihuahua, al Este del área de estudio, en el Municipio de Huachinera (ver Laminas 3 y 4). Se trata de una estructura elíptica con un diámetro de 20.75 kilómetros aproximadamente, se encuentra intersectada por lineamientos norte-sur y este-oeste, y además no se reporta mineralización. Tabla No. 1.

41. El Sistema "El Chinal" esta localizado al este del poblado de Cumpas ubicado en la Sierra La Madera (ver Lamina 5), se compone por una estructura circular sencilla con un diámetro de 12.5 kilómetros aproximadamente, lo intersectan lineamientos NE-SW y NW-SE, y no se reporta mineralización en el área. Tabla No. 1.

42. El Sistema "La Vinorama" esta localizado al oeste del poblado de Opodepe (ver Lamina 1), consta de dos estructuras circulares independientes, las cuales tienen diámetros de 2.5 y 9.5 kilómetros aproximadamente; ambas estructuras se encuentran afectadas por lineamientos NW-SE y en menor proporción por lineamientos con dirección NE-SW. La estructura mayor presenta evidencias de mineralización localizadas hacia los bordes de la estructura, entre las minas se encuentra El Crestón con mineralización de molibdeno, en

este depósito la mineralización más importante corresponde a molibdeno y cobre. El molibdeno ocurre generalmente en vetillas de cuarzo y molibdenita en forma de Stockworks emplazados principalmente en el intrusivo granítico metamórfico y en el primer tipo de brechas mencionado. El cobre de grado económico ocurre en zonas irregulares de enriquecimiento supergénico asociadas principalmente a la diorítica porfídica del Cretácico superior-Terciario inferior. El yacimiento de El Crestón ha sido clasificado como un Pórfido de cobre-molibdeno, con leyes bajas pero con gran tonelaje (C. R. M. del Edo. de Son, 1992).

La estructura circular y los lineamientos relacionados en el sistema La Vinorama parecen estar relacionados a una tectónica que afectó tanto a rocas Precámbricas como a rocas de edad Laramidica, las cuales hospedan yacimientos minerales tipo Pórfido de Cobre con mineralizaciones de molibdeno como es el caso de El Crestón, el cual se encuentra localizado hacia el borde de la estructura circular y la edad de la mineralización es de 53.5 ± 1 Ma. Por lo cual se puede decir que la edad mínima de formación para esta estructura podría ser del Terciario temprano - medio.

43. El Sistema "Pueblo Nuevo" está localizado al suroeste del área de estudio, en el Municipio de San Miguel de Horcasitas ubicado entre los ejidos de Pueblo Nuevo, Torreón, Codórachi y Cerro Pelón (ver Lamina 1). Se trata de una estructura circular sencilla pero bien definida con un diámetro de 6.25 kilómetros aproximadamente, lo afectan lineamientos con direcciones NE-SW y N-S, no se reporta mineralización en el área de la estructura.

44. El sistema "El Apuchis" está localizado al noreste de Sahuaripa (ver Lamina 2), representada por una parte de la estructura circular, se encuentra afectada por lineamientos tanto NW-SE como NE-SW, no se reporta alguna mineralización. Tabla No. 1.

45. El Sistema "El Novillo" está localizado al oeste del poblado de Nácori Chico (ver Lamina 2), es una estructura semicircular, su diámetro es de 15 kilómetros

aproximadamente, se encuentra truncada por lineamientos muy regionales con direcciones NW-SE y N-S., no se reporta mineralización alguna. Tabla No. 1.

46. El Sistema "San Antonio" esta localizado en la sierra del mismo nombre al noroeste de Arizpe (ver Lamina 6), esta representado por una estructura semicircular, este sistema se encuentra delimitado por lineamientos con direcciones NW-SE y N-S, se reporta mineralización localizada hacia los bordes de la estructura.. En esta estructura se localizan las minas Santa Rosalía y Klondike, cuya mineralización es de Au-Ag (Pb-Cu), el tipo de yacimiento es en filones hidrotermales en general dispuestos en vetas y alojados en andesitas, granitos y granitoides de edad Cretácico superior-Terciario inferior (Perez, 1985). Tabla No. 1.

Como se puede observar en la Lamina 6, los yacimientos minerales se localizan hacia los bordes de la estructura circular, como es el caso de las minas Santa Rosalía y Klondike, las cuales tienen mineralizaciones de Au-Ag(Pb,Cu) dispuestos en estructuras de vetas de edad Terciario temprano hospedados en rocas graníticas y andesíticas de edad Cretácico superior-Terciario inferior, por lo cual la edad mínima de formación para la estructura circular podría ser Terciario temprano.

47. El Sistema "El Saucito" esta localizado al este del poblado de Querobabi (ver Laminas 1 y 6). Forma parte de un "enjambre" de lineamientos y estructuras circulares comprendido entre los sistemas "Opodepe", "La Vinorama" y "El Borrego", dicho sistema se compone por dos estructuras circulares, unidas en el borde. Los diámetros de las estructuras son de 19.5 y 5 kilómetros aproximadamente, se encuentran afectadas por varios lineamientos con direcciones NW-SE y NE-SW, se reporta mineralización localizada en el borde sur de la estructura circular mayor, nombrada La Última con mineralización de Au-Cu, el tipo de yacimiento es en filones hidrotermales asociados a vetas, la mineralización se encuentra alojada en granitos y granitoides de edad Cretácico superior-Terciario inferior (Perez, 1985). Tabla No. 1.

En este sistema la mineralización en vetas de Au-Cu de edad Terciario temprano, se encuentra localizada hacia el borde de la estructura circular como es el caso de la mina La Última, la cual se encuentra hospedada en rocas graníticas de edad Cretácico superior-Terciario inferior. Tomando en cuenta las relaciones existentes entre las edades del yacimiento y de las rocas hospedantes, nos podrían dar una edad mínima de formación para esta estructura, la cual pudiera haberse iniciado desde el Terciario temprano.

48. El Sistema "La Compuerta" esta localizado al noreste del poblado de Baviacora (ver Lamina 1), esta compuesto por una estructura circular con un diámetro de 10 kilómetros aproximadamente, y se encuentra intersectada por lineamientos NW-SE, en dicho sistema no se reporta mineralización alguna. Tabla No. 1.

49. El Sistema "La Pinta" se localiza al noreste del poblado de Mazocahui, en la Sierra del mismo nombre (ver Lamina 1), se compone de dos estructuras circulares independientes con diámetros de 2.5 y 6 kilómetros aproximadamente, la estructura mayor esta afectada por lineamientos muy regionales con dirección NE-SW; se reporta mineralización en la parte central y en el borde de dicha estructura. En la parte central de la estructura se tiene a la mina La Palma con mineralización de Pb-Zn-Cu, y en el borde se encuentra la mina Mina del Agua con mineralización de Ag (Pb, Zn, Cu). Ambas minas tienen el mismo tipo de yacimiento el cual es en general filones hidrotermales dispuestos en vetas, la roca hospedante esta representado por granitos y granitoides de edad Cretácico superior-Terciario inferior (Perez, 1985). Tabla No. 1.

La estructura circular y lineamientos relacionados a este sistema parecen afectar a rocas graníticas de edad Cretácico superior-Terciario inferior, las cuales hospedan yacimientos minerales epitermales de edad Terciario Temprano, como es el caso de las minas La Palma y Mina del Agua. Los yacimientos minerales se encuentran localizados en el centro y borde de la estructura circular, los cuales podrían dar una edad mínima de formación de estas estructuras circulares que pudieron haberse iniciado desde el Terciario temprano.



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA

BIBLIOTECA
DE CIENCIAS EXACTAS
Y NATURALES

50. El Sistema "Puerta del Sol" esta localizado al noreste del poblado de Ures (ver Lamina 1), es una estructura sencilla, bien definida con un diámetro de 5.7 kilómetros aproximadamente, aparentemente no lo intersecta ningún lineamiento y en dicho sistema no se reporta mineralización. Tabla No. 1.

51. El Sistema "La Noria" esta localizado al sur del poblado de Mazocahui (ver Lamina 1), se trata de una estructura circular sencilla, la cual tiene un diámetro de 5 kilómetros aproximadamente, se encuentra intersectada por varios lineamientos en distintas direcciones como NW-SE, NE-SW y N-S. En este sistema no se reporta ninguna mineralización. Tabla No. 1.

52. El sistema "El Quemado" esta localizado al norte de la Sierra El Pajarito (ver Lamina 1), se trata de dos estructuras circulares unidas en el borde, los diámetros que tienen son de 5 y 3.7 kilómetros aproximadamente, los lineamientos que lo intersectan son en dirección NE-SW y NW- SE, y no se reporta mineralización alguna.

ÁREAS PROSPECTIVAS

Las áreas prospectivas comprendidas en el área de estudio se identificaron con base al análisis geomorfológico, geológico y metalogenético. Las estructuras circulares y lineamientos estructurales podrían ser lugares propicios para el desarrollo de depósitos minerales y áreas de potenciales para ser exploradas.

Como ya se ha mencionado, estas estructuras circulares ó lineamientos no siempre contienen mineralización, pero si son áreas favorables y por lo tanto se deben seleccionar aquellas que se encuentren mejor preparadas estructuralmente y que contengan evidencias de actividad hidrotermal, lo cual ayudará a tener una mejor idea de lo que se espera encontrar en dicha estructura en cuanto a mineralización.

- a)** Una de las áreas favorables para la prospección minera se encuentra hacia el este del Estado de Sonora en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental, se trata de la zona comprendida entre los sistemas Hachita hueca y La Cabellera (ver Lamina 4). Esta zona es propicia para explorar yacimientos Epitermales dado que se encuentra un intenso patrón de lineamientos con direcciones NE-SW y NW-SE intersectados con dos grandes estructuras tectónicas circulares.
- b)** El sistema San Luis (ver Lamina 9), es una área favorable para explorar yacimientos epitermales, ya que se encuentra en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental y además el ambiente geológico es propicio para que se formen dichos yacimientos, aunado a esto existe una zona de debilidad estructural conformada por tres estructuras tectónicas circulares, donde dos de ellas son concéntricas y se encuentran intersectadas por varios lineamientos con dirección NE-SW. Las áreas más propicias que pueden contener mineralización son aquellas donde se intersectan las estructuras lineales y circulares.
- c)** El sistema El Durazno localizado al NW del sistema Cananea (ver Lamina 7), podría considerarse área de interés para exploración de yacimientos tipo Pórfido Cuprífero, ya que, se trata de un sistema formado por la unión de dos estructuras circulares intersectadas por lineamientos regionales NW-SE y E-W, con un ambiente geológico representado por granitos y granitoides de edad Laramídica, (ver mapa geológico).
- d)** En el área comprendida entre Magdalena de Kino y Sierra Azul, localizada al NW del área de estudio (ver Lamina 6), existe una área de debilidad estructural afectada por varios lineamientos con dirección NW-SE y NE-SW, la cual sería favorable para explorar yacimientos en estructuras vetiformes.
- e)** El sistema Nacozari (ver Lamina 5), es muy favorable para explorar yacimientos tipo Pórfido Cuprífero ya que se conforma por numerosas estructuras tectónicas circulares de diversos tamaños así como por diversos patrones de lineamientos con direcciones NE-

SW y NW-SE, siendo las áreas más favorables para la mineralización aquellas que se encuentren en las intersecciones de los lineamientos y estructuras tectónicas circulares.

f) Otra área importante para exploración de yacimientos tipo Pórfidos Cupríferos es la zona que se encuentra hacia el oeste del Sistema Nacozari (ver Lamina 5). Esta área se caracteriza por ser una franja orientada hacia el NW, donde se localizan yacimientos tipo Pórfidos de cobre-molibdeno alineados, donde aparentemente la estructura circular del sistema Nacozari no afecta a la franja antes mencionada, sólo se observan varios lineamientos con dirección NE-SW que se intersectan.

g) La región del sistema La Estrella (ver Lamina 6), es una área favorable para explorar yacimientos epitermales, ya que se encuentran varias mineralizaciones de Au, Ag, Pb y Cu en vetas y numerosos lineamientos orientados al NE intersectados con la estructura circular del sistema La Estrella, se localiza al Norte del poblado de Cucurpe.

h) Esta área se localiza entre los sistemas El Borrego, Cerro de Oro y La Vinorama (ver Lamina 1), es una área favorable para explorar yacimientos epitermales, ya que existe un ambiente geológico característico para la formación de dicho yacimiento (ver mapa geológico) y además se encuentra estructuralmente preparada para ello ya que se observan numerosos lineamientos que se intersectan con direcciones NW-SE y NE-SW.

i) El sistema Aconchi se localiza al oeste del poblado de Aconchi (ver Lamina 1), se trata de una estructura tectónica circular afectada por numerosos lineamientos con direcciones NE-SW y NW-SE. El tipo de yacimiento que convendría explorar serían los tipo skarn, ya que existen afloramientos de calizas en el área y además existen zonas mineralizadas que han sido exploradas y su localización concuerda con los bordes de la estructura tectónica circular.

j) El sistema Las Palomas se localiza al este de Huépac (ver Lamina 1 y 2), la cual esta formada por una estructura tectónica circular intersectada por múltiples lineamientos

orientados NE-SW y N-S. Combinando esta área preparada estructuralmente con el ambiente geológico (ver mapa geológico), resulta una área muy favorable para explorar yacimientos tipo Pórfidos Cupríferos dado que se tienen evidencias de mineralización de este tipo como lo son las minas Washington, Transvaal, San Judas y Cobre Rico; estas tres últimas se localizan en el borde inferior de la estructura circular que compone a dicho sistema.

k) El área denominada "k" se localiza al suroeste del poblado de Baviacora (ver Lamina 1), es favorable para explorar yacimientos tipo skarn. Se trata de una área compuesta por dos sistemas los cuales son: Mesa de Jituche y El Sunibiate, intersectadas por varios lineamientos regionales con dirección NE-SW, NW-SE y E-W. Considerando que esta área se encuentra estructuralmente preparada y en un ambiente geológico propicio para que existan dichos yacimientos ya que al noreste de esta área existen varios afloramientos de calizas.

l) En esta área se encuentran los sistemas La Compuerta y La Pinta localizados al sureste del poblado de Baviacora (ver Lamina 1 y 2), estos sistemas son los responsables de preparar estructuralmente el terreno, se trata de dos estructuras circulares intersectadas por lineamientos orientados E-W principalmente y por NE-SW. Los yacimientos que se pueden explorar son los tipo epitermales de metales base, el ambiente geológico es apto para ello y además se han reportado mineralizaciones de este tipo en el sistema La Pinta.

m) Esta área se localiza al este de la población de Mazocahui (ver Lamina 2), es favorable para explorar yacimientos en vetas, porque existe una área preparada estructuralmente por dos sistemas La Tinaja y El Comedero. El ambiente geológico es adecuado, (ver mapa geológico), el cual está representado por rocas volcánicas de edad Terciario. Aunque estas estructuras tectónicas circulares no son muy grandes, existe un intenso patrón de lineamientos con varias direcciones, por lo que serían las áreas favorables aquellas que se localicen en las intersecciones de las estructuras lineales y circulares.

n) El área “n” se encuentra al este de la población de Ures (ver Lamina 1), esta intensamente afectada por lineamientos N-S y NE-SW principalmente así como por varias estructuras tectónicas circulares representadas por los sistemas San Juan, El Borrego, La Noria, y El Quemado (ver Lamina 1). Tomando en cuenta a las estructuras lineales, circulares, litología y minas existentes que poseen las mismas características, se concluye que esta área es favorable para la exploración de yacimientos en vetas de metales base.

o) El sistema Montecristo se localiza al este del poblado de Divisaderos (ver Lamina 2), es una área favorable para explorar yacimientos tipo epitermales, se tiene un terreno preparado estructuralmente y un ambiente geológico adecuado conformado por rocas andesíticas, tobas y riolitas de edad Cretácico (ver mapa geológico), y además se encuentra dentro de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental. Las áreas más favorables se localizan en las uniones o intersecciones de las estructuras tectónicas circulares.

p) Esta área se localiza en la parte sureste del área de estudio (ver Lamina 3), el ambiente geológico es volcánico, representado principalmente por andesitas, tobas, riolitas de edad Cretácico y se encuentra en la provincia de la Sierra Madre Occidental. Las estructuras que se presentan son lineales con direcciones NE-SW y NW-SE, así como una sección de la estructura tectónica circular del sistema Santa Rosa. Los yacimientos a explorar son los tipo epitermales, y las áreas más favorables son aquellas donde se intersectan las estructuras.

q) Al este del poblado de Sahuaripa (ver Lamina 3), se localiza una área favorable para explorar yacimientos tipo epitermales, se trata de una “zona” preparada estructuralmente por la intersección de varios lineamientos en distintas direcciones así como la presencia de tres sistemas Santa Rosa, La Lechuguilla y Apuchis. Existe evidencias de minas en el área localizadas en el borde del sistema Santa Rosa, pero no se tiene mayor información a cerca de ellas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La geomorfológica estructural del área se hizo con base en la interpretación de los siguientes mapas: espaciomapas, topográficos, hipsométrico, imagenes en gris (GEMA), lineamientos escala 1: 250,000 y geológico escala 1: 500,000.
2. Se ha visto que la geomorfología estructural es una herramienta importante en la prospección de yacimientos minerales, ya que su técnica permite observar ciertos rasgos geomorfológicos ideales donde ocurren dichos yacimientos.
3. Se localizaron y analizaron la mayoría de las estructuras tectónicas circulares identificadas y se asociaron a mineralizaciones existentes, donde se observó que la mayoría de las estructuras tectónicas circulares presentaban dicha mineralización en los bordes, y además mostraban ciertas características que las diferenciaban, las cuales se agruparon en dos franjas: Sierra Madre Occidental y Arco Continental..
4. De los 52 sistemas identificados en el área de estudio, compuestos por estructuras tectónicas circulares y/o lineamientos, sólo 13, presentan mineralizaciones dominantes en los bordes de las estructuras circulares, siendo los tipos de yacimientos predominantes skarns, Vetas y Pórfidos Cupríferos.
5. En general las edades de las mineralizaciones corresponden al Terciario temprano hospedados en un ambiente geológico de edad Cretácico superior-Terciario inferior, Perez, (1988).
6. El método o técnica de la geomorfología estructural utilizado en este trabajo, es de gran ayuda e importancia para seleccionar áreas favorables de gran potencial minero, así como, el orientar futuros trabajos de mayor detalle en las áreas mencionadas.

7. Existen áreas preparadas estructuralmente, lo cual no implica que todas sean favorables para la mineralización.
8. Relacionar las morfoestructuras con el desarrollo geológico-tectónico de la costa oeste de México, que permita el entendimiento del origen de los yacimientos.
9. Debido a la escala que se maneja, es importante cerciorarse de las morfoestructuras principales, ya que estas pueden ser muy variadas, por ejemplo un lineamiento puede ser el reflejo de: fallas, fracturas, diaclasas, ejes de pliegues, diques, parteaguas, contactos geológicos, etc. Al igual que en los lineamientos, se debe hacer un estudio detallado de las estructuras tectónicas circulares para identificar su origen y cerciorarse de que en realidad sean estructuras tectónicas circulares y así descartar aquellas que no sean producto de una actividad magmática.
10. Tener una localización exacta de todas las mineralizaciones existentes en el área de estudio, definir el tipo de yacimiento, control estructural, y la relación genética que existe entre las estructuras tectónicas circulares y los yacimientos.
11. Hacer un estudio más detallado de las estructuras tectónicas circulares y verificar si pertenecen a una caldera, y de ser así identificar la fase de evolución en que se encuentra.
12. Las áreas descritas como favorables son en realidad muy extensas, se recomienda hacer un estudio preliminar a una escala más grande para confirmar o desechar el área prospectiva.
13. En las áreas de mayor interes, definir aquellas que son prospectivas de las estructuras tectónicas circulares identificadas
14. De resultar el área prospectiva como "favorable" para la mineralización, se recomienda hacer un estudio geologico más detallado de campo en dicha área.



APÉNDICE

SIMBOLOGÍA DE LAS UNIDADES

CENOZOICO

CUATERNARIO

Qa.- Sedimentos depositados exclusivamente en los cauces de ríos y arroyos.

Q.- Sedimentos superficiales en valles, laderas y planicies ubicados en la porción oeste del estado de Sonora, contienen gravas, arenas, limos y arcillas.

Qv.- Se encuentra representado por Basaltos, Andesitas y brechas volcánicas básicas localizados en la región de Moctezuma.

CUATERNARIO- TERCIARIO

Qt.- Sedimentos poco consolidados, gravas, arenas, limos.

Qt'.- Sedimentos no consolidados, de granulometría más fina (gravas, arenas, limos y arcillas).

TERCIARIO- NEOGENO

Tn.- Unidad constituida por conglomerados, areniscas, lutitas y escasos sedimentos con calizas lacustres. Además la conforman rocas sedimentarias poco consolidadas con ocasionales intercalaciones de andesitas y basaltos en algunas localidades, también se incluye dentro de esta unidad la Formación Báucarit.

Tnv.- Formada por basaltos, brechas volcánicas básicas, tobas riolíticas, andesitas, riolitas y dacitas.

MIOCENO

Tmv.- Unidad formada por basaltos, andesitas, riolitas, aglomerados y tobas.

OLIGOCENO

Tov.- Unidad formada por riolitas, andesitas, basaltos, dacitas, tobas e ignimbritas; es la unidad con mayor cobertura del estado de Sonora correspondiente a la Sierra Madre Occidental.

TERCIARIO PALEOGENO

Tpv.- Se conforma por andesitas, riolitas, basaltos y rocas piroclásticas ácidas.

Tps.- Representado por conglomerados, areniscas y lutitas.

TERCIARIO Indiferenciado

Tv.- Se encuentra representado por andesitas, riolitas, basaltos, tobas ácidas y otras rocas piroclásticas.

TM.- Unidad formada por milonitas, cataclasitas y esquistos.

CRETACICO-TERCIARIO

KTi.- Esta unidad correspondiente al Cretácico-Terciario, se conforma por granito, granodiorita, pórfidos y dioritas. Incluye a la Granodiorita Cuitaca, Batolito de Aconchi, etc. con edades de $(64 \pm 3$ m. a. para la G. Cuitaca y de 53.1 ± 1.7 m. a. para el Batolito de Aconchi).

KTv.- Conformado por andesitas, riolitas y tobas.

MESOZOICO

CRETACICO- SUPERIOR

Ks.- Se representa por areniscas, lutitas, limolitas, conglomerados, caliza. Incluye al Grupo Cabullona.

Ksv.- Formado por andesitas y riolitas.

CRETACICO INFERIOR

Ki.- Son areniscas, limolitas, calizas, lutitas. Incluye al Grupo Bisbee y cronocorrelativas.

CRETACICO Indiferenciado

Kv.- Riolitas, andesitas y tobas.

JURÁSICO SUPERIOR

Jsz.- Representado por areniscas- tobas, andesitas- lutitas y calizas.

JURÁSICO Indiferenciado

J.- Representado por lutitas, areniscas, conglomerados, lodolitas, limolitas, calizas, ortocuarcitas.

JM.- Rocas metavolcánicas, cuarcitas, mármol, gneis y esquistos.

TRIÁSICO- JURÁSICO

TrJ.- Corresponde a areniscas, conglomerados, calizas, lutitas. Incluye a la Formación Antimonio.

MESOZOICO

Mi.- Constituido por granito, granodiorita y diorita.

Mv.- Constituido por riolitas, andesitas y tobas ácidas.

PALEOZOICO

PERMICO INFERIOR

Pei.- Unidad formada por rocas sedimentarias como calizas, areniscas, lutitas, limolitas, conglomerados.

PERMICO Indiferenciado

Pe.- Se encuentra conformado por lutitas, areniscas, calizas, lodolitas.

CARBONÍFERO- PERMICO

C-Pe.- Representado por calizas, ortocuarcitas y rocas silíceas.

CARBONÍFERO

C.- Conformado por calizas, ortocuarcitas y limolitas. Incluye a la Caliza Escabrosa.

DEVONICO

D.- Conformado por calizas con pedernal. Incluye a la Caliza Martín.

ORDOVICICO INFERIOR

Oi.- Formado por calizas y limolitas.

CÁMBRICO SUPERIOR

Cs.- Formado por lutitas y calizas.

CÁMBRICO MEDIO

Cm.- Conformado por calizas, dolomías, lutitas, ortocuarcitas y conglomerados. Incluye a la Cuarcita Bolsa.

PALEOZOICO SUPERIOR

Ps.- Formado por lutitas y calizas.

PALEOZOICO Indiferenciado

Pz.- Se encuentra representado por ortocuarcitas, calizas, areniscas, conglomerados y lutitas.

PRECAMBRICO

PROTEROZOICO SUPERIOR

Prs.- Representado por dolomias, ortocuarcitas, lutitas, calizas, areniscas, conglomerados.

PROTEROZOICO MEDIO

Prmi.- Constituido por granodiorita y granito. Incluye Granito Cananea, Granito Aibó y Granito Mesteñas.

PROTEROZOICO INFERIOR

Pri.- Formado por la Granodiorita de Hornblenda.

Prim.- Representado por cuarcitas, gneiss, anfibolitas, Augen Gneis, filitas y esquistos.
Incluye a el Esquisto Pinal.

PRECAMBRICO

pCM.- Unidad constituida por cuarcitas, gneiss, esquistos y anfibolitas.

pCI.- Granitos micrográficos- porfídicos, dioritas.



TABLA NO. 1

lamina	sistema	diámetro (km.)	fase	minas (Perez, 1985)	tipo de yacimiento (Perez, 1985)	ambiente geológico (Perez, 1985)	localización de la mina	edad de rx huésped (Perez, 1985)	edad del yacimiento (Perez, 1985)
4	Hachita hueca	30	-	Hachita hueca	skarn: Fe	esquistos, volcanosed, lutitas, calizas	borde	Juras-Cret. indif.	Eoc.- Paleoc.
6	Cananea	25	III	Cananea	P. C.: Cu-Mo skarn: Pb-Zn-Cu	granitos y granitoides calizas	centro	Laramidico	67.4±3.4 59.9±2.1 Eoce. - Paleoc.
7	El Durazno	15- 10	-	-	-	-	-	-	-
9	San Luis	6- 11.2	-	-	-	-	-	-	-
7, 8	Los Ajos	19.6- 20	-	-	-	-	-	-	-
1	San Juan	7.5- 10	-	-	-	-	-	-	-

5	Nacozari	66	III	Pilares	P. C.: Cu-Mo-W	granitos, granitoides, andesitas	borde	Laramidico	Eoc.- Paleoc.
				La Caridad	P. C.: Cu-Mo	granitos, granitoides, andesitas	hacia el borde	Laramidico	50-53 Ma
				La Gloria	P. C.: Ag (Pb-Zn- Cu)	andesitas	hacia el borde	Laramidico	Eoc.- Paleoc.
				San Nicolas	F. H.: Ag (Pb-Zn- Cu)	andesitas	borde	Laramidico	Eoc.-Paleoc.
				Pilares de Teras	F.H.: Ag (Pb-Zn- Cu)	calizas, cuarcitas, lutitas	hacia el borde	Paleozoico inferior.	Eoc.-Paleoc.
				El Tigre	F.H.: Au-Ag (Pb- Cu)	riolitas	centro de estructura menor	Terciario superior	6-30 Ma Mioceno

5, 6	El Carmen	35	-	Las Chispas	F.H.: Au-Ag (Pb- Cu)	andesitas	borde	Laramidico	Eoc.-Paleoc.
2	Hornito	6-7	-	-	-	-	-	-	-
2	La Tinaja	6-7	-	-	-	-	-	-	-
2	El Comedero	6-7	-	-	-	-	-	-	-
2	La Igualama	6-7	-	-	-	-	-	-	-
2	Los Teranes	6-7	-	-	-	-	-	-	-
2	Crestón	6-7	-	-	-	-	-	-	-
2	El Cobre	6-7	-	-	-	-	-	-	-
2	La Madera	10-27	-	-	-	-	-	-	-
2	Montecristo	10-27	-	-	-	-	-	-	-
2	Los Pavos	10-27	-	-	-	-	-	-	-
2	Santa Rosa	10-27	-	-	-	-	-	-	-
2	La Lechuguilla	10-27	-	-	-	-	-	-	-
2	El Chiltepin	10-27	-	-	-	-	-	-	-
6	El Pinito	7.5	-	-	-	-	-	-	-

