



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS DE LAS BRECHAS DE IMPACTO DEL CRÁTER CHICXULUB (POZO UNAM-5)”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEÓLOGO

P R E S E N T A:
JUANA ELIA ESCOBAR SÁNCHEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

México D. F. 2002



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

PAGINACIÓN

DISCONTINUA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA 14
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-022

SRITA. JUANA ELIA ESCOBAR SANCHEZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

**CARACTERISTICAS LITOLOGICAS DE LAS BRECHAS DE IMPACTO DEL CRATER
CHICXULUB (POZO UNAM-5)**

- I INTRODUCCION**
 - II GENERALIDADES**
 - III BRECHAS GENERADAS POR IMPACTO**
 - IV ESTUDIO DEL CRATER CHICXULUB**
 - V ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS**
 - VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- ANEXOS**
BIBLIOGRAFIA

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

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D. F., a 16 de enero de 2002
EL DIRECTOR



ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*glg

2
P

**Si en la lucha el destino te derriba;
si todo en tu camino es cuesta arriba;
si tu sonrisa es ansia insatisfecha;
si hay siembra excesiva y pésima cosecha;
si a tu caudal se le oponen diques:
date una tregua,
pero no claudiques.**

Rudyard Kipling

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos aquellos profesores que orgullosos de su profesión tuvieron la dedicación de transmitirme sus conocimientos en mi formación académica, pero doy un especial agradecimiento al Dr. *Jaime Urrutia Fucugauchi* por toda la confianza, orientación y apoyo incondicional que siempre me ha brindado en la realización de este trabajo.

De la misma manera agradezco al Ing. *Jorge Nieto* y al Ing. *Enrique González* por sus valiosos consejos para la realización del mismo, así como también al Ing. *Rufino Lozano* y Quim. *Patricia Girón* por su amistad y amplia disposición para ayudarme y aconsejarme en momentos difíciles. Al Mtro *Pedro Vera* por darme su amistad y ayuda siempre que la necesité a lo largo de mi carrera.

Agradezco profundamente al Ing. *Gabriel Vázquez Castro* por toda la paciencia y dedicación que siempre me ha brindado, impulsándome siempre adelante en cada una de mis metas propuestas como un compañero y amigo, a todos mis familiares y amigos que estuvieron siempre a mi lado cuando más los necesite.

Este estudio forma parte del trabajo de investigación de perforación profunda en el cráter Chicxulub del proyecto G32526T.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres *Francisco Escobar Cantera* y *Lucía Sánchez Mejía* porque estoy segura que sin su apoyo, comprensión, dedicación y cuidados en todos los años de mi vida, no hubiera sido posible la finalización de mis estudios.

A *Ana* y *Edith* porque se que siempre ha existido entre nosotros la fraternidad y unión para ayudarnos en cada momento difícil de nuestra vida.

A *Gabriel* por compartir conmigo cada momento de su vida y ofrecerme un mundo lleno de ilusiones y también de realidades.

A todos mis amigos que siempre han estado presentes dispuestos a ayudarme, en especial a Lourdes Calderón, Janet Almanza, Pilar Magaña, Eduardo Alanís por ser mis amigos incondicionales.

INDICE

	Página
Carta de aceptación de tesis	II
Agradecimientos	IV
Dedicatoria	V
RESUMEN	VI
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1 Objetivos	4
I.2 Problemática	5
II. GENERALIDADES	6
II.1 Localización	6
II.2 Características geológicas	7
II.2.1 Síntesis Tectonoestratigráfica	9
III. BRECHAS GENERADAS POR IMPACTO	19
III.1 Clasificación de las brechas	19
III.1.1 Rocas por debajo del cráter	20
III.1.2 Depósitos de relleno del cráter	28
IV. ESTUDIO DEL CRÁTER CHICXULUB	32
IV.1 Características generales del Cráter	32
IV.2 Sistema de documentación digital de núcleos	33
IV.2.1 Descripción del método	34
IV.2.2 Funcionamiento del sistema de documentación digital	35
IV.2.3 Procesamiento de muestras	37
IV.3 Petrografía de las brechas del pozo UNAM-5	39
IV.3.1 Muestreo	39
IV.3.2 Metodología	39
IV.4 Características de las brechas de otros cráteres	41
IV.4.1 Cráter de Ries	41
IV.4.2 Cráter de Sudbury	43
V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	45
V.1 Resultados del equipo de imágenes digitales de alta resolución	45
V.2 Resultados de petrografía	55
V.3 Características de la brecha	61
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65
ANEXOS	
I.- Cráteres de impacto	68
II.- Microfotografías representativas de las brechas de impacto del pozo UNAM-5.	74
III.- Glosario	77
BIBLIOGRAFÍA	79

RESUMEN

El cráter Chicxulub se encuentra ubicado en la porción noroeste de la Península de Yucatán, sepultado por una secuencia de rocas carbonatadas y evaporitas de edad cretácica a ~ 4 km de profundidad, con un diámetro de 180 km aproximadamente y definido morfológicamente como una cuenca multianillada con un levantamiento central.

El presente trabajo se enfoca a los núcleos correspondientes al pozo UNAM-5 el cual se encuentra ubicado a 3.5 km al noroeste del pueblo de Santa Elena, (sur de Yucatán), a una distancia radial de 112 km del centro de la estructura del cráter; este pozo se perforó hasta una profundidad total de 504 m, presentando brechas de impacto a partir de los 332 m de profundidad hasta la base del mismo, con núcleo continuo. El trabajo se divide en dos partes, la primera es la descripción del sistema de documentación de núcleos de las brechas de impacto y la segunda es la petrografía las muestras representativas de la misma para este pozo.

El sistema de documentación de núcleos, es una técnica que ayuda de una forma automatizada al análisis, caracterización y cuantificación de núcleos extraídos de perforaciones, en este caso para los núcleos del pozo UNAM-5, permitiendo una fácil manipulación, almacenamiento y accesibilidad a los datos en archivos, ordenados en función de la posición relativa de su profundidad, para dar una mayor eficiencia en los análisis cuantitativos de toda la información almacenada, se compone de dos aditamentos y el componente fundamental el equipo "Core Scanner", el cual registra la imagen superficial del núcleo, en forma automatizada, ordena y almacena la información permitiendo comparar a detalle cada núcleo de manera individual o en conjunto, por tanto con ayuda de este equipo se obtuvieron diez muestras digitalizadas representativas de las brechas de impacto, para estudiarse en conjunto con un análisis petrográfico

La siguiente etapa del trabajo consistió en la elaboración de un estudio petrográfico de muestras en sección delgadas correspondientes a diferentes profundidades de la brecha, donde a partir de parámetros ya establecidos para brechas de impacto, se determinaron cuatro unidades fundamentales, de brechas tipo suevítico, pero con características diferentes entre sí; la unidad 1 se definió como una brecha tipo suevítica con matriz arcillosa, la unidad 2 como una brecha tipo suevítica con matriz de melt, la unidad 3 tenemos una brecha tipo suevítica con matriz vítrea o arcillosa y la unidad 4 brecha tipo suevítica con matriz de melt. La unión de ambas metodologías hizo posible la separación de estos tipos de brechas, así como los efectos de metamorfismo de

impacto que se encontraron; además fue posible comparar el cráter Chicxulub con otros cráteres conocidos como el cráter Ries y el cráter Sudbury, de lo cual se puede hacer una pequeña similitud en las características de Chicxulub con Ries, pero no a modo de ser una replica, sino simplemente debido a que se encuentran en secuencias estratigráficas semejantes lo que permite compararlos con las características petrológicas como efectos de metamorfismo de impacto que se encuentran en ambos.

I. INTRODUCCIÓN

Los impactos de asteroides y cometas constituyen un proceso geológico de gran trascendencia en el desarrollo planetario, han jugado un papel importante en la evolución y probablemente en la aparición de la vida en la Tierra (Oberbeck, 1990). A través del tiempo la Tierra ha estado influenciada por varios impactos gigantescos, que han generando eventos catastróficos y extinciones globales. Desde hace 30 años aproximadamente su estudio ha cobrado importancia. Anteriormente se le consideraba un proceso poco importante en comparación con otros procesos tectónicos y magmáticos en una escala global. Se afirmaba por ejemplo que los cráteres (estudio de los cráteres lunares) eran resultado de la explosión de volcanes, sin embargo las misiones espaciales de Marte y Mercurio han proporcionado información abundante que apoya el origen de impacto de la mayoría de los rasgos topográficos circulares, observados en planetas, satélites y asteroides.

En la actualidad se han reconocido alrededor de 150 cráteres de impacto terrestres. Debido a diferencias en el grado de preservación y conocimiento geológico, estos cráteres muestran una tendencia hacia estructuras de edades jóvenes (< 200 Ma) y de gran tamaño (> 20 km), localizadas en los cratones de Australia, Europa y Norteamérica. (Grieve et al., 1992). Por ser estas regiones altamente estudiadas no implica una distribución geográfica específica.

Entre las estructuras de impacto más grandes de la Tierra se encuentran el Cráter de Manicouagan en Canadá, con un diámetro de 100 km y una edad de 212 ± 2 Ma, el Cráter de Popigai en Rusia también con un diámetro de 100 km y una edad de 35 ± 5 Ma, la estructura del Sudbury en Canadá con diámetro de 200 km y una edad de 1850 ± 3 Ma y el Cráter de Vredefort en Sudáfrica con diámetro de 140 km y edad de 1970 ± 100 Ma (Grieve, 1987, 1992) Una de las estructuras más grandes y más jóvenes descubiertas en las últimas décadas es la estructura del Cráter Chicxulub, localizada al norte de la Península de Yucatán, la cual se encuentra sepultada por rocas carbonatadas de una plataforma terciaria de grandes espesores; los datos geofísicos, de gravimetría y magnetometría indican que es una estructura de impacto con un diámetro de unos 180 km y una edad de 65 Ma.

El impacto que generó esta estructura ocurrió cuando la plataforma constituía un ambiente activo de depósito de carbonatos; además de la evidencia geofísica se ha podido comprobar de su existencia a partir de núcleos de tres pozos de Petróleos

Mexicanos, denominados Yucatán 6 (Y6), Sacapuc 1 (S1) y Chicxulub 1 (C1). En 1994 se inicia un programa de perforación por la UNAM de cinco pozos (UNAM-1 a UNAM-5) para la estructura de impacto, en los cuatro primeros pozos no se pudo alcanzar la brecha por problemas en la perforación, sin embargo, a partir del pozo UNAM-5, el cual se encuentra ubicado a 3.5 km al noroeste del pueblo de Santa Elena, en la parte sur de Yucatán, se logró interceptar la brecha de impacto a los 332 m de profundidad y llegando hasta los 504 m sin que sea esta la base de la misma, presentando un registro continuo y atravesando el límite Cretácico-Terciario, que constituye la fuente de material de eyecta que caracteriza los sedimentos de esta frontera, marcada en muchas regiones del mundo por una delgada capa de arcilla intercalada entre las formaciones carbonatadas, la cual presenta un alto contenido de Iridio (30, 160 y 20 veces arriba de lo normal) y de algunos otros elementos pertenecientes al grupo del platino, lo que indica que procede de fuentes extraterrestres; esta frontera ha sido encontrada también en secuencias de América del Norte y el Caribe, por lo que el cráter fue asociado al impacto propuesto para explicar la extinción masiva de organismos que marcó el final de la era Cretácica (Urrutia et al., 1997).

En 1995 se inician las perforaciones de tres pozos más (UNAM-6 al UNAM-8). Los pozos UNAM-6 y UNAM-7 presentan una profundidad de 700 m y se ubican a 150 y 125 km del centro del Cráter Chicxulub respectivamente. Estos también interceptaron brecha, el UNAM-6 a los 220 m y el UNAM-7 a los 280 m, mostrando un contacto erosional entre las rocas carbonatadas del terciario y las brechas de impacto. El pozo UNAM-8 tiene una profundidad de 100.8 m, por lo que no se interceptó la brecha.

A partir de entonces las brechas del cráter han sido estudiadas; aunque se han realizado varias descripciones, no se han podido clasificar a detalle, sin embargo, se ha llegado a determinar que estas son de tipo polimíctica y suevítica, tal es el caso de las brechas encontradas en el pozo Y6 y S1 (Sharpton, 1993, 1995), denominadas como brecha polimíctica con matriz clástica que contiene vidrio de impacto y clastos de roca fundida, análogo a otras estructuras de impacto como el cráter del Ries en Alemania (Stöffler et al., 1977), Wanapitei en Canadá (Grieve y Ber. J, 1994); también se ha encontrado brecha tipo suevítica con clastos deformados de roca fundida y vidrio.

Análogamente ocurre para las brechas del pozo UNAM-6 y UNAM-7, las cuales son clasificadas como brecha polimíctica dividida en dos unidades, una unidad con abundantes clastos del basamento y otra con abundantes clastos de rocas evaporíticas, (Urrutia, et al., 1996a); lo cual nos lleva a pensar que a pesar de todas estas

descripciones, todavía falta mucho por hacer, ya que aún no se han podido determinar fases de metamorfismo de impacto como ocurre con otras brechas (por ejemplo Sudbury o Ries), así como la mineralogía detallada, los estudios isotópicos y muchas otras incógnitas.

De la misma manera se han realizado esfuerzos enfocados a la sistematización en el tratamiento de las muestras, así como de diferentes paqueterías de computo que ayudan al almacenamiento de la información obtenida por perforaciones científicas, por esto en el presente trabajo se menciona una nueva forma automatizada de almacenamiento de información perteneciente a núcleos, lo cual ayuda en la fácil y rápida disposición de la información, guardada en archivos de computadora; además se describe el uso y funcionamiento de un equipo automatizado que ayuda en la captura de la imagen de la superficie de los núcleos la cual se lleva a cabo por medio de imágenes digitales de alta resolución, que facilita el procesamiento para el análisis descriptivo de los núcleos, previo a una investigación detallada, así como la ubicación de los mismos con respecto a su profundidad de recuperación. Es importante destacar que por medio de estos también podemos observar algunas de las variaciones verticales de las brechas, lo que a su vez es el objeto del presente trabajo basado en los estudios de las brechas de los autores anteriormente mencionados, así como en una descripción propia. Uno de los objetivos finales de este trabajo es tratar de interpretar algunas de las características de la estructura, así como del cuerpo que le dio origen, basados en los análisis de las variaciones verticales de las brechas.

I.1 OBJETIVOS

1. Implementar y analizar el funcionamiento de sistemas computarizados (Core Scanner) para el tratamiento de núcleos de perforación pertenecientes al proyecto Chicxulub.
2. Aplicar las técnicas de documentación de núcleos, para examinar los núcleos del pozo UNAM-5, a modo de tener disponible la información en forma digital y de fácil consulta en un equipo de computo.
3. Identificar y estudiar los núcleos del Pozo UNAM-5 para poder determinar los cambios verticales que presentan las brechas del Cráter en esta localidad.
4. Efectuar estudios de petrografía de algunos fragmentos de las brechas de impacto representativos de las variaciones verticales de las mismas.
5. Realizar una comparación de las brechas descritas en el pozo UNAM-5, con las brechas encontradas en los cráteres de Ries (Alemania) y Sudbury (Canadá), con el fin de establecer las similitudes y/o diferencias, según sea el caso.

I.2 PROBLEMÁTICA

A pesar de que en los últimos años el cráter Chicxulub ha sido objeto de estudio de muchos investigadores, la información disponible es insuficiente, lo que causa que aún existan muchos puntos en discusión, debido a que la estructura se encuentra sepultada entre unos 300 a 1100 m por debajo del nivel del terreno, por lo que su estudio sólo ha sido posible mediante métodos indirectos.

Una de las principales problemáticas en el estudio de esta estructura, es la determinación del tamaño y la geometría interna del cráter, ya que según diversos autores, para el diámetro del cráter las estimaciones varían entre 170 km a 300 km, repercutiendo directamente en los cálculos de la energía del impacto y por lo tanto en el orden de su magnitud. Los cráteres con diámetros mayores de 300 km presentan una estructura más compleja, con la formación de varios anillos, una zona de excavación mayor y por lo tanto una mayor cantidad de material fragmentado y lanzado a la atmósfera.

Otro problema es determinar la forma de la estructura del cráter, ya que actualmente se encuentra en debate si el cráter es una cuenca con anillo de picos o una cuenca multianillada, así como las características del cuerpo impactor como son: su tamaño, la velocidad que presentaba antes y al momento del impacto y algunos otros factores como el ángulo de impacto.

De particular trascendencia resulta el estudio de las brechas producidas durante el impacto, debido a que muchos de los materiales o minerales producidos por el mismo, nos indican condiciones especiales de formación, como son la presión, la temperatura, tiempo, etc.; cuestiones que hasta el momento se encuentran poco estudiadas y por este motivo se plantea como uno de los objetivos del presente trabajo, hacer una descripción de los componentes de la brecha, y tratar de observar su comportamiento, comparándola con estudios realizados en brechas de algunos cráteres de impacto ya conocidos. Por todo lo anterior, el estudio de los cráteres de impacto debe ser visto como una nueva forma de resolver mucha de la problemática actual de la Tierra, ya que permitiría entender algunos procesos geológicos y sus efectos ambientales a lo largo del tiempo geológico.

II. GENERALIDADES

II.1 Localización

La Península de Yucatán se ubica en la parte más oriental de la República Mexicana, incluye a los estados de Campeche, Yucatán, Quintana Roo y porciones de Tabasco y Chiapas, además de Guatemala, el Distrito de Petén y las Montañas Maya en Belice. Se extiende desde los 16° a los 22° de latitud norte y de los 86° a los 91° de longitud oeste del meridiano de Greenwich y cuenta con una área aproximada de 300,000 km² (López Ramos, 1975), (figura 1).

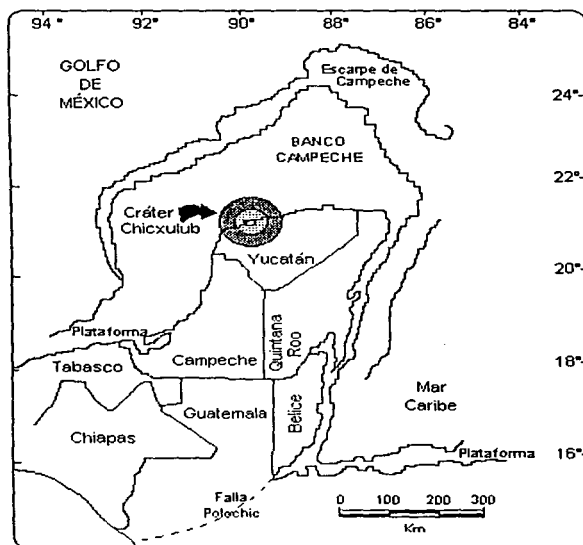


Figura 1. Mapa de localización de la Península de Yucatán

Se encuentra limitada al norte por el Banco de Campeche (talud continental), cuyos márgenes hacia el norte y occidente se caracterizan por un cambio abrupto en la pendiente, lo que se denomina Escarpe de Campeche. El Banco se extiende hasta los 24° de latitud norte con un ancho máximo de 260 km en dirección norte-sur; en el occidente se extiende hasta los 92.5° oeste y esta limitado por el Cañón de Campeche que tiene

dirección norte-sur, (López Ramos, 1975). Al sur está limitada por la Sierra Madre del Sur, Sierra de Chiapas y las sierras del norte de Centro América, incluyendo el Petén de Guatemala y las Montañas Maya de Belice (Weidie, 1985); al oriente esta limitada por el talud continental del Mar del Caribe.

El área de estudio (estructura de impacto Chicxulub), se localiza en la zona noroeste de la península; el centro de la misma se encuentra cerca de Puerto Progreso al este, en el puerto conocido como Chicxulub, por lo que se le a asignado dicho nombre a el cráter, sus coordenadas son 21.27° N, 89.60° W, (Pilkington et al., 1994).

II.2 Características geológicas

La Península de Yucatán es una gran plataforma calcárea que puede ser fácilmente diferenciada del resto de la República Mexicana y áreas colindantes en Centro América debido a su relativa baja variabilidad superficial, por esto la región se considera como la Provincia Geológica de la Plataforma de Yucatán, la cual en general se caracteriza por tener una edad Cenozoica y por estar compuesta de sedimentos marinos calcáreos, depositados en un ambiente tectónico de plataforma (Ortega Gutiérrez, et al., 1992); como todas sus rocas aflorantes en la superficie son carbonatos, esta presenta una gran variedad de rasgos kársticos que están altamente relacionados con la elevación de la región y la profundidad del nivel freático; que pertenece a la Provincia Fisiográfica de la Planicie Costera del Golfo, en la cual según Weidie, (1985); se pueden reconocer cuatro regiones fisiográficas, las cuales se mencionan a continuación, (figura 2).

1) *La planicie del norte caracterizada por cenotes kársticos*, se encuentra al norte y noreste de la Sierrita de Ticul, extendiéndose hasta la línea de costa del Golfo de México y el Caribe, presenta un ancho máximo de 275 km desde el área de Peto hasta Cabo Catoche al noreste y un mínimo de 50 km desde Mexcanú hasta Celestún al noroeste. Las alturas se incrementan desde la costa hacia tierra adentro hasta unos 35-40 metros cerca de la base de la Sierrita de Ticul. El relieve local raramente excede los 10 metros y disminuye conforme uno se acerca a la costa.

2) *La Sierrita de Ticul*, se encuentra en la parte sur del Estado de Yucatán, con un rumbo N 55° W y con aproximadamente 160 km de largo. Esta se extiende desde Mexcanú hasta el área de Polyuc, sus rasgos fisiográficos resultaron de un fallamiento normal y sus elevaciones máximas son de 100 a 150 metros.

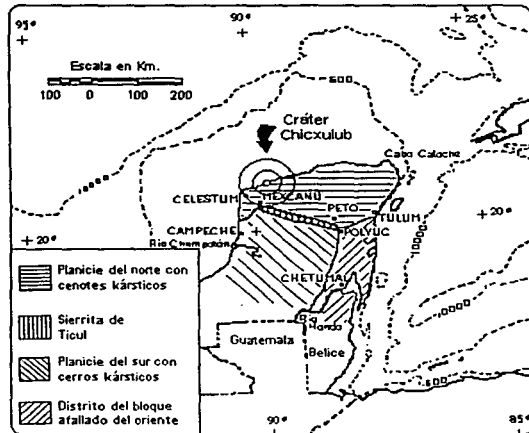


Figura 2. Provincias fisiográficas de la Península de Yucatán (Weidie, 1985).

3) *La planicie del sur con cerros kársticos*, se encuentra al sur de la Sierra de Ticul y continua hasta el pie de las montañas en la Sierra Madre, en los Estados de Tabasco y Chiapas, el Arco de la Libertad al norte de Guatemala y las Montañas Maya en el norte de Belice; presentando elevaciones máximas de 300 metros en la parte central al oriente de Campeche; la porción oriental de la planicie es cortada por la zona de falla del Río Hondo; hacia el occidente el plegamiento de los carbonatos causa ondulaciones topográficas las cuales se extienden desde el oriente de Campeche hasta el Golfo de México cerca de los poblados de Champotón y Campeche.

4) *El Distrito del Bloque afallado del oriente paralelo a la costa del Caribe*, abarca desde Belice hasta Tulum en Quintana Roo, presenta una topografía caracterizada por sierras y depresiones con rumbo NNE, las cuales reflejan la ocurrencia de horst y grabens de la zona de falla del Río Hondo; la mayoría del distrito presenta elevaciones de 50 a 100 metros y el relieve es generalmente de cerca de 25 metros, pero podría ser mayor en áreas locales cercanas a fallas.

La región noroeste, correspondiente a la Planicie Costera de la Península de Yucatán esta limitada por la falla Ticul, y el Golfo de México; esta es una región de desarrollo kárstico y esta compuesta principalmente por una plataforma carbonatada de Terciario con una banda de depósitos de playa y laguna a lo largo de la costa. Existen dos

sistemas de fracturas principales dentro de esta planicie, la zona de fractura Holbox en el este (Weidie, 1985) y un sistema al oeste cuya característica principal es un límite semicircular entre zonas de roca fracturada. Una cadena de cenotes llamada "Anillo de Cenotes" se encuentra en el límite de la misma, que contiene alrededor de doscientos cenotes con un rango de 50 a 500 m. de ancho con una profundidad de 2 a 1120 m; este anillo marca un semicírculo con un diámetro de 165 ± 5 Km truncado al norte por la costa; hacia el suroeste de este anillo se encuentra un segundo anillo que esta compuesto de unos 10 cenotes en un arco concéntrico con un radio de 90 ± 2 km.

II.2.1 SÍNTESIS TECTONOESTRATIGRÁFICA

Precámbrico

En la Península de Yucatán aún no se han documentado rocas Precámbricas debido a que solo algunos pozos perforados han llegado al basamento, aunque esto no significa que no existan rocas Precámbricas debajo de la plataforma. Según estudios realizados en la Cordillera Central de Guatemala por Gomberg et al. (1968), y McBirney y Bass (1969), se reportan edades de 345 Ma (millones de años) y 1,075 Ma; trabajos más recientes de fechamiento en zircones por el método U/Pb proporcionan edades de 418 ± 3.6 Ma y 404 Ma para el Granito Mont. Pine Ridge, en la zona de Belice (Steiner y Walker, 1996); 545 ± 5 Ma para el basamento de la Península en la zona de Yucatán, de acuerdo a zircones eyectados del cráter Chicxulub (Krogh et al., 1993), y dos grupos de edades del basamento de Florida (Granito Osceola) de 515 a 637 Ma y 1,967 a 2,282 Ma (Mueller et al., 1994).

Paleozoico

Las rocas Paleozoicas cristalinas afloran en la parte sur que limita a la Península, en la región de Chiapas en México y en los Altos Cuchumatanes en Guatemala; aunque en la parte sureste de la Península, en el área correspondiente a las Montañas Maya (Belice), se encuentran aflorando rocas sedimentarias Paleozoicas, las cuales en algunas ocasiones están ligeramente metamorfoseadas, pero que no pertenecen al basamento metamórfico sino a un grupo altamente plegado del Paleozoico Superior, conocido como el Grupo Santa Rosa, que se encuentra discordantemente sobre este, (Weyl, 1980).

La principal área de distribución de las rocas cristalinas está limitada al norte por la falla Chixoy-Polochic y hacia el sur por la falla Motagua que separa regiones con rocas de diferentes facies (Dengo, 1969); al norte de dicha falla se conoce como el Bloque Maya y al sur como el Bloque Chortis (figura 3). A continuación se describirán las litologías correspondientes a cada región.

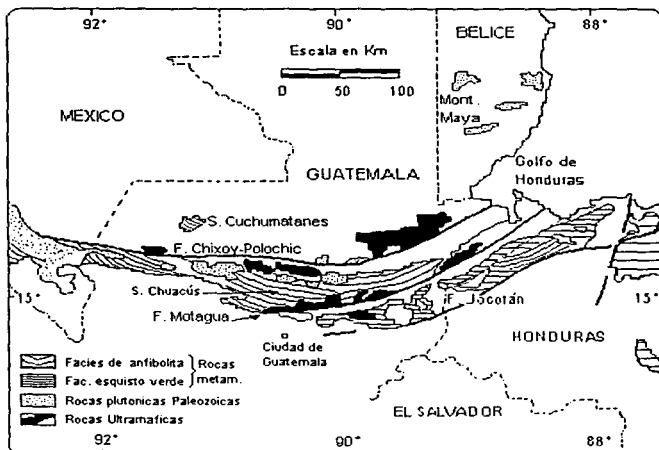


Figura 3. Distribución de rocas metamórficas y plutónicas pre-Mesozoicas en el norte de Centroamérica (Modificada de Weyl, 1980).

Grupo Chuacús (*Paleozoico metamórfico, Pzm*)

En la parte central de Guatemala en la Sierra de Chuacús (figura 3), afloran rocas que posiblemente representan al basamento metamórfico de la Península. Estas rocas se conocen como Grupo Chuacús y consisten de anfibolitas, granitos anfibolíticos, esquistos de mica, esquistos de cuarzo-albita-epidota-muscovita-clorita-biotita y gneises de diferentes composiciones (McBirney, 1963).

Con base en la mineralogía de estas rocas metamórficas, (Weyl, 1980), se deduce que sus protolitos deben haber sido principalmente grauwackas y sedimentos arcillosos, y en menor cantidad sedimentos arenosos, margosos y calcáreos.

En lo que se refiere a las edades reportadas para este Grupo, para las rocas encontradas en el pozo Yucatán 1, se tienen datos de López Ramos (1973), el cual describió un pórfido riolítico dentro de un esquistos de cuarzo y clorita con edad de 420 Ma,

Marshall (1974), la clasificó como una meta-andesita o metadacita. Varios autores han reportado diferentes edades para esta roca, observándose las siguientes variaciones: 290 ± 30 Ma, 330 Ma, 410 Ma y 420 Ma (Bass y Zartman, 1969; Dengo et al., 1969; Viniegra, 1971; y López Ramos, op cit.). Meyerhoff, (1967), sugiere que la variación de edades se debe a una alteración térmica del Paleozoico Tardío, que alteró todas las rocas pre-Misisípicas. Es importante mencionar, que las edades de 300-330 Ma del Grupo volcánico Bladen, en las Montañas Maya de Belice, coinciden con esta interpretación.

Grupo Santa Rosa (*Paleozoico Superior, Pzs*)

De los pozos perforados en la parte norte de la Península de Yucatán, no se han encontrado evidencias de rocas Paleozoicas sobre el basamento metamórfico, sino que directamente encima de este se han encontrado los Lechos Rojos o las secuencias carbonatadas Jurásico-Cretácicas, probablemente debido a la falta de pozos, aunque también cabe la posibilidad de que en este periodo de tiempo haya estado levantada la parte norte de la Península. Una de las localidades donde puede ser reconocida esta secuencia del Paleozoico Superior es en las Series Maya y Macal de Belice (Montañas Maya), (figura 3).

El Grupo Santa Rosa, abarca las rocas pertenecientes al Paleozoico Superior (Carbonífero Superior - Pérmico) y actualmente ya no se considera a la Formación Todos Santos dentro del Grupo tal como originalmente se definió, ya que esta más bien pertenece al Jurásico Superior-Cretácico. Las formaciones que conforman este Grupo son: Formación Chicó, Formación Tactic, Formación Esperanza y la Caliza Chóchal.

Mesozoico

Formación Todos Santos (*Jurásico Superior-Cretácico inferior*)

Esta formación es conocida también con el nombre de Lechos Rojos, y cuenta con afloramientos en los Estados de Oaxaca y Chiapas en la República Mexicana, en Guatemala y en Belice. Fue definida por Sapper en 1894, describiéndola como estratos de conglomerados continentales rojos, areniscas y lutitas arcillosas con espesores que varían grandemente.

Según algunos datos recopilados por Marshall et al., (1974), y Weidie et al (1978), se pueden reconocer cuatro litofacies en la parte subsuperficial de Yucatán; estas son: lutitas, anhidritas y dolomitas, cuarzoarenitas grises y cuarzoarenitas rojas. El contenido

en los conglomerados varía de acuerdo al ambiente, pero consiste principalmente de material metamórfico, granitos y calizas Paleozoicas. En el área de Jérico Chiapas, se describen estas mismas litofacies además de intercalaciones tobáceas y algunos flujos volcánicos; el miembro inferior de esta formación se compone de lodolitas, limolitas y una rara arenisca de color rojizo a púrpura denominado miembro Siltepec, cuya edad con palinomorfos indica Jurásico Medio (Blair, 1986). Para esta misma secuencia, Sánchez Montes de Oca (1979), obtuvo una edad de Triásico Tardío-Jurásico con una asociación de polen y microfósiles marinos. Es interesante el hecho de que en el subsuelo de Georgia se hayan recuperado estas mismas unidades en el Triásico Superior sobreyaciendo granitos (Chowns y Williams, 1983), así mismo en los pozos 537 y 538a del Deep sea Drilling Project (DSDP) también se cortó dicha unidad (Buffler, 1984).

La ocurrencia de estas rocas se presenta en mayores proporciones en el occidente de Guatemala al norte de la falla Chixoy-Polochic en la base de los Altos Cuchumatanes donde se ha considerado como localidad tipo; también se presenta en la Baja Verapaz y en el centro de Honduras.

Con respecto a la edad de esta formación aún no se precisa pero se ha dado con base en la fauna de las calizas marinas de los estratos superiores (Formación San Ricardo), esta corresponde al Jurásico Superior o Cretácico Inferior, y por acuerdo general entonces las capas inferiores de la misma se han asignado al Jurásico.

Cretácico Inferior (K_i)

Evaporitas Yucatán

El Cretácico Temprano fue el principio de una etapa extensa de depósitos de carbonatos y evaporitas que se continuó en la plataforma de Yucatán hasta el Cuaternario.

López Ramos (1973, 1975) propuso el nombre de Evaporitas Yucatán para esta secuencia que se encuentra encima de los Lechos Rojos (Formación Todos Santos), en el subsuelo de la Península. En la parte norte y centro de Yucatán, estas pertenecen al Cretácico Inferior y en la parte de Guatemala y Belice estas son de probable edad Cretácico Inferior a Cretácico Medio. En la parte más baja del Cretácico se tienen estratos de cuarzo-limos y dolomita, los cuales probablemente se acumularon en planicie de supramarea sobre las areniscas Jurásicas cuando el nivel del mar transgredió el oriente, aunque en la parte occidente de la plataforma, en el área del Banco de Campeche-

Reforma, también ocurrieron depósitos de aguas someras, (figura 4)

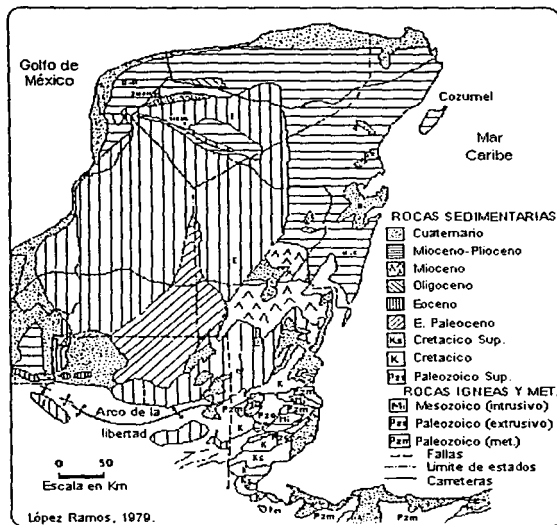


Figura 4. Mapa geológico de la Península de Yucatán (López Ramos, 1979).

Cretácico Superior (Ks)

En 1952 G. Flores realizó un reconocimiento en las Montañas Maya de Belice, encontrando una serie de calizas, calizas dolomíticas y dolomías con una delgada capa de arenisca. La fauna pertenece principalmente al tipo lagunal hasta depósitos de pos-arrecife.

Cenozoico

Formación Icacché (*Paleoceno-Eoceno Inferior, E-P*)

Formada por de calizas compactas de micro a macro cristalinas, generalmente dolomitizadas, a veces silicificadas, o bien simplemente recristalizadas, lo que explica la ausencia de fósiles (Alvarez, 1969). El pozo Corinto No. 1 (López Ramos, 1975), atravesó la secuencia más de 500 metros y no llegó a la base de la misma, por lo tanto no se sabe

su espesor exacto.

Formación Chichen Itzá (*Eoceno Medio-Superior, E*)

Las rocas de esta formación son calizas con abundante fauna, presentan ligeras variaciones litológicas lo que permite dividirla en tres miembros: Miembro Xbacal, Miembro Pisté y Miembro Chumbec; fue depositada sobre una base casi plana, debido a la cual no ofrece grandes variaciones en los ambientes de depósito, es decir, se depositó bajo condiciones muy similares, lo cual puede ser diferenciado solo mediante la microfauna.

Oligoceno (O)

El Oligoceno Inferior se presenta como una calcarenita pulverulenta, quebradiza, suave en parte, blanca y rosada, con caliche, en bancos de 1 a 1.5 metros de espesor y su contenido faunístico principal es de *Eulipidina sp.*, *Nummulitides sp.* y *Biloculina sp.*

El Oligoceno Superior está constituido por una caliza y calcarenita pulverulenta coquinoide, con abundantes restos de moluscos, briozoarios, algas y miliólidos.

Mioceno (M)

Formación Bacalar (*Mioceno Superior*)

Fue definida por J. Butterlin en 1958 y consiste de calizas cretosas blandas, pero con nódulos duros que pueden formar verdaderos niveles, estas pasan a margas blancas en los niveles inferiores y a veces se presentan finas capas de yeso. Según los datos que se habían reportado hasta entonces (López Ramos, 1975) se considera que su espesor debió alcanzar "varios centenares" de metros.

Pleistoceno-Holoceno (Q)

Calizas de Moluscos

Son calizas coquíferas masivas de color generalmente blanco a crema. Su fauna comprende sobre todo moluscos de aspecto moderno. Probablemente las calizas consolidadas pertenezcan al Pleistoceno y las capas superiores más blandas y costeras pertenezcan al Reciente.

La columna mostrada a continuación permite resumir el registro estratigráfico

descrito: las rocas más antiguas conocidas (del basamento), llamadas Grupo Chuacús, afloran al norte de la zona de sutura Motagua del Cretácico Tardío y consiste principalmente de esquistos, gneises con algo de marmol, metavolcánicos y algunas unidades cuarcíticas (Donnelly et. al., 1990). La edad de este Grupo puede solo establecerse como pre-Paleozoico Tardío. El grado metamórfico de estas rocas se ha definido como de anfíbolita y anfíbolita de granate, mientras al sur de la zona de sutura, filitas y esquistos son de facies de esquistos verdes (Bishop, 1980) y se interpretan como parte de un bloque diferente (Chortis).

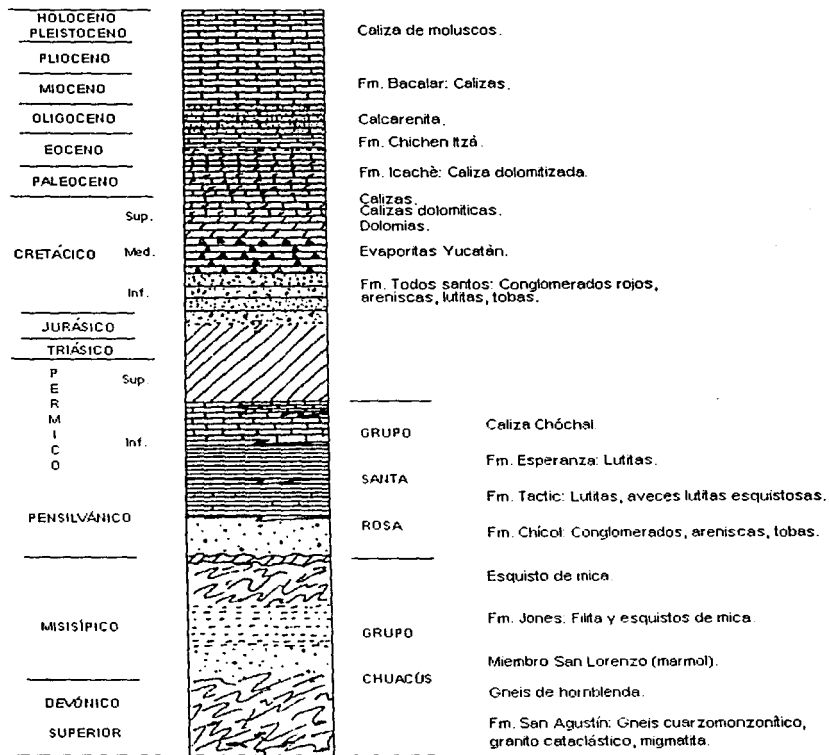


Figura 5. Columna estratigráfica generalizada para la Península de Yucatán (modificada de Anderson et al., 1973, tomada de la tesis de Vazquez, 2000).

TECTÓNICA

Se han realizado muchos modelos enfocados en reconstruir la historia del Paleozoico Tardío al Mesozoico en la región del Golfo de México-Caribe-Atlántico Central. Aunque se han tomado una inmensa cantidad de datos geológicos y geofísicos en las márgenes de la cuenca, su enfoque ha sido sólo al registro geológico más accesible (Cenozoico). Las rocas del Mesozoico Temprano y Paleozoico afloran únicamente en unas pocas localidades cerca de las márgenes de la cuenca, lejos de dichas márgenes estas rocas están más allá de las profundidades de perforación o se encuentran cubiertas por sal. En general, la información geológica disponible de las áreas marginales, no provee datos que permitan una buena comprensión del tiempo, secuencia y naturaleza de los eventos geológicos que dieron lugar al Golfo de México.

Los modelos propuestos en cinemática de placas han tomado como ejemplo para mostrar soluciones al problema de la apertura y reconstrucción del Golfo de México, los siguientes cinco puntos principales: a) el aparente traslape para el Pérmico entre Sudamérica y México, b) el aparente traslape entre las Bahamas y la Meseta de Guinea, c) la paleoposición del bloque de Yucatán, d) el tiempo y estilo de apertura en el Golfo de México/Caribe y e) la orientación y significado de las zonas de cizalla propuestas en el área del Golfo.

El modelo de Anderson y Schmidt (1983) resuelve el traslape México-Sudamérica proponiendo un desplazamiento de 700 a 800 km en el Pre-Jurásico Tardío a lo largo de la megacizalla Mojave-Sonora, 300 km de desplazamiento a lo largo de la megacizalla inferida bajo la Faja Volcánica Transmexicana (también en el pre-Jurásico Tardío) y 1300 km de movimiento Jurásico-Cretácico a lo largo de la megacizalla Acapulco-Guatemala (proto-Motagua). En este modelo la corteza oceánica en el Golfo de México se formó a lo largo de líneas paralelas a las del Atlántico Central y la formación de corteza oceánica se completó en el Jurásico Medio. El modelo no considera el problema relacionado al traslape de Bahamas-África, ni la extensión geométrica de la corteza oceánica en el Golfo de México. El Bloque de Yucatán pre-rift es desplazado desde el área ocupada por el Golfo actual hasta la posición de los actuales terrenos en México (Anderson y Schmidt, 1983).

Existen otros modelos como los de Klitgord et al. (1984 y 1988) y Klitgord y Schouten (1986) donde se propone un esquema evolutivo en el cual el rumbo de las zonas de fracturas del Atlántico se proyectan al Golfo de México. Otro modelo propuesto

por Pindell y Dewey (1982) y Pindell (1985), en el cual se presenta como el primer modelo detallado para la apertura de la región Golfo de México-Caribe y en el que tanto el tiempo como la dirección de movimiento de las microplacas de América Central, son independientes de la cinemática de apertura del Atlántico Central. Propone varias consideraciones: a) definición del bloque independiente del estrecho de Florida (un área continental que consiste del presente arco Sarasota, cuenca sur de Florida y el noroeste de las Bahamas, el cual interpretan que se movió 300 km desde la parte oriental del Golfo en una dirección sureste a lo largo de la postulada falla Florida - Elbow; b) definición de la falla transforme Tamaulipas - Golden Lane - Chiapas, a lo largo de la cual giró el bloque de Yucatán desde el norte del Golfo; y c) la existencia de la falla Jay, la cual se interpreta que cruza Florida y se une con la extensión NW de la zona de fracturas Bahamas hasta el sur y con la zona de Fallas Pickens-Gilberttown al norte.

En esta reconstrucción, la existencia de las megacizallas Mojave-Sonora y Faja Volcánica Transmexicana también se acepta. La distribución de corteza oceánica en el Golfo, la estiman tomando como base el límite hacia el mar de la sal del Jurásico Medio y su formación durante el Jurásico Tardío al Cretácico Temprano, por una rotación antihoraria del bloque de Yucatán a lo largo de un polo en el norte de Florida. El Caribe se interpreta que empezó a abrirse al mismo tiempo por una rotación en abanico entre Yucatán y Sudamérica.

El último modelo aquí mencionado es el propuesto por Marton y Buffler (1994) y Marton (1995) en el cual se integra información geológica y datos geofísicos. Consta de dos etapas (sinrift y posrift) que incorpora la definición de la corteza oceánica en el Golfo de México y el conocimiento de la evolución cinemática de los grandes bloques continentales (Placa Norteamericana y Placa Afro-Sudamericana). La determinación de la corteza oceánica en el Golfo de México se obtuvo al combinar los resultados de datos geofísicos con información geológica y utilizando programas de reconstrucción de placas para visualizar los movimientos de estas. Proponiendo así, que durante el Triásico Tardío(?) al Jurásico Medio en un estado "sinrift". El Bloque relativamente estable de Yucatán se movió hacia el sureste a lo largo de una zona de falla transforme en el lado oriental de México. Este movimiento dio lugar a una gran cantidad de extensión en el área del futuro norte del Golfo y al mismo tiempo el Bloque Florida-Bahamas se extendió en una dirección sureste para formar una serie de cuencas y arcos a lo largo de la actual plataforma de Florida. Contrario a los muchos esquemas evolutivos del Golfo de México publicados, este modelo no requiere de gran fallamiento lateral entre Yucatán y Florida,

aunque se postula desplazamiento lateral izquierdo a lo largo de una gran zona de cizalla en el oriente del Golfo (zona de fracturas Bahamas y su extensión noroeste). La evidencia estratigráfica del borde de la cuenca indica que durante la fase de expansión (rifting), la cuenca emergió y fue una área de erosión con sedimentación continental localizada y vulcanismo. De acuerdo con Marton y Buffler (1994) la reconstrucción de las provincias salinas de Louann y Campeche muestran que algo de la sal original pudo haberse depositado en una cuenca oceánica parcialmente abierta en el Calloviano al Oxfordiano Temprano. El estado de deriva estaría marcado entonces por el cese del vulcanismo de la margen continental, una transgresión mayor y la sedimentación marina a lo ancho del Golfo.

La evolución cinemática para la apertura del Golfo de México requiere una expansión mayor en el sureste del Golfo, de manera contemporánea a la formación de corteza oceánica en el Jurásico Tardío en el mismo, conforme el Bloque de Yucatán rotaba de forma antihoraria con respecto a la región Florida-Bahamas, cesando para el Berriasiano Tardío (Molina et al., 1992, Marton y Buffler 1994).

III. BRECHAS GENERADAS POR UN IMPACTO

III.1 Clasificación de las brechas

Una gran variedad de tipos de rocas son producidas durante la formación de las estructuras de impacto. La clasificación de este tipo de rocas se encuentra todavía en debate. Sin embargo, el término general que utilizaremos aquí será el de "impactita" (French, 1998), para todas las rocas afectadas o producidas por eventos de impacto, incluyendo impactos metamorfoseados (pero aún reconocibles), brechas, material fundido y otros procesos generados por eventos de impacto meteorítico.

Las "impactitas", son producidas en diferentes etapas y sitios durante los procesos de impacto, estos pueden ocurrir debajo, dentro y alrededor de la estructura del impacto final. Las características de las impactitas reflejan diferentes aspectos del impacto, como: 1) la etapa inicial, que es la distribución de la onda de choque alrededor del punto de impacto, 2) la subsecuente excavación del flujo y la consecuente formación del cráter transitorio, así como la expulsión del material y 3) la modificación misma de los procesos del cráter; este modelo se muestra en la figura 5, y puede ser modificado por factores individuales como la litología del impacto, estratigrafía y el ángulo de impacto del proyectil, sin embargo, proporciona una base general para la identificación y clasificación de este tipo de rocas.

La siguiente clasificación de brechas enfatiza campos y características petrológicas, esta basada en rasgos objetivos que son observables en afloramientos, muestras de mano y láminas de sección delgada; utiliza términos tradicionales todavía aplicados a rocas, formadas por procesos geológicos comunes. Aunque generalmente consiste en una clasificación más detallada (Stöffler y Grieve, 1994), esta restringida a rocas de tipo terrestre producidas por eventos de impactos singulares. En la siguiente tabla se muestra una clasificación completa para este tipo de rocas, (Tabla 1).

Es importante hacer una diferencia entre rocas parautóctonas que se encuentran debajo del piso del cráter y las rocas alóctonas que pueden ser brechas y material fundido (melt), las cuales rellenan el cráter y forman las unidades de material de eyecta (figura 6 y 7).

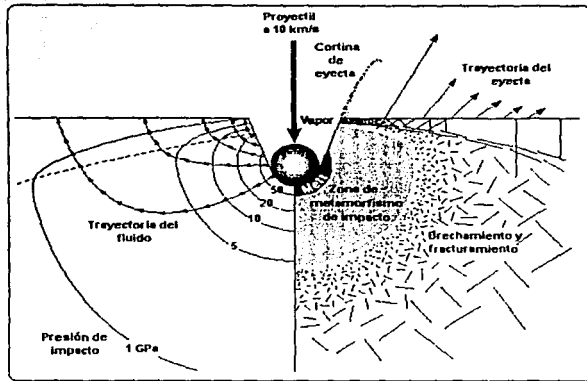


Figura 5. La sección esquemática muestra la presión de impacto (en GPa), desarrollada en la roca alrededor del punto de impacto, se muestran los cambios en los efectos del impacto; en el lado izquierdo de la cavidad se muestran las unidades, a más de 50 GPa se forman las unidades de melt, de 5-50 GPa se forman los efectos de la deformación en el impacto y de 1-5 GPa se observa el fracturamiento y brechamiento; esto es llamado estado de contacto-compresión, (Melosh, 1989).

A continuación se hará una descripción de las rocas de impacto con respecto a su posición en la estructura de impacto:

- 1) Rocas por debajo del cráter: rocas parautoctonas, unidades alóctonas "cross-cutting" y pseudotaquilita.
- 2) Depósitos de relleno del cráter (rocas del interior del cráter): brechas líticas, suevitas y brechas de material fundido "melt".

III.1.1 Rocas por debajo del cráter

Durante la formación del cráter transitorio o cavidad transitoria, momento en que se impacta el proyectil con las rocas, (llamado estado de contacto-compresión), las rocas localizadas en la zona de desplazamiento debajo de la zona de excavación, son dirigidas hacia abajo y hacia fuera, de forma mas o menos homogénea y ligeramente fragmentadas; sin embargo, son deformadas formando el cráter transitorio y en las grandes estructuras se produce en su centro un levantamiento central.

Tabla 1. Clasificación completa para los tipos de brechas

1. Ubicación con respecto al cráter (R_c = radio del cráter)		
Piso del cráter y subcráter	Dentro del cráter	Borde del cráter y superficie cercana
Rocas parautoctonas: rocas de impacto (uniformes) brechas líticas	Rocas alóctonas: depósitos de relleno del cráter (brechas de cráter relleno, lentes de brecha)	Rocas alóctonas: material de eyecta proximal ($< 5 R_c$) distal ($> 5 R_c$)
Rocas alóctonas: (cross-cutting) diques de brecha, diques de melt	Brechas líticas: (brechas de melt-bearing)	
Pseudotaquilita	Suevitas	
	Brechas con matriz de melt	
2. Origen de los componentes de la brecha		
Rocas parautoctonas: aproximadamente en su lugar, conservan su estratigrafía y estructura original		Rocas alóctonas: derivadas de fuentes múltiples o singulares
3. Características de las brechas		
Carácter de los fragmentos	Litología de los fragmentos	Características de la matriz
(Brecha lítica) Sólo fragmentos de rocas y minerales	(Brecha monomítica) Tipo de roca singular	(Matriz clásica) Diferentes tipos de clastos
(Brecha suevítica) Fragmentos de vidrio y melt con roca y minerales	(Brecha polimítica) Compuesta de diferentes tipos de roca.	(Matriz de melt) Melt uniforme, vidriosa o cristalina
4. Características de la roca de melt		
Holohialina (vidrio) Hipocristalina (mezcla de vidrio y cristales) Holocristalina (completamente cristalina)		

Nota: Para tamaños de grano, textura, etc. se usan otros tipos de texturas de rocas ígneas, ejemplo: microcristalina, porfíritica, traquítica, etc. (French, 1998).

En dichos movimientos las rocas por debajo del cráter son generalmente desplazadas como grandes bloques individuales, decenas de cientos de metros. Sin embargo, en regiones adyacentes dentro de esta zona, se realizan pequeños desplazamientos relativos; las características originales como estructurales y estratigráficas son bien preservadas dentro de bloques individuales. El término parautoctono ha sido aplicado aquí para las rocas que indican una uniformidad relativa en general.

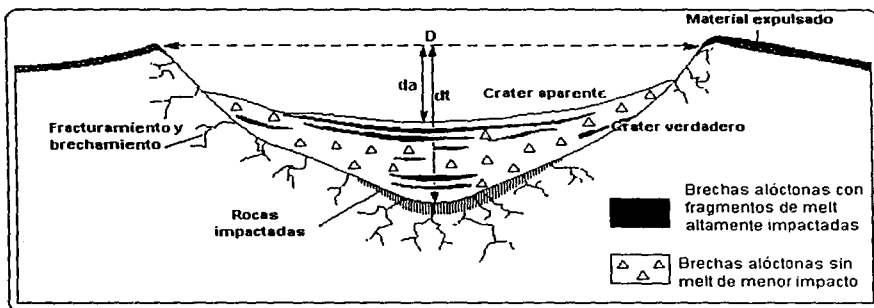


Figura 6 Estructura de un cráter simple. Localización de varios tipos de impactita alrededor de la estructura; las rocas paraúctonas debajo del piso del cráter real son fracturadas y brechadas, se observan efectos de impacto en zonas pequeñas (como en las líneas finas verticales) en el centro de la estructura. El cráter es relleno con una variedad de brechas alóctonas y material de impacto (melt), el cual forma las unidades del cráter relleno o lentes de brecha, una delgada capa de espesor de material es expulsada sobre los levantamientos del borde del cráter. El diagrama representa el estado del cráter final antes de los subsecuentes estados geológicos como la erosión. D = diámetro del cráter final, el cual es de 10 a 20% más grande que el diámetro del cráter original, dt = profundidad del cráter real, el cual es aproximadamente la profundidad del cráter transitorio original, da = profundidad aparente del cráter o la profundidad del borde del cráter final al inicio de las unidades de relleno del cráter. (Grieve, 1987).

Las presiones de impacto para rocas paraúctonas varía en gran medida por la compleja relación entre la distribución original de la onda de choque y la subsecuente modificación del cráter, estas presiones son por tanto más altas cerca del centro de la estructura y decrecen rápidamente hacia fuera de la misma. A lo largo del piso de la cavidad transitoria (aproximadamente en el piso del cráter), la presión de impacto excede 25 a 30 GPa en el centro, y decrece a menos de 2 en el borde, que es la presión mínima necesaria al excavar el material en el cráter transitorio. La presión de impacto también decrece con el incremento de la profundidad hacia abajo del piso del cráter, en el centro la presión desciende de 25 a 30 GPa hasta unos cuantos GPa en distancias menores de unos cuantos cientos de metros en estructuras pequeñas y no más de unos cuantos kilómetros en estructuras grandes (Stöffler et al., 1988).

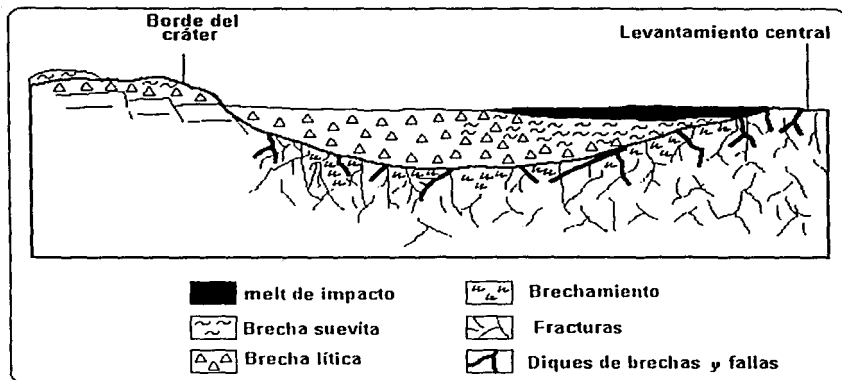


Figura 7. La figura muestra una sección esquemática radial de un cráter tipo complejo en el que se observa a la derecha un levantamiento central y a la izquierda el fallamiento. Las rocas paraúctonas expuestas en el levantamiento central son altamente fracturadas y brechadas, contiene características distintivas de impacto. Estas rocas también contienen brechas de pseudotaquilita y cuerpos intrusivos de brechas alóctonas y material de impacto, los espesores de las unidades más grandes ocurren en unidades de relleno del cráter que cubren a las rocas paraúctonas entre el levantamiento central y el borde. Estos depósitos consisten principalmente de brechas líticas sin melt y con algunas brechas suevíticas (melt-bearing), (Stoffler et al., 1988).

El estudio de la variedad de las brechas en rocas del subcráter es complicado por varios factores, ya que las brechas forman varios estados en el proceso de craterización:

- 1) Durante la expansión de la onda de choque y la formación del cráter transitorio.
- 2) Durante la modificación subsecuente del cráter transitorio incluyendo (en grandes estructuras) movimientos asociados con el levantamiento central y el colapso alrededor del borde del cráter.

Otro problema es la formación de melt; las rocas pueden ser fundidas por el impacto inicial y distribuidas como melt o en brechas de melt, a través del basamento del cráter, pero estas rocas pueden también ser fundidas subsecuente por fricción generada durante los rápidos movimientos en grandes volúmenes de roca durante la modificación del cráter y formación del levantamiento central.

Brechas Líticas (Parautóctonas)

Las brechas de impacto que se formaron por el rompimiento y pulverización de la roca esencialmente en el lugar (autoclástico), forman cuerpos irregulares con tamaños de

decenas de cientos de metros, las cuales muestran contactos gradacionales, en áreas similares, pero más uniformes en la roca de impacto. Estas brechas están compuestas por fragmentos de roca y minerales en una matriz clástica, pero con fragmentos similares,

dichos fragmentos tienden a ser angulares o afilados, aunque los fragmentos de rocas más deleznales como las calizas y lutitas tienden a ser más redondeados; las brechas tienden a ser pobremente clasificadas, los fragmentos son derivados de rocas del lugar del impacto y las brechas tienden a ser monomítica o polimítica, ya que depende de la variedad litológica presente en las rocas cercanas. Los distintos efectos de metamorfismo de impacto están generalmente ausentes en los fragmentos, las brechas no muestran evidencia significativa de transporte y no contienen fragmentos extraños o material vídrioso.

Estas rocas frecuentemente se parecen a brechas formadas por mecanismos geológicos más comunes semejantes a explosiones volcánicas o movimientos tectónicos y su determinación como producto de un impacto es difícil e incierto. En general las regiones que se encuentran por debajo del cráter en la estructura de impacto, muestran variable deformación sobre distancias cortas y una asociación de diferentes clases de brechas desarrolladas en el basamento de la roca, así como la presencia de cuerpos de diques alóctonos de brechas y material fundido. Esta variabilidad en la deformación y tipos de roca contrastan con efectos más uniformes o graduados producidos por mecanismos endogénicos. Aún así, la determinación de estas rocas como brechas de impacto, puede generalmente no ser directa, ya que depende de su asociación con rocas altamente impactadas, en las cuales el origen del impacto es claro (French et al., 1997).

Brechas alóctonas (cross-cutting)

Las brechas alóctonas, tienen formas más regulares en los contactos y claras relaciones de corte cruzado (cross-cutting), junto a las rocas por debajo del cráter. Frecuentemente ocurren como diques de brecha, en los que su tamaño es de un metro a decenas de metros en lo ancho y aproximadamente un kilómetro de largo; contienen fragmentos de la roca de impacto de angulares a redondeados con tamaños menores que van de un milímetro a varios metros. Estas brechas tienden a ser polimíticas con diversos fragmentos litológicos, contienen frecuentemente cantidades significativas de material alóctono semejante a fragmentos aún más distantes de las unidades de roca, este material es frecuentemente derivado del centro del cráter; a menudo los fragmentos

proviene de la parte superior del dique y consisten de fragmentos de rocas altamente impactadas o de rocas de fusión.

Una gran variedad de brechas alóctonas "cross-cutting" se han encontrado en varias estructuras de impacto (Lamber, 1981, Bischoff y Oskierski, 1987; Dressler y Sharpton, 1997), de las cuales se han derivado las siguientes clasificaciones:

1. Brechas líticas, polimícticas sin material fundido y con una matriz clástica.
2. Brechas con fragmentos de roca fundida, que contiene vidrio, rocas y minerales en una matriz clástica.
3. Brechas con matriz de roca fundida, compuestas con fragmentos de rocas y minerales en una matriz vídriosa o cristalina.
4. Rocas compuestas de material fundido (vítreo o cristalino), con unas cuantas inclusiones.

Muchos de los diques son similares a estas unidades de brecha o roca fundida, cerca del piso del cráter. Los diques de la brecha debajo del cráter contienen frecuentemente materiales (fragmentos de roca o melt), que fueron originalmente localizados a niveles estratigráficos altos al punto del impacto, indicando que los materiales en los diques han sido emplazados hacia abajo y/o al exterior, dentro de las fracturas que abren en el piso del cráter durante la formación y modificación del mismo. Estas relaciones indican que aún durante un breve tiempo (segundos o minutos) de la formación y modificación de este, una gran variedad de distintos tipos de brecha pueden ser generados y emplazados. Sin embargo, en el ambiente del cráter las relaciones de "cross-cutting" entre los cuerpos de la brecha no implican el paso de cantidades significativas de tiempo en el emplazamiento, debido al hecho de que estas relaciones entre diferentes tipos de brechas no son consistentes con el lugar o los lugares dentro de la estructura.

Pseudotaquilita

La pseudotaquilita ha sido desarrollada en dos grandes estructuras de impacto, Vredefort (Sudáfrica) y en Sudbury (Canadá). La pseudotaquilita de Vredefort que ha sido descrita hace más de ochenta años (Shand, 1916), ocurre en forma irregular y abundante, en cuerpos de diques que contiene numerosas inclusiones de roca de impacto redondeadas, de diversos tamaños, en una matriz afanítica o cristalina, generalmente de color negro a negro verdosa, brechas similares han sido observadas en otras estructuras

de impacto. La pseudotaquilita expuesta en Sudbury cubre unos 100 a 200 km², los cuerpos individuales de pseudotaquilita, pueden ser muy grandes, en una estructura de impacto a grandes distancias y quizá existen cambios en el tamaño y la forma de metros a decenas de metros. Los cuerpos de diques más largos presentan poca y en general ninguna orientación preferencial.

La relación que existe entre fragmentos y matriz en los cuerpos pseudotaquiliticos varia significativamente en cortas distancias y en algunas brechas pseudotaquiliticas consiste solamente de rocas fracturadas cortadas por delgadas vetas de matriz negra de unos cuantos milímetros de ancho (el término de brechas "cobweb" ha sido utilizado para nombrar estas brechas en el campo).

El tamaño para las inclusiones de pseudotaquilita es de submicroscópicas a cientos de metros, compuesta de roca encajonante y generalmente no hay una evidencia para distancias mayores a 100 m; en el transporte de fragmentos durante la formación las inclusiones grandes (mayores a 1 cm), son generalmente de forma redondeada mientras que las más pequeñas tienden a ser muy angulares o afiladas, sin embargo, algunas inclusiones con deformaciones en los bordes, forman una estructura de flujo que puede ser observada megascópica y microscópicamente dentro de una matriz.

La matriz entre grandes fragmentos de roca es densa y uniforme, en muestra de mano la matriz frecuentemente muestra una textura concoidal o textura "hackly" sobre superficies fragmentadas. El color es comúnmente de negro a gris oscuro sobre superficies frescas, aunque el color varía ligeramente con la roca encajonante. La matriz ocurre en una gran variedad de formas en muestras de mano, pues generalmente es afanítica de grano extremadamente fino, por lo que es difícil identificar, aún en sección delgada; en algunas muestras, la matriz presenta una textura microcristalina de roca fundida en escala microscópica. Existe una gran controversia aun sobre las características, terminología y origen de la pseudotaquilita; en sección delgada se logra observar un bandeamiento fluidal; este bandeamiento envuelve inclusiones que han sido prácticamente deformadas y posiblemente fundidas (figura 8).

Desde la primera vez que se utilizó la palabra pseudotaquilita (Shand, 1916), se relacionó mucho con el material del cráter Vredefort, designando a la taquilita como vidrio basáltico y también a el material fundido, formado tectónicamente a lo largo de muchas fallas. Desafortunadamente este término ha sido aplicado sólo a brechas que contienen vidrio de origen tectónico, las cuales forman diferentes ambientes y son el resultado de intensas deformaciones (incluyendo material fundido) de rocas a lo largo de un

lineamiento en un tren de fallas. Se forman en un régimen de compresión, pero pueden parecerse a pseudotaquilita producida por el impacto incluyendo la presencia de material fundido en la matriz.



Figura 8. Pseudotaquilita de un gneis granítico en la Sierra Norte de la estructura del Sudbury en Canadá; se observa una mezcla heterogénea y deformación plástica, con fragmentos de roca fundida y una matriz negra de grano fino con pequeños fragmentos de minerales y de roca.

Trabajos recientes sugieren que la pseudotaquilita producida por impacto se forma del mismo modo que la de origen tectónico, es decir por la fricción de los rápidos movimientos en la etapa tardía del desarrollo y modificación del cráter. Una posible forma de distinguir a la pseudotaquilita de impacto con relación a la de tipo tectónico es el tamaño; pues los cuerpos de pseudotaquilita tectónica tienden a alinearse con un ancho menor de unos cuantos metros (Sibson 1975, Spray 1995); la pseudotaquilita producto del impacto por lo menos en los cráteres de Sudbury y Vredefort, forman cuerpos más irregulares, algunos de los cuales alcanzan decenas a cientos de metros.

Otro problema en el estudio de las brechas producidas por impacto, es el término pseudotaquilita, que ha sido usado para designar diferentes tipos de brechas de impacto formadas en diferentes estados (posiblemente por diferentes mecanismos) durante la formación de un cráter (Dressler y Sharpton, 1997).

III. 1.2 Depósitos de relleno del cráter

Durante el estado de modificación el material es expulsado de varios puntos en el crecimiento del cráter transitorio, este material es depositado dentro del cráter final para formar los depósitos de relleno del cráter que se forma por brecha y material fundido. Este cráter es particularmente rellenado con una mezcla compleja de fragmentos de roca (impactada y no impactada); estos depósitos consisten de brechas acompañadas por unidades de roca de material fundido, también llamadas lentes de brecha (figura 6); en grandes estructuras complejas, particularmente formadas en rocas cristalinas, el relleno del cráter contiene unidades de brecha y material fundido forma grandes depósitos anulares alrededor del levantamiento central; subsecuentemente a la formación del cráter y a la depositación del material, el cráter se rellena y las brechas sepultadas por sedimentos de cráteres más jóvenes, se depositan lentamente por procesos de erosión, transporte y depósito. Estos depósitos de brecha contienen variedades de brechas alóctonas y roca fundida (figura 9); estos fragmentos han proporcionado la mejor evidencia para determinar el origen del impacto de numerosas estructuras; la siguiente clasificación esta basada en:

- 1) Los fragmentos litológicos (de brecha de material fundido y líticos)
- 2) La naturaleza de la matriz (clástica o matriz de material fundido)

Brecha lítica (alóctona)

Las brechas sin contenido de roca fundida forman una litología común y distinta en estructuras de impacto grandes y pequeñas. En estructuras de impacto pequeñas como por ejemplo la estructura de Brent, Canadá (Dence, 1968), las brechas líticas forman unidades de cientos de metros de espesor que se extienden por encima del final del cráter. En grandes estructuras como el cráter de Ries, Alemania, se observa una brecha lítica, alóctona (polimíctica), llamada Brecha Bunte (que significa coloreada), esta ocurre debajo de la capa en relación con la brecha suevita dentro y fuera del cráter como un contacto anguloso entre las dos unidades. En algunas estructuras de impacto especialmente formadas en rocas carbonatadas, las brechas líticas quizá serían el único material presente en depósitos del relleno del cráter.

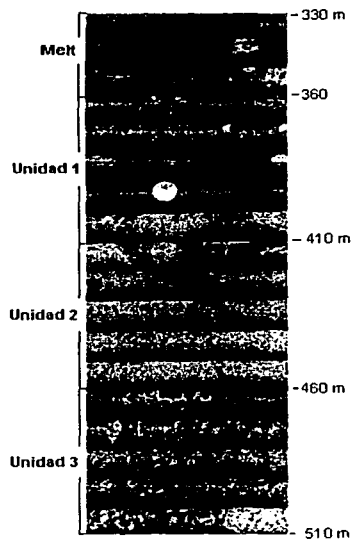


Figura 9. En esta figura se observa un mosaico de núcleos, pertenecientes al pozo UNAM-5 del Cráter Chicxulub, esto es una secuencia de brechas de relleno del cráter. La secuencia comienza a los 330 m, cada núcleo representa 10 m de profundidad, el primer horizonte es considerado como una unidad de melt, debajo de este horizonte se encuentran tres unidades de brecha suevítica asignadas como 1,2,3. La unidad 1, esta caracterizada por abundantes clastos de unos cuantos centímetros y vesículas de material fundido, la unidad 2 presenta grandes fragmentos de impacto y material fundido del basamento, la unidad 3 es más rica en melt y contiene grandes porciones de clastos de silicatos con tamaños en centímetros. (fotografía de V.L. Sharpton, tomada de French, 1998).

Las brechas líticas consisten de fragmentos de rocas y minerales en una matriz clástica de material de grano fino. Son pobremente clasificadas, el tamaño de los fragmentos generalmente son de menores a un milímetro hasta decenas de metros; los fragmentos son afilados a angulosos en apariencia. A diferencia de las brechas líticas encontradas en rocas paraúctonas, las brechas líticas de esta parte del cráter generalmente son polimícticas porque sus fragmentos han sido derivados de grandes regiones, de rocas originales al impacto. La mayor cantidad del material en estas brechas es derivado de regiones de menor impacto alrededor de las paredes y en el borde del cráter transitorio, los efectos de impacto son raramente observados en los fragmentos.

Dentro de los depósitos, las brechas son frecuentemente asociadas con unidades que contienen un componente de material fundido como "fragmentos discretos" o como una matriz de fragmentos líticos. Las brechas con poco porcentaje de roca fundida son reconocidas como brechas "con aspecto de roca fundida", pero la transición entre este tipo de brechas parece continuo y los límites aún no han sido establecidos. Estas brechas forman una pequeña porción del cráter relleno con un porcentaje en volumen de 10-25 % y la cantidad de componentes de melt contienen un alto porcentaje > 90 %.

Brechas con fragmentos de roca fundida (suevíticas alóctonas)

Las brechas con fragmentos de roca fundida o brechas suevíticas, están compuestas de pequeños fragmentos de roca y minerales junto con cuerpos de roca fundida en una matriz clástica de composición similar, pero de grano más fino, muchos de estos fragmentos son altamente impactados y las brechas frecuentemente proporcionan la mayor evidencia para definir el origen de la estructura de impacto.

El término suevita fue originalmente aplicado a brechas con fragmentos de roca fundida, para el cráter del Ries en Alemania, un cráter relativamente joven (15 Ma) con una estructura bien preservada de 24 km, la suevita se encuentra bien expuesta así como también otros tipos de rocas de impacto.

La brecha suevítica de este cráter y otras estructuras de impacto consisten de pequeños cuerpos de vidrio, clastos de roca y minerales en una matriz fina; las suevitas ricas en vidrio son del 50% de volumen de la roca, los fragmentos de vidrio y roca individuales son de un tamaño de 10 a 20 cm.

Aunque las brechas suevíticas del cráter de Ries son las más conocidas y las más estudiadas, también han sido reconocidas en otras estructuras de impacto, Sin embargo, en muchas de estas estructuras la erosión ha removido a los depósitos de eyecta fuera del cráter. Las brechas suevíticas en general, ocurren sólo en unidades de relleno del cráter, y están asociadas con interestratificaciones de brechas líticas y rocas de impacto; ejemplos de este tipo de brechas se encuentran en: Brent, Canadá (Dence, 1965,1968, Grieve 1978), Rochechovart, Francia (Kraut y French, 1971), Popigai, Rusia, (Masaitis et al., 1998), Manson, Iowa (Koeberl y Anderson, 1996), Gardnos, Noruega (French et al.,1997) Slate Islands, Canadá (Dressler y Sharpton, 1997) y Roter Kamm, Namibia (Reimold et al., 1997).

A pesar de su extensa distribución estas brechas no son encontradas en todas las estructuras de impacto meteorítico, sin embargo, la naturaleza de las rocas de impacto son importantes en la determinación de la formación de suevitas, las cuales han sido observadas en estructuras de impacto formadas en grandes rocas cristalinas silicatadas, posiblemente porque en estas rocas el material fundido produce cuerpos uniformes y resistentes de vidrio. Las brechas que no son suevíticas han sido encontradas en estructuras de impacto en rocas carbonatadas donde la descarbonatación y la pérdida de volátiles serían elementos muy importantes para su estudio.

Brechas con matriz de melt

Las brechas suevíticas en el borde del cráter están asociadas con diferentes tipos de brechas con matriz de roca de fusión (matriz de melt) o brechas "melt de impacto". En estas unidades la roca fundida no se presenta como fragmentos si no como una matriz típica con un 25-75 % de volumen de roca y podría variar de material vídrioso a roca ígnea completamente cristalina. Los fragmentos que consisten de roca encajonante y los minerales, son frecuentemente de material impactado o fundido y forman cuerpos de diferentes tamaños con pequeñas inclusiones de vidrio, con tamaños de decenas de cientos de metros de espesor. Como el componente de roca fundida se incrementa, los demás fragmentos incluidos, cada vez son menores o se encuentran ausentes; estas rocas frecuentemente tienen la apariencia de rocas ígneas convencionales.

De este capítulo se pueden concluir los diferentes criterios para la determinación de las brechas producto del impacto, así como la posición de los materiales en el cráter, por lo que con base en los conceptos antes mencionados y por estudios previos se determinará los tipos de brechas que corresponden al pozo UNAM-5, el cual es uno de los objetivos de este trabajo.

IV. ESTUDIO DEL CRÁTER CHICXULUB

IV.1 Características generales

El Cráter Chicxulub se encuentra localizado en la porción noroeste de la Península de Yucatán (figura 10), se ha logrado documentar su presencia, entre unos 300 y 1100 m de profundidad; el centro aproximado de esta estructura está cercano al puerto de Chicxulub, a unos kilómetros al oriente de Puerto Progreso y por ello se le ha denominado como Cráter Chicxulub.

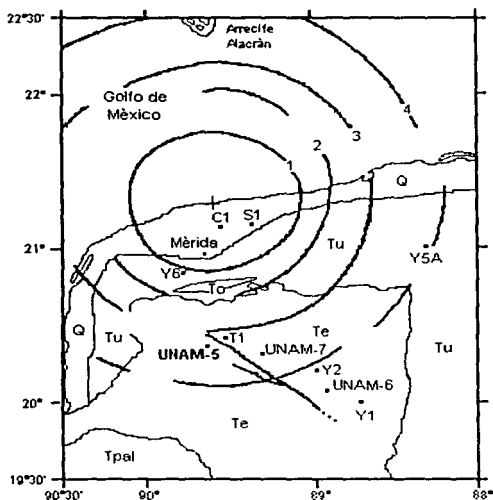


Figura 10. Localidades de los principales pozos perforados en la Península de Yucatán: C1, Chicxulub-1; S1, Sacapuc-1; T1, Ticul-1; Y1, Yucatán-1; Y2, Yucatán-2; Y5A, Yucatán-5A y Y6, Yucatán-6, UNAM-7, UNAM-6, y el UNAM-5, que se encuentra al sur de la estructura 3.5 km al noroeste del pueblo de Santa Elena, entre los anillos 3 y 4 del modelo gravimétrico de Sharpton et al., 1993. Las unidades en superficie son: Q, Cuaternario (< 2 Ma); Tu, Terciario Superior (2 a 35 Ma); Te, Eoceno (35 a 55 Ma) y Tpal, Paleoceno (55 a 65 Ma), (Urrutia et al., 1996a).

Mediante estudios de geofísica realizados por parte de Petróleos Mexicanos (PEMEX) en la década de los cincuenta se reconoció la estructura de Chicxulub. El programa de perforación incluyó ocho pozos exploratorios, que revelaron ocurrencias

inusuales de rocas cristalinas y brechas del Cretácico Superior, pensándose entonces que indicaban un gran campo volcánico (López Ramos, 1979).

A partir de 1980, un grupo de investigadores (Luis Álvarez, Walter Álvarez entre otros), indican que un impacto produjo la extinción masiva en el límite Cretácico-Terciario. Se sugirió que la extinción había sido debida a los efectos de la colisión de un bólido de grandes dimensiones (~10 km de diámetro) con la Tierra, el cual dio lugar a la depositación de una nube de polvo que cubrió el planeta por un periodo de varios años, produciendo efectos globales en el clima y por ende en los organismos al bloquear los rayos solares e interrumpir los procesos de fotosíntesis, dando como resultado efectos mayores en la biosfera.

Morfología del cráter

El cráter Chicxulub se interpreta como un cráter de impacto, basado en el descubrimiento de un modelo concéntrico de anomalías gravimétricas y magnéticas, con una distribución aproximadamente circular, sepultado por una secuencia de carbonatos y evaporitas de edad Cretácica a cuatro km de profundidad (con base en anomalías de Bouguer). El diámetro de la estructura todavía es ampliamente discutido aunque se ha considerado de aproximadamente 180 km (Pilkington et al, 1994).

La estructura se considera como una cuenca multianillada (ver Apéndice 1), de acuerdo a las anomalías que se han determinado por estudios geofísicos, el centro de esta presenta un levantamiento central, el cual aun no se ha logrado definir si se trata de un pico o un anillo de picos característico de las grandes estructuras. Los anillos son reflejados en superficie por un modelo de fracturamiento el cual ha influenciado el flujo del agua subterránea, produciendo así un anillo de cenotes (Pope et al., 1991, Connors et al., 1996).

IV.2 Sistema de documentación digital de núcleos

Uno de los objetivos de este trabajo es presentar y analizar el funcionamiento del equipo de trabajo de documentación digital de núcleos denominado "Core Scanner", el cual es empleado para el análisis de núcleos de pozo de forma automatizada ya que esta diseñado para la obtención de imágenes, el ordenamiento y almacenamiento de la información de los núcleos de la perforación. Esta es una nueva técnica que ya ha sido

utilizada con éxito por compañías petroleras, tal es el caso de AMOCO, sus técnicas consisten en emplear métodos de medida directa en muestras y núcleos, aunque tal vez de una manera un poco rústica, por ser de hecho esta una técnica relativamente nueva.

Este equipo "Core Scanner" se ha comenzado a utilizar en México con las muestras obtenidas de los siete pozos perforados por la UNAM pertenecientes al Programa de Perforaciones del Cráter de Chicxulub. En el presente trabajo, se analizarán las muestras correspondientes a las brechas del pozo UNAM-5 (pertenecientes a dicho proyecto).

El pozo UNAM-5, se encuentra ubicado a 3.5 km al noroeste del pueblo de Santa Elena, al sur de Yucatán, aproximadamente a una distancia radial de 112 km del centro de la estructura del cráter, (en el puerto de Chicxulub), en el sector suroeste de la misma, entre los anillos 3 y 4 propuestos por el estudio de gravimetría (Sharpton et al. 1993), este pozo fue perforado a una profundidad total de 504 m, con una recuperación de 468 m, el número de cajas que se logró almacenar de núcleos para este pozo fue de 156. El pozo interceptó a la brecha de impacto a los 332 m de profundidad de la cual el registro fue continuo hasta los 504 m.

IV.2.1 Descripción del método

El objetivo central de esta técnica es el análisis, caracterización y cuantificación de núcleos. Este sistema está diseñado para la captura de imágenes, el ordenamiento y almacenamiento de los núcleos de la perforación, el cual ha sido adquirido en un convenio por el Instituto de Geofísica de la UNAM y el "Programa Internacional de Perforación Científica Continental" (ICDP). El ICDP es una organización internacional dedicada al estudio de la estructura y dinámica de la corteza y litosfera continental, coordina varios programas internacionales de perforación. El sistema de documentación digital de núcleos fue instalado en un laboratorio del Museo de Geología, del Instituto de Geología, en donde se encuentra la litoteca de los núcleos pertenecientes al Proyecto de Perforaciones del Cráter de Chicxulub.

La función principal es analizar con el "Core Scanner" los núcleos extraídos de las perforaciones, en su mayor parte en forma automatizada para guardarlos en archivos de computadora ordenados en función de la posición relativa en la perforación, lo que permite dar una mayor rapidez y eficiencia a los análisis cuantitativos de cada uno de los pozos a examinar.

El sistema cuenta con cuatro partes fundamentales: Core Scanner y tres sistemas computarizados (figura 12), que serán descritos a continuación.

IV.2.2 Funcionamiento del sistema de documentación digital

a) Core Scanner

Es el componente fundamental del sistema de documentación de núcleos. El equipo Core Scanner registra la imagen superficial del núcleo (figura 11). Presenta las siguientes dimensiones: de largo 1.33 m de alto 1.04 m, esta medida es sin tomar en cuenta la cámara, de la parte superior del mismo; de ancho tiene 55 cm, aunque estas dimensiones pueden variar ligeramente de un modelo a otro. Tiene un peso de 110 kg, aunque existen equipos que son más ligeros en peso pues pesan hasta 65 kg.

El Core Scanner permite obtener un registro y un almacenamiento digital de la superficie (periferia) de todo el núcleo (360°), así como también presenta una imagen a color con una resolución de 24 bits y 5 pixeles/mm de la imagen del núcleo la cual queda registrada en el software anexo. La resolución que se obtiene es mediante dos procesos: una es de 5 pixeles/mm y 127 puntos por pulgada (dpi) a partir del diámetro del núcleo, depende de la rapidez de rotación del mismo y es controlado por la computadora, la segunda es obtenida a lo largo del núcleo y depende de la distancia entre el núcleo y la cámara, (42 cm).

La cámara de registro del equipo se encuentra en la parte superior del mismo, consta de una cámara digital modelo I2S, tiene un lente de 35 mm y cubre rangos entre 400 y 700 nm. En los rodillos del equipo se pueden colocar núcleos con tamaños de hasta 1 m de largo (ya sea circunferencias completas o núcleos cortados por la mitad), el diámetro de los núcleos puede variar hasta 150 mm para núcleos completos y de 300 mm para núcleos a la mitad. Es importante mencionar que si el diámetro del núcleo varía, se debe indicar en el software anexo, para un correcto procesamiento de los datos en el equipo de cómputo.

b) Sistema de cómputo

Este sistema llamado Servidor Core Scanner, (figura 12) es necesario para grabar las imágenes de los núcleos obtenidas, en este también se puede aplicar algunas correcciones a la imagen antes de ser guardadas, así como girar los núcleos de acuerdo

a una orientación específica, para poder almacenar los datos; como son la imagen y lo que corresponden con la profundidad relativa del núcleo de acuerdo a su posición; las imágenes obtenidas son almacenadas en discos (CD-room) con diferentes formatos (BMP, TIF, o JPG) junto con una anotación en formato ASCII, con el mismo nombre del archivo de la imagen.

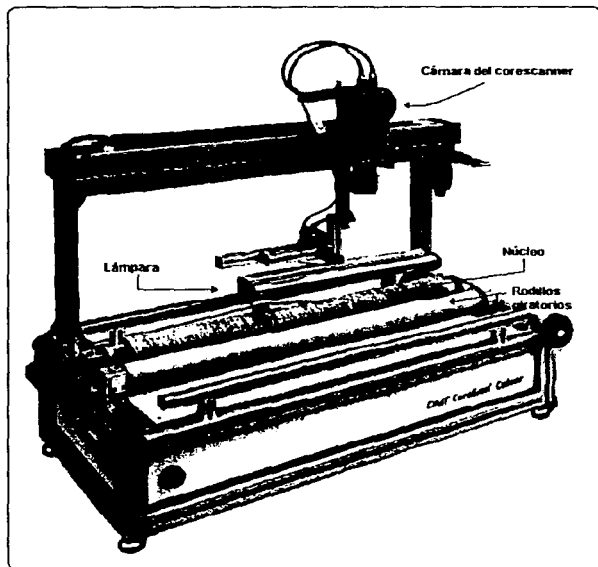


Figura11. Equipo DMT-Core Scanner Colour, actualmente es empleado debido a sus múltiples ventajas, ya que ha demostrado ser más exacto, eficiente y económico en comparación con los métodos convencionales de tratamiento de núcleos.

c) Servidor general

Este sistema es utilizado para almacenar toda la información posible que se ha obtenido de los núcleos, esta totalmente vinculado con la base de datos del DIS del Core Scanner, con una conexión a Internet para que los datos sean enviados cotidianamente a una página Web del proyecto de ICDP. El programa principal cuenta con varios formatos ya establecidos como base de datos, en los que se almacena información como la litología, tamaño de los clastos y origen, así como la información obtenida de las cajas en donde son guardados los núcleos, tales como la profundidad, contenido de corridas de los núcleos por cada caja y la unidad litológica a la que pertenece; permite almacenar la

información sin que exista error de repetición, ya que en dicho caso, el programa automáticamente rechaza la información repetida, incluso si se repite una profundidad o es mal tomada rechaza esa información debido a que las profundidades guardadas son consecutivas de las anteriores, y por lo tanto no guardará datos hasta que la información sea corregida. En el siguiente diagrama (figura 12), se muestra un esquema general de distribución del equipo.

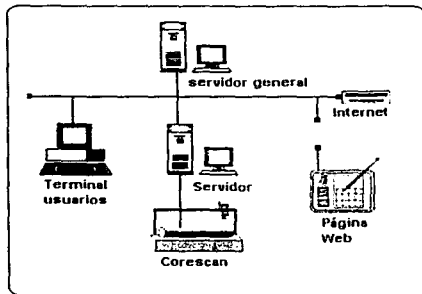


Figura 12. Diagrama de configuración del equipo

IV.2.3 Procesamiento de muestras

Previo a la etapa de procesamiento de muestras, se deben tomar fotografías de todas las cajas de los núcleos que se van a utilizar, para tener un registro general de la ubicación de los mismos, esto es de gran utilidad por si algún núcleo no fuera puesto en su lugar después de haberse hecho la descripción, reduciendo aún la probabilidad de tener errores en el almacenamiento, obteniendo así un archivo general de las muestras.

Los núcleos deben de estar colocados en cajas de una manera sistemática, para ser guardados por orden de profundidad y además deben ser colocados de la parte superior derecha a la parte inferior izquierda de la caja, de la cima a la base del núcleo; de esta manera no habrá posibilidades de equivocarse al ser colocados en el equipo y por tanto serán regresados al sitio donde fueron tomados.

Los núcleos colocados en el Core Scanner deben de estar lo más completo posible ya que si son fragmentos muy pequeños no podrán ser procesados; una vez colocada la muestra, el equipo registrará la imagen de su superficie en la computadora de manera "desenrollada", observándose sus características como granulometría y litología,

de esta manera se pueden archivar con respecto a su profundidad en la base de datos del servidor general.

Como ejemplo, a continuación se presentan tres muestras procesadas y analizadas, correspondientes a las brechas del pozo UNAM-5 estas imágenes representan algunos cambios litológicos a diferentes profundidades, así como también se puede observar claramente la variación del tamaño de grano, lo que nos permite darnos una mayor idea sobre los tipos de brechas que estamos analizando, obviamente este estudio además de realizarse en muestra de mano, también se realizó posteriormente en láminas de sección delgada para hacer una comparación petrográfica de los mismos.

En la figura 13-a se observa una brecha polimíctica, tipo suevítica, bien clasificada con clastos de alrededor de 10 mm, cuya profundidad se registra en el intervalo de 335.79 m - 336.18 m, la muestra 13-b corresponde a una brecha polimíctica, tipo suevítica, mal clasificada con tamaño de clastos de 10 mm a 30 mm cuyo intervalo esta en 342.11 m - 342.33 m y para la muestra 13-c corresponde a una brecha polimíctica, tipo suevítica con clastos de tamaño de 20 mm en una matriz más fina, se encuentra en el intervalo de 355.95 m - 356.55 m.

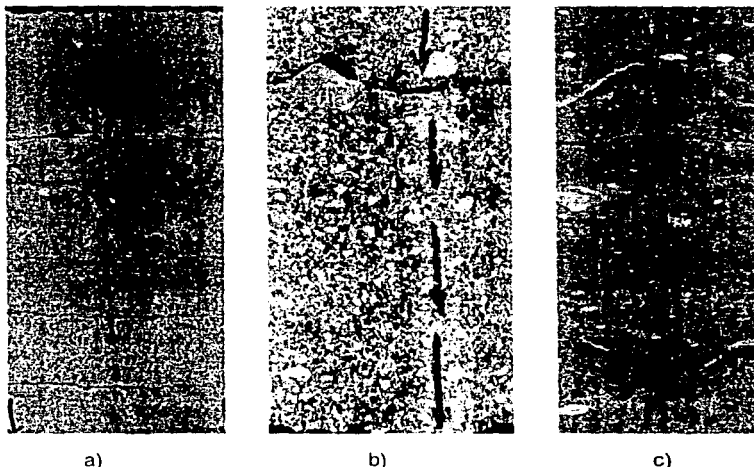


Figura 13. Muestras tipo analizadas por el equipo CoreScanner, donde se observan algunos de los principales cambios litológicos a diferentes profundidades de las brechas pozo UNAM-5, a) Brecha polimíctica bien clasificada con clastos de alrededor de 10 mm, b) Brecha polimíctica mal clasificada con tamaño de clastos de 10 mm a 30 mm, c) Brecha polimíctica con clastos de tamaño de 20 mm en una matriz más fina.

IV.3 Petrografía de las brechas del pozo UNAM-5

IV.3.1 Muestreo

Esta etapa consistió en la obtención de 5 muestras de la brecha del pozo UNAM-5; la columna perforada para este pozo consiste de una capa de suelo de aproximadamente 1 m, seguida por una secuencia de 332.05 m, constituida por calizas cristalinas y dolomitizadas, así como calizas arcillosas alternando con lutitas; en la base de esta secuencia se observan algunos minerales evaporíticos, formando lentes principalmente de anhidrita y yeso.

Le subyace una secuencia de brechas polimícticas a partir de los 332.05 m, hasta los 504 m de profundidad, que es donde termina el pozo (figura 14), cabe aclarar que posiblemente las brechas continúen mucho más abajo pues no se llegó a la base de las mismas, por tanto el espesor presentado (172 m) es relativo. Estas brechas en general presentan partículas de dos tipos de vidrio, uno producto de la roca fundida y otro como vidrio diaplético en cristales de feldespatos los cuales aún conservan su forma original, denominada "masquelinita". Otros tipos de fragmentos son de roca metamórfica posiblemente gneis, fragmentos de rocas ígneas intrusivas y extrusivas, calizas y algunos cristales de cuarzo, feldespatos, cristales de rocas evaporíticas como anhidritas y yeso, (figura 14).

Las muestras seleccionadas corresponden a cada una de las cuatro unidades de la brecha identificadas en los núcleos del pozo UNAM-5.

Para la selección de estas se consideró que deberían presentar la mayor parte de rasgos distintivos de cada unidad, tales como la predominancia de un cierto tipo de partículas, gradación, tipo de matriz, variaciones en color; así como la menor alteración posible para poder realizar una sección delgada de cada una y un estudio petrográfico confiable.

IV.3.2 Metodología

La petrografía consistió en la elaboración de un estudio de tipo petrográfico, para la determinación de las características litológicas de los fragmentos provenientes de las brechas del pozo UNAM-5, por lo que se elaboraron 5 secciones delgadas de los fragmentos de las brechas, las cuales fueron tratadas en el Instituto de Geología y en la Facultad de Ingeniería, de la UNAM. Las descripciones se realizaron en un microscopio

petrográfico, en los laboratorios del Instituto de Geofísica; los resultados y las descripciones serán comentados en el capítulo V de esta tesis.

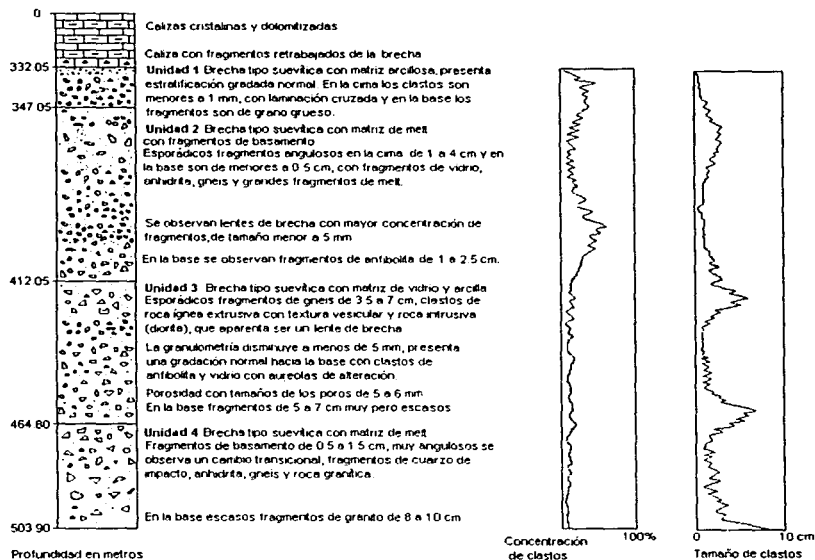


Figura 14. Columna litológica perforada en el pozo UNAM-5, correspondiente a las brechas tipo suevíticas; en la cual se determinaron cuatro unidades fundamentales de brecha. La posición estratigráfica está dada en metros bajo el nivel del terreno.

En la tabla 2 se presenta una lista de las profundidades a las que fueron recuperados los fragmentos representativos de los núcleos del pozo UNAM-5, utilizados en el presente estudio, a partir de los cuales se realizaron los estudios petrográficos correspondientes.

Tabla 2. Muestra las muestras del pozo UNAM-5 con respecto a su profundidad

POZO UNAM-5	
No. muestra	Profundidad (m)
M-1	335.35 - 336.05
M-3	371.36 - 372.26
M-5	414.93 - 415.28
M-7	453.01 - 453.71
M-9	483.23 - 483.88

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

IV.4 Características de las brechas de otros cráteres

A continuación se hará un breve resumen de las características de dos de los cráteres más estudiados en el mundo, resaltando los rasgos más importantes, como las estructuras de impacto, dando un mayor énfasis a las brechas de impacto de los mismos, con el objetivo de poder determinar similitudes y diferencias con las brechas reconocidas en el Cráter Chicxulub, ya que esto será de gran trascendencia para determinar su origen así como otros factores.

IV.4.1 Cráter del Ries

El cráter del Ries, ubicado al sur de Alemania, con coordenadas 48°53'N y 10°37'E, tiene un diámetro de 24 km y una edad de 25 Ma, por lo que ha sido poco erosionado; los grandes depósitos de eyecta alrededor del cráter, así como los de las brechas dentro del cráter mismo, han sido protegidas de la erosión debido a que se encuentran cubiertos por depósitos lacustres posteriores al impacto.

Estratigráficamente el cráter se encuentra en una secuencia sedimentaria compuesta que va desde un basamento cristalino denominado Granito Variscan, le sobreyace un evento sedimentario compuesto de areniscas y limolitas que van desde el Triásico Inferior hasta el Jurásico Medio, sobre este se encuentra una capa de calizas hasta el Jurásico Medio, cubriendo a la secuencia una capa de arenas margas y arcillas del Mioceno Medio, (Von Engelhardt, 1990).

Con respecto a los estudios de las brechas de este cráter, se han documentado dos tipos de formaciones de impacto; usando la clasificación de Stöffler (1974), (Tabla 3), se pueden distinguir dos formaciones de eyecta: una de bajo nivel de impacto (< 10 GPa), en donde se encuentra la Brecha Bunte y otra de alto nivel de impacto (> 10 GPa), en donde se encuentra la Brecha Suevítica.

Brecha Bunte

Es la más extensa formación de impacto por volumen y área, los componentes de esta brecha son: fragmentos de minerales y rocas derivados de rocas del basamento, así como sedimentos consolidados y no consolidados de la roca de impacto, y material no consolidado de áreas locales. La textura de estas brechas es caótica y no muestra clasificación en el tamaño de grano; los clastos de roca individual, de arenas, arcillas y

calizas margosas están por encima a varios metros en una matriz de grano fino, los fragmentos son angulares con bordes redondeados. Esta brecha se extiende hacia el sur del Valle Danubio a 30 km del centro del cráter, teniendo un espesor de 50 a 100 km. Su distribución es asimétrica alrededor de la cuenca extendiéndose más lejos al sur y al este. En fragmentos de rocas sedimentarias no han sido observados efectos de impacto, lo que muestra que la columna sedimentaria no fue afectada por presiones de impacto mayores a 10 Gpa; sin embargo, en fragmentos de rocas ígneas cristalinas se han encontrado rasgos de impacto de los estados 0, I, II de metamorfismo de impacto, como estructuras de conos estriados (Tabla 3).

Brecha Suevita

Estas brechas polimícticas de grano fino, contiene bombas de vidrio (vítreo o cristalizado), fragmentos de roca cristalina, en todos los estados de metamorfismo y algunos fragmentos de rocas sedimentarias. Se encuentran diminutas partículas de vidrio angulosas con pequeños cuerpos esferoidales, algunos vidrios y otros con cóndrulos de textura cristalina. Se han encontrado fragmentos de gneis de biotita y plagioclasa, ortogneis, anfíboles, gneis milonítico, fragmentos de rocas ígneas intrusivas como granitos y granodioritas, se ha considerado un 52 % para rocas metamórficas y un 48 % para rocas ígneas (Von Engelhardt, 1997). La abundancia de los clastos de alto estado de impacto se incrementa sistemáticamente al aumentar la distancia radial del cráter.

Tabla 3 Indica los estados de metamorfismo, establecidos por Söffler en 1974

Estado	Efectos de impacto	Presión de impacto (Gpa)	Temperatura (°C)
0	Fragmentación, mosaiquismo, extinción ondulante, bandas de deformación de cuarzo, conos estriados, bandeamiento en biotita (Kink bands).	< 10	< 100
I	Deformación planar laminar en cuarzo, feldspatos, anfíboles, piroxenos, Stishovita, coesita, kink bands en biotita	10-35	100-300
II	Vidrio diapléctico de cuarzo y feldspatos, deformación planar y laminar en cuarzo y feldspatos.	35-45	300-900
III	Feldespato alcalino fusionado selectivamente, cuarzo diapléctico, descomposición termal de biotita y anfíboles.	45-60	900-1300
IV	Completa fusión de rocas de composición granítica- granodiorítica, melt	60-80	1300-3000
V	Vaporización	> 80	> 3000

IV.4.2 Cráter de Sudbury

La estructura de Sudbury en el sur de Ontario Canadá, es considerada una cuenca de impacto multianillada (Heymann, 1999) con una edad de 1850 ± 3 Ma, con un diámetro estimado de ~ 180 - 250 km (Grieve, 1992). En el norte esta caracterizada por rocas arqueanas compuestas de granitos gneises y migmatitas, al sur se encuentran rocas proterozoicas que consisten de sedimentos metavolcánicos y metasedimentarios. La parte interna de la estructura esta caracterizada por un complejo ígneo de 1.85 G.a (Müller - Mohr, 1992), denominado como el "Complejo Ígneo de Sudbury".

Cerca del margen de la cuenca las rocas, principalmente graníticas han sido localmente estriadas y brechadas, formando una unidad compleja conocida como Brecha de Sudbury. Esta secuencia de brechas que subyacen al Complejo Ígneo, tiene un espesor de 1800 m. Denominada como la Formación Onaping, están subdivididas en cuatro miembros: el Miembro Basal de matriz ígnea, el Miembro Gray de brechas tipo suevíticas polimícticas, el Miembro Green y el último, el Miembro Black, formados por brechas con material retrabajado. A continuación se dará una descripción de cada uno de los miembros en orden ascendente.

El Miembro Basal esta compuesto de una brecha polimíctica de roca fundida de 300 metros de espesor, (Avermann M. y Brockmeyer P., 1992). Consiste principalmente de metasedimentos; el contenido de los fragmentos va de 80 a 90 % y su tamaño varía entre unos cuantos milímetros a 80 metros de diámetro, algunas veces se encuentran bien clasificados, debido a condiciones de alta temperatura muchos de los fragmentos son corroídos o disgregados, por lo que las características del metamorfismo de impacto han sido borradas. Tiene una matriz cristalina con feldespatos, piroxenos, plagioclasas, cuarzos y pseudomorfos del cuarzo, con texturas granofíricas, estas texturas indican la cristalización para un fragmento de roca fundida.

El Miembro Gray, con 300 a 500 metros de espesor, (Avermann M. y Brockmeyer P., 1992) esta compuesto por una brecha suevítica, los clastos son de roca del basamento y presenta recristalizaciones, inclusiones de roca fundida de formas irregulares, los fragmentos son frecuentemente corroídos, deformados plásticamente o muestran bordes de reacción y relleno de vesículas con productos de alteración. Los fragmentos del basamento varían en tamaño y son compuestos de metasedimentos y en menor cantidad se presentan los de tipo cristalino; los cuerpos de brechas dentro de las brechas mismas y los contactos internos observados proporcionan evidencias de

movimientos turbulentos durante el emplazamiento del segundo miembro. Principalmente esta brecha se compara con la brecha suevítica del cráter del Ries (descrito anteriormente), estas brechas son encontradas dentro y fuera de las depresiones centrales, en cambio, las brechas alóctonas del Sudbury, son sólo preservadas en la parte central del cráter.

El tercer miembro, el Miembro Green se considera una brecha uniforme única con respecto a otras estructuras, tiene un espesor de 50 metros (Avermann M. y Brockmeyer P., 1992) el contacto entre este y el miembro anterior es de gradacional a anguloso. Tiene una matriz microcristalina con abundantes cavidades rellenas por minerales secundarios como clorita, presenta un incremento en el porcentaje de matriz y un decremento en las inclusiones de roca fundida con respecto al miembro anterior; el contenido de partículas cloritizadas ha sido interpretado como una transición entre el miembro dos y el miembro cuatro, (Muir y Peredery, 1984).

Esta brecha es interpretada como el comienzo de un aglomerado de brecha de material de grano fino que fue afectado por altas temperaturas durante el depósito. La abundancia de fragmentos de roca altamente impactados sugieren un origen por excavación y posteriormente se depositó como una brecha externa para altos niveles atmosféricos.

La parte más alta de la formación llamada Miembro Black, consiste de dos diferentes brechas. En la parte baja del miembro de 100 a 150 metros de espesor esta compuesto de una brecha suevítica, con pequeños fragmentos de roca del basamento, inclusiones de roca fundida y cavidades cloritizadas; en la parte superior con un espesor de 800 m, esta dominado por fragmentos líticos y fragmentos de vidrio alterado, que presenta un incremento en el contenido de carbón, contenidos en una matriz clásica oscura. Además el material retrabajado de esta parte de la brecha y las estructuras sedimentarias indican que el miembro superior fue originado como un material producto de derrumbes que originalmente estaba depositado fuera de la depresión central del cráter (Avermann M. y Brockmeyer P., 1992).

Con base en las características de los cráteres antes mencionados podremos dar en el siguiente capítulo, una descripción más detallada para las brechas de nuestro estudio, tomando en cuenta parámetros de las brechas de estos cráteres, así como sus estudios realizados ya hace varios años.

V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta los resultados de las muestras procesadas por el equipo "Core Scanner", así como la petrografía de algunas de las muestras, los resultados son los siguientes:

V.1 Resultados del equipo de imágenes digitales de alta resolución

Se tomaron nueve muestras representativas de las brechas para demostrar las ventajas y tipo de descripción de los núcleos. Las muestras abajo mostradas comienzan a partir de los 334 metros a los 360 metros de profundidad, se muestra la escala gráfica representativa para cada una de estas, así como el diámetro de la muestra y su perímetro ya que la imagen muestra totalmente la periferia del núcleo.

En estas muestras se puede observar claramente algunas características megascópicas que presentan las brechas del pozo en estudio; también se pueden observar las variaciones granulométricas que sufrió la brecha durante el depósito, así como la formación de algunos lentes de brecha.

El procesamiento de las muestras nos ha llevado a facilitarnos el estudio de ellas mediante la descripción megascópica, así como la fácil localización con respecto a la profundidad a la que se encuentran, por lo que se tiene un control sobre los cambios y rasgos más característicos que han sufrido las brechas durante el depósito y sepultamiento, tomando en cuenta las profundidades de cada fragmento que se está analizando en el momento, sin tener que recurrir a las muestras de mano y así optimizar mejor el tiempo. Cabe mencionar que este trabajo se puede llevar a cabo en el lugar del sitio de perforación una vez que las muestras hayan sido extraídas del pozo.

En las siguientes páginas se dará la descripción megascópica que se obtuvo de las siguientes muestras:

DMT Core Scanner Colour		Imagen digitalizada	
Compañía: ICDP		Fecha:	
Localidad: Puerto de Santa Elena		Pozo: UNAM-5	
Geólogo: Elia Escobar		Revisado por:	
Número de caja: 99	Corrida: 1	Intervalo: 334-334.55 m	
Diámetro del núcleo: 3.5 cm		Perímetro (longitud horizontal de la imagen): 11 cm	



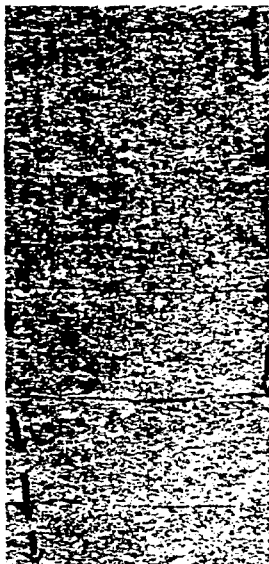
Fragmento de núcleo de color verde oscuro con fragmentos de rocas carbonatadas con tamaños de unos cuantos milímetros a 3 cm, uno que otro clasto de cuarzo, vidrio, fragmentos de rocas clásticas, embebidos en una matriz arcillosa, el núcleo es muy disgregable al tacto.

El porcentaje de fragmentos grandes y alargados es de 10 %

En la base de este se observan algunas vetas de recristalización de calcita.

Formato: BMP	Muestra: M1
Resolución: 5 pix/mm	Color: 24 bits
Escala: gráfica	

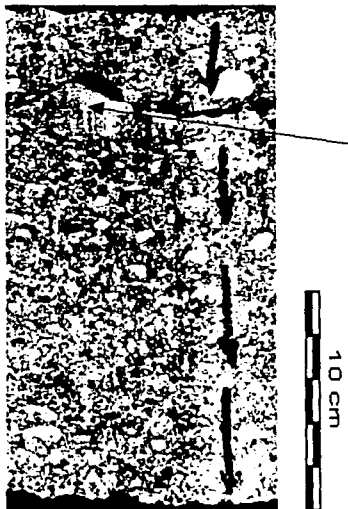
DMT Core Scanner Colour		Imagen digitalizada	
Compañía: ICDP		Fecha:	
Localidad: Puerto de Santa Elena		Pozo: UNAM-5	
Geólogo: Elia Escobar		Revisado por:	
Número de caja: 101	Corrida: 2	Intervalo: 340-341.51 m	
Diámetro del núcleo: 3.5 cm		Perímetro (longitud horizontal de la imagen): 11 cm	



Fragmento de núcleo de color verde olivo claro, con abundante concentración de fragmentos de aproximadamente el 95 %; se observa una uniformidad en el tamaño de los clastos, que son de subredondeados a subangulosos en una matriz verde, clástica de 5 %, con fragmentos de cuarzo, fragmentos de rocas evaporíticas y carbonatadas, los tamaños son de menores a 5 mm.

Formato: BMP	Muestra: M16
Resolución: 5 pix/mm	Color: 24 bits
Escala: gráfica	

DMT Core Scanner Colour		Imagen digitalizada	
Compañía: ICDP		Fecha:	
Localidad: Puerto de Santa Elena		Pozo: UNAM-5	
Geólogo: Elia Escobar		Revisado por:	
Número de caja: 102	Corrida: 2	Intervalo: 342.11-342.33 m	
Diámetro del núcleo: 3.5 cm		Perímetro (longitud horizontal de la imagen): 11 cm	

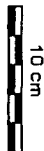


Núcleo de color verde olivo claro, la gradación de los fragmentos aumenta, encontrándose clastos grandes de basamento, no existe buena clasificación.

El tamaño de los clastos varía de 1 a 2 cm, encontrándose sólo un clasto de 3 cm como el que se puede observar; son mal clasificados y la angulosidad de los clastos es de redondeada a angulosa. Presenta alto contenido de fragmentos de vidrio que son los que se observan de color verde y clastos de roca metamórfica posiblemente gneis en menor abundancia, clastos de cuarzo y fragmentos de rocas evaporíticas, la composición de la matriz al parecer es arcillosa.

Formato: BMP	Muestra: M18
Resolución: 5 pix/mm	Color: 24 bits
Escala: gráfica	

DMT Core Scanner Colour		Imagen digitalizada	
Compañía: ICDP		Fecha:	
Localidad: Puerto de Santa Elena		Pozo: UNAM-5	
Geólogo: Elia Escobar		Revisado por:	
Número de caja: 103	Corrida: 2	Intervalo: 346.65-347.05 m	
Diámetro del núcleo: 3.5 cm		Perímetro (longitud horizontal de la imagen): 11 cm	



Núcleo de color verde olivo oscuro, se observa un cambio de color en la matriz siendo está de color más oscuro, con un porcentaje de 65%, mucho mayor que en los anteriores, así como el porcentaje de clastos también disminuye notablemente que es de 35%.

Los fragmentos son de angulosos a subangulosos, algunos con tamaños de 4 cm, predominando los de 1 a 2.5 cm. Se puede observar algunos rasgos de fluidez en algunos clastos así como una ligera alineación.

Formato: BMP	Muestra: M26
Resolución: 5 pix/mm	Color: 24 bits
Escala: gráfica	

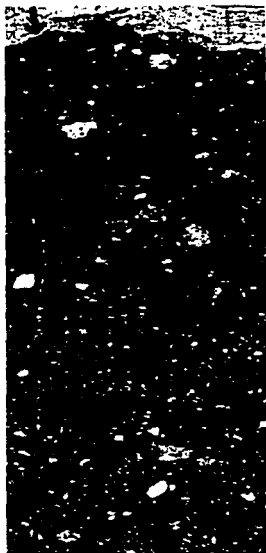
DMT Core Scanner Colour		Imagen digitalizada	
Compañía: ICDP		Fecha:	
Localidad: Puerto de Santa Elena		Pozo: UNAM-5	
Geólogo: Elia Escobar		Revisado por:	
Número de caja: 104	Corrida: 3	Intervalo: 348.25-348.92 m	
Diámetro del núcleo: 3.5 cm		Perímetro (longitud horizontal de la imagen): 11 cm	



Fragmento de núcleo de color verde olivo oscuro, con notable textura fluidal, la mayoría de los clastos tienden a ser alargados horizontalmente en forma alineada; el tamaño de los clastos es muy variable. El porcentaje de los clastos disminuye en comparación de la muestra anterior. Se encuentran fragmentos de roca ígnea extrusiva de color rojo con aparente foliación, fragmentos de vidrio de color verde con aureola de alteración, como el que se observa formando un pequeño lente, fragmentos de roca fundida, rocas carbonatadas y evaporíticas aproximadamente de 2 cm.

Formato: BMP	Muestra: M29
Resolución: 5 pix/mm	Color: 24 bits
Escala: gráfica	

DMT Core Scanner Colour		Imagen digitalizada	
Compañía: ICDP		Fecha:	
Localidad: Puerto de Santa Elena		Pozo: UNAM-5	
Geólogo: Elia Escobar		Revisado por:	
Número de caja: 105	Corrida: 3	Intervalo: 351.26-351.81 m	
Diámetro del núcleo: 3.5 cm		Perímetro (longitud horizontal de la imagen): 11 cm	



Fragmento de núcleo de color verde olivo de tono más claro al anterior, se observa una clara disminución en tamaño de los clastos presentando un porcentaje de 15%, con variaciones de tamaño de milímetros a 4 centímetros, los fragmentos de gneis comienzan a ser más abundantes, como el que se observa; presenta fragmentos de cuarzo, de melt y vidrio, así como de rocas clásticas, en una matriz arcillosa con un 85%.



Formato: BMP	Muestra: M35
Resolución: 5 pix/mm	Color: 24 bits
Escala: gráfica	

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

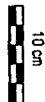
DMT Core Scanner Colour		Imagen digitalizada	
Compañía: ICDP		Fecha:	
Localidad: Puerto de Santa Elena		Pozo: UNAM-5	
Geólogo: Elia Escobar		Revisado por:	
Número de caja:	Corrida: 3	Intervalo:	352.99-353.60 m
Diámetro del núcleo: 3.5 cm		Perímetro (longitud horizontal de la imagen): 11 cm	



Fragmento de núcleo de color verde olivo a pardo, en la cima se observan partículas muy finas, siendo de hasta unos cuantos milímetros, embebido en esto se observa un fragmento de melt de gran tamaño, muy amorfo de color café oscuro.

Aquí se puede observar un contacto gradacional, en donde el tamaño y la concentración de las partículas aumenta, lo que posiblemente indicaría movimientos turbulentos. Los fragmentos son mal clasificados, con escasos clastos de tamaño entre 1 y 2.5 cm con menor cantidad de matriz, aproximadamente de 10%.

En la base se comienza a formar una gradación normal.



Formato: BMP	Muestra: M38
Resolución: 5 pix/mm	Color: 24 bits
	Escala: gráfica

DMT Core Scanner Colour		Imagen digitalizada	
Compañía: ICDP		Fecha:	
Localidad: Puerto de Santa Elena		Pozo: UNAM-5	
Geólogo: Elia Escobar		Revisado por:	
Número de caja: 106	Corrida: 3	Intervalo: 354.18-354.77 m	
Diámetro del núcleo:		Perímetro (longitud horizontal de la imagen): 11 cm	



Fragmento de núcleo de color pardo verdusco, se puede observar una constante variación en la concentración de clastos, lo que podría indicar un contacto entre una subunidad, ya que el tamaño de las partículas varía de unos cuantos milímetros a 2 cm máximo.

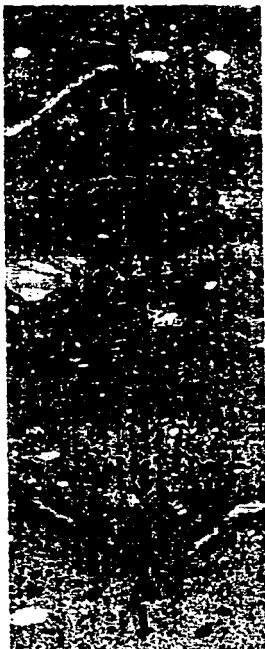
Se observa un incremento de clastos hacia la parte media del núcleo, lo que parece ser un lente de la brecha, dentro de la brecha misma, los fragmentos son de melt, vidrio, rocas con texturas graníticas, así como bordes de reacción en algunos de los clastos y fragmentos de rocas evaporíticas. En la base de este lente se observan, fragmentos de rocas evaporíticas con tamaños de 1.5 cm hasta 2.5 cm.

Aproximadamente a los 345.60 m, se observa una disminución de clastos incrementando notablemente la matriz, con algunos fragmentos de melt.



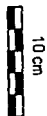
Formato: BMP	Muestra: M42
Resolución: 5 pix/mm	Color: 24 bits
Escala: gráfica	

DMT Core Scanner Colour		Imagen digitalizada	
Compañía: ICDP		Fecha:	
Localidad: Puerto de Santa Elena		Pozo: UNAM-5	
Geólogo: Elia Escobar		Revisado por:	
Número de caja: 107	Corrida: 3	Intervalo: 355.95-356.55 m	
Diámetro del núcleo:		Perímetro (longitud horizontal de la imagen): 11 cm	



Fragmento de núcleo de color verde a pardo, en el que se observan variaciones de clastos de diferentes tamaños y más concentrados que en los anteriores; se pueden observar algunos clastos redondeados con otros angulosos. En general se podría decir que presentan una granulometría uniforme aunque presenta fragmentos de melt de mayor tamaño, pero estos no son tan angulosos como los anteriores.

Se observa un clasto de tamaño mayor (2.5 cm), al parecer es de roca evaporítica, en general se observa una rasgos de fluidez, con fragmentos de melt, anhidrita, cuarzo y algunos fragmentos de gneis.



Formato: BMP		Muestra: M45	
Resolución: 5 pix/mm	Color: 24 bits	Escala: gráfica	

V.2 Resultados de petrografía

Tabla 4 Tipos de brechas del pozo UNAM-5

No. muestra	Clasificación
M-1	Brecha tipo suevítica con matriz arcillosa
M-3	Brecha tipo suevítica con matriz de melt
M-5	Brecha tipo suevítica con matriz vítrea
M-7	Brecha tipo suevítica con matriz arcillosa
M-9	Brecha tipo suevítica con matriz de melt

A partir de la petrografía podemos darnos cuenta que a pesar de que en las secciones delgadas estudiadas tenemos una brecha característica, la cual es la brecha tipo suevítica, es importante darle diferentes divisiones, debido a sus variadas características, de acuerdo a su composición mineralógica y de matriz, etc. En las brechas analizadas debido a los cambios gradacionales, se observó que existieron movimientos turbulentos en su depositación, así como los procesos de metamorfismo de impacto ocurridos, ya que tenemos procesos de deformación planar, en más de tres direcciones, mosaiquismo e isotropismo generalmente, el cual este último proceso, fue el que más se pudo observar, en cristales de feldespato potásico y cuarzo, un gran número de inclusiones de minerales con deformación plástica y alineamiento al formar una estructura de flujo. Otra de las características importantes en el estudio de estas secciones ha sido la composición de vidrios heterogéneos de clastos de minerales en bandas de flujo pardo, (por lo que se recomienda emplear otros métodos para su estudio), estos pueden ser observados en las muestras de suevitas con matriz de roca fundida. Al final de la columna se puede observar el proceso de fundición de la roca el cual se incrementa considerablemente ya que en la muestra de sección delgada (M-9), podemos ver un alto contenido de roca fundida mayor que en las anteriores.

Todo esto en su conjunto nos llevó a definir diferentes tipos de brechas, por ejemplo las variaciones composicionales y granulométricas, las cuales son importantes para definir las condiciones en las que se formaron.

A continuación veremos los resultados petrográficos a los que se llegaron con las muestras analizadas.

Análisis de muestras

Muestra : M-1

Textura: granoblástica, granolepidoblástica

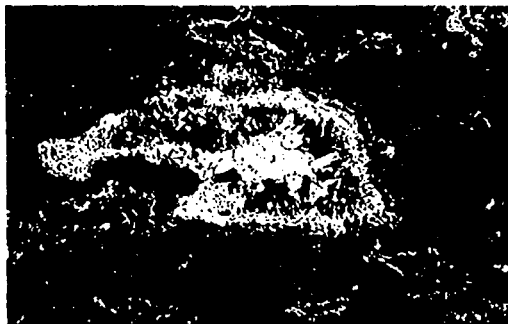
Selección: mal seleccionada

Clasificación: mal clasificada

Redondez: de subredondeado a anguloso

Porosidad: nula

Tipo de matriz: arcillosa 45%



10x con luz polarizada

Porcentaje y tipo de clastos:

Fragmentos de vidrio 20%	Micas de moscovita: 1 %
Feldespatos: 10%	Cuarzo: 7%
Fragmentos de roca metamórfica: 5%	Anhidrita: 9%
Fragmentos de roca ígnea: 3%	

Tipo de brecha: Brecha tipo suevítica con matriz arcillosa

Observaciones:

La sección delgada presenta cristales aislados de feldespato en una matriz micrítica, algunos clastos de vidrio se presentan como islas en la matriz con bordes de reacción alrededor, sufriendo una recristalización interna, en otros casos se presentan con esferulitas. Se observaron dos tipos de fragmentos de roca uno con textura foliada posiblemente un gneis con feldespatos y cuarzo altamente fracturados y otro fragmento con características de roca ígnea extrusiva ya que presenta una matriz afanítica de composición ácida; algunos cuarzos son subredondeados y otros ligeramente isotropizados, todos se encuentran embebidos en una matriz arcillosa. Se observó también un sólo foraminífero, por lo que no se puede hablar más sobre su origen, posiblemente existan otros fósiles ascendiendo en la columna. La anhidrita presente se encuentra diseminada en la matriz así como rellenando fracturas y oquedades.

Análisis de muestras

Muestra : M-3

Textura: granoblástica, vitrofídica

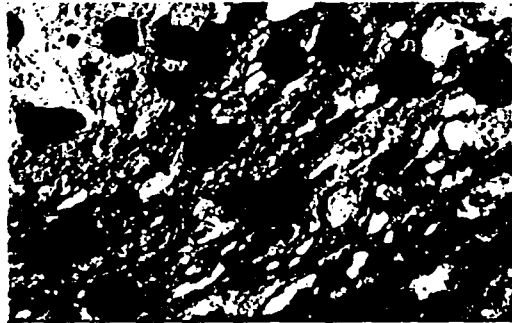
Selección: mal seleccionada

Clasificación: mal clasificada

Redondez: muy anguloso

Porosidad: nula

Tipo de matriz: melt 32%



10x, con luz paralela

Porcentaje y tipo de clastos:

Feldespatos potásicos (ortoclasa): 3%	Melt de impacto: 40%
Cuarzo: 2%	Vidrio 8%
Fragmentos de roca intrusiva: 9%	Fragmentos de roca extrusiva 1%
Fragmentos de rocas metamórficas: 3%	Plagioclasas: 2%

Tipo de brecha: Brecha tipo suevítica con matriz de melt

Observaciones:

Se observan clastos de cuarzo muy anguloso, y vidrio diaplético (posiblemente masquelinita), producto de los feldespatos, en el vidrio se observa una desvitrificación por lo que presenta una gran cantidad de esferulitas, todo este vidrio es de color café, se encuentran inclusiones de roca intrusiva compuesta de feldespatos potásicos de contactos muy afilados en la roca fundida, las rocas al parecer extrusivas presentan bordes de reacción en una matriz arcillosa. Los clastos de rocas intrusivas son muy escasos, así como los fragmentos de gneis parcialmente isotropizados. La anhidrita se encuentra relleno de oquedades.

Análisis de muestras

Muestra M-5

Textura: granoblástica, microcristalina
Selección: mal seleccionada
Clasificación: mal clasificada
Redondez: subredondeado a muy anguloso
Porosidad: nula
Tipo de matriz: vidrio 40%



10x con luz polarizada

Porcentaje y tipo de clastos:

Fragmentos de gneis: 15%	Cuarzo: 5%
Yeso: 5%	Fragmentos de roca fundida: 16%
Anhidrita: 7%	Oxidos de hierro: 2%
Vidrio: 10%	

Tipo de brecha: Brecha tipo suevítica con matriz vítrea

Observaciones:

Los fragmentos de gneis se encuentran más isotropizados que en la muestra anterior, constituida por feldespatos principalmente potásicos (ortoclasa) con rasgos planares de deformación en tres direcciones, así como también se observa un mosaiquismo, otros minerales constituyentes son: cuarzo y algunos cristales pequeños de anhidrita relleno de oquedades, formando amigdalas y algunos óxidos de hierro y minerales máficos, anhedrales; en otro fragmento se observan cristales de yeso en una matriz de anhidrita, las cantidades de roca fundida se han incrementado, siendo este de color café, presenta algunos clastos muy redondeados de minerales carbonatados; embebidos en una matriz vítrea-arcillosa. En general se observa una tendencia fluidal en los clastos.

Análisis de muestras

Muestra M-7

Textura: granoblástica, glomeroporfírica

Selección: mal seleccionada

Clasificación: mal clasificada

Redondez: muy angulosa

Porosidad: 5%

Tipo de matriz: arcillosa 43%



10x con luz polarizada

Porcentaje y tipo de clastos:

Feldespatos: 2%	Yeso: 7%
Vidrio: 15%	Anhidrita 3%
Cuarzo: 5%	Fragmentos de melt: 20%
Anfiboles: 5%	

Tipo de brecha: Brecha tipo suevítica con matriz arcillosa

Observaciones:

Generalmente los clastos se encuentran cubiertos por la matriz difícil de distinguir. Se observan un fragmento grande de cristales de yeso en una matriz de anhidrita, producto de una recristalización posterior, en la muestra se encuentran algunas vacuolas consideradas como poros de aproximadamente el 5%, y en otras de estas mismas se encuentran recristalización de vidrio, con bordes de reacción así como vidrio diaplético en una matriz arcillosa de color parda. Los feldespatos son cada vez más isotropizados que en las muestras anteriores, lo cual podría decir que hubo un mayor efecto de metamorfismo de impacto en estos últimos.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Análisis de muestras

Muestra M-9

Textura: vitrofídica

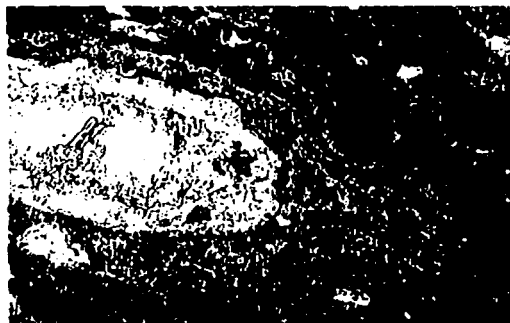
Selección: mal seleccionada

Clasificación: mal clasificada

Redondez: angulosa

Porosidad: 3%

Tipo de matriz: melt 67%



10x con luz polarizada

Porcentaje y tipo de clastos:

Fragmentos de roca máfica: 5%	
Vidrio 25%	
Cuarzo: 1%	
Feldespatos 2%	

Tipo de brecha: Brecha tipo suevítica con matriz de melt

Observaciones:

En la muestra se observan cavidades rellenas por minerales secundarios y vesículas, aquí se puede observar la abundancia de clastos altamente impactados y fundidos, ya que la mayor cantidad de material la matriz esta compuesta de melt de impacto de color café, que cubre a la roca, mostrando condiciones de flujo turbulento, los fragmentos son muy angulosos. Se puede decir que en esta parte de la brecha los fragmentos de roca, ya han sido altamente impactados y fundidos casi al mismo momento, por lo que raramente se encuentran rasgos planares de deformación u otros efectos.

V.3 Características de las brechas

El estudio de las brechas polimícticas que se dará a continuación comienza a partir de los 332.05 m hasta los 504 m, lo cual representaría un espesor de 172 m, cabe observar que el espesor es considerado incompleto, ya que es donde termina el pozo UNAM-5 y posiblemente el espesor de brechas continúe. A pesar de que las brechas aquí descritas constituyen en su conjunto un solo tipo de brecha polimíctica, ha sido necesario clasificarlas en cuatro unidades diferentes ya que cada una de ellas representan variaciones gradacionales y con respecto a su matriz, composicionales así como la concentración de clastos que las forman; por lo que se determinaron las siguientes cuatro unidades de brecha, considerando cambios litológicos, gradacionales y cambio de coloración en la matriz.

UNIDAD 1

La unidad comienza a partir de los 332.05 m hasta los 347.05 m, con un espesor de 15 metros; es una brecha tipo suevítica con matriz arcillosa, en general presenta un color gris verdoso claro en la cima y oscuro en la base, con textura granoblástica. Se observan cambios gradacionales que van de fino a grueso, conforme se desciende en la unidad, por lo que se ha dividido en dos diferentes brechas tipo suevíticas.

En la parte superior presenta clastos con tamaños de arenas finas con matriz calcárea a arcillosa, estructuras sedimentarias como laminación cruzada, presenta fragmentos de roca foliada, posiblemente gneis y roca ígnea extrusiva de composición ácida y textura completamente afanítica, sin foliación, alto contenido de vidrio con bordes de reacción. En algunos fragmentos de vidrio, se observan dichos bordes con recristalización interna en una matriz micrítica, por lo que se puede deducir que se trata de una brecha tipo suevítica con matriz arcillosa y fragmentos líticos. Descendiendo en la unidad a los 333.85 metros considerándola una subunidad, en la cual se presenta un contacto gradacional, ya que aparecen esporádicos fragmentos subredondeados a angulosos de cuarzo y feldespatos potásicos, por petrografía se encuentran ligeramente isotropizados con tamaños de 50 mm, aumentando el contenido de clastos en un 70 % con 30 % de matriz; en la base de la unidad, los fragmentos se tornan más angulosos, con fragmentos que van de a 5 mm hasta 1 cm, existe un incremento en el contenido de vidrio en un 35 %, contiene además fragmentos de calizas, anhidrita vidrio de color verde de varios tamaños y fragmentos de roca fundida de color pardo.

UNIDAD 2

Esta brecha que subyace a la anterior comienza a partir de los 347.05 m hasta los 412.05 m, tiene un espesor de 65 metros, se le ha denominado brecha tipo suevítica con matriz de melt. Para esta unidad el color varía de gris claro a gris pardo hacia la base. En la cima se observan fragmentos que van de angulosos a subangulosos con fragmentos escasos pero de gran tamaño que van de 10 a 40 mm, en un 15 % en relación con la matriz calcárea de color gris; presenta un fragmento de vidrio de color verde oscuro de 5 cm de largo con aureola de alteración de color más claro, además de esto también se observan fragmentos de anhidrita, vidrios diapléticos, muy angulosos y fragmentos de roca ígnea intrusiva con tonalidades rojizas y aparente foliación. A partir de los 373 m los fragmentos disminuyen en tamaño (menores a 20 mm), aunque predominan los que son menores a 5 mm, la brecha de esta zona contiene un 30 % de los fragmentos con mayor contenido de vidrio de color verde, pero contienen también fragmentos de roca ígnea de color rojizo con un grado de redondez de subanguloso a subredondeado pero escasos y fragmentos de roca metamórfica del basamento, la matriz es de color gris verdoso hacia a la base, se observan fragmentos de granitos muy deformados con tamaños de 8 cm, muy esporádicos con características de fusión parcial. Descendiendo de la unidad aparecen algunos lentes de brecha, como por ejemplo a los 403 m aparece un lente de 1.5 m con partículas muy finas las cuales se pierden en una matriz vítrea de color parda. Ya en la base se observan fragmentos de roca metamórfica de anfíbolita.

UNIDAD 3

La brecha comienza a partir de los 412.05 m a los 464.8 m, con un espesor de 52 metros. Esta compuesta por dos tipos de brechas a partir de la petrografía denominándolas como brecha tipo suevítica con matriz vítrea y arcillosa. Para la brecha de matriz vítrea, el color es de verde claro a pardo. Desde el comienzo de la unidad hasta los 418 m se observa una concentración de fragmentos con tamaños de 3.5 cm a 7 cm, clasificados como gneis con rasgos de isotropismo, mosaiquismo y rasgos planares de deformación en el cuazo y feldespatos, presenta posibles fragmentos de roca ígnea extrusiva debido al contenido de vesículas, también se observan fragmentos de anfíbolitas, calizas y roca ígnea intrusiva, los fragmentos son angulosos y subredondeados, mal clasificados; en general presenta una textura fluidal; lo antes

mencionado presenta características de un lente. A partir de los 418 m, llamada brecha tipo suevítica con matriz arcillosa, la granulometría en promedio disminuye a unos cuantos milímetros y hacia la base se incrementan a 15 mm. Presenta una gradación normal aparente de fragmentos muy pequeños con un porcentaje muy alto de partículas 60 %, la matriz tiende a ser más oscura, esta compuesta de fragmentos de anfíbolita, vidrio con aureolas de alteración (alterando a la matriz los fragmentos de roca fundida). A partir de los 426 m se observa una porosidad considerable, los poros alcanzan tamaños de 5 a 6 mm, existe un incremento de fragmentos máficos con tamaños de 5 mm de diámetro, angulosos con aureolas. En los últimos 6 metros aparece un lente de fragmentos metamórficos de 5 a 7 cm de largo en cada clasto, al parecer son de basamento semejante a los fragmentos de la cima de esta unidad, aunque estos se encuentran en menor porcentaje.

UNIDAD 4

Brecha tipo suevítica con matriz de melt que comienza a partir de los 464.8 m hasta los 503.9 m, con un espesor de 35 metros, la cual es de color gris oscuro, se caracteriza por tener fragmentos con tamaños de 5 a 15 mm, angulosos. En la parte superior existe un cambio transicional de color gris oscuro de aproximadamente 5 metros hacia abajo. En la cima de esta unidad los fragmentos son de color negro, angulosos, bien clasificados y mal seleccionados, se observan pequeños fragmentos de cuarzo de impacto, calizas, fragmentos de roca con textura granítica y algunos fragmentos aislados mayores a 20 mm, vidrio y fragmentos de gneis, todo esto en una matriz vítrea-arcillosa; descendiendo en la unidad existe una variación de color siendo este más claro que las anteriores, las partículas son angulosas de unos cuantos milímetros, mal clasificados y mal seleccionados, constituidas de partículas de cuarzo, anfíbolita en mayor cantidad, anhidrita y yeso, algunos fragmentos son de rocas graníticas, aproximadamente; con gradación normal. Conforme nos acercamos hacia la base el color de la unidad cambia a gris oscuro y aparecen esporádicos fragmentos de gneis con tamaños de 8 a 100 cm, en una matriz completamente de melt; esto es al final del pozo a los 503.9 m, por lo que quizá se sigan encontrando más fragmentos de brecha a mayor profundidad.

Podríamos concluir que las brechas de impacto con características sedimentarias son debido a que a pesar de que el tirante de agua era muy pequeño, el cuerpo

impactado generó un gran hueco en la superficie por lo que el tirante de agua al regresar a su lugar trajo consigo gran cantidad de fragmentos de roca de diversos lugares, por lo que en algunos casos los fragmentos son subredondeados contrastando con los muy angulosos, quizá será la forma de explicarse el origen de estos fragmentos incluyendo al cuarzo que en algunas ocasiones se encuentra subredondeado. Por lo que las brechas corresponden al relleno del cráter, tal vez a mayor profundidad encontraríamos características de brechas por debajo del cráter. Esta brecha tiene grandes similitudes con la brecha del cráter de Ries ya que se encuentra también en una secuencia de rocas carbonatadas.

A continuación se da una tabla comparativa de las brechas de los tres tipos de cráteres mencionados en el presente trabajo.

Tabla 5. Características generales de las brechas en los tres tipos de cráteres

	Cráter - Ries	Cráter - Sudbury	Cráter - Chicxulub (pozo UNAM-5)
Diámetro del cráter	24 km	180-250 km	- 180 km
Edad (Ma)	25	1850 ± 3	65
Periodo	Terciario-Oligoceno	Precámbrico	Cretácico/Terciario
Espesor de la brecha (en general)	- 660 m	1800 m	172 m
Tipos de brechas	Brecha Bunte Brecha suevítica	Brechas polimícticas de melt Brechas tipo suevítica de matriz clástica Brecha uniforme de grano fino Brecha con material retrabajado	Brecha tipo suevítica con matriz arcillosa Brecha tipo suevítica con matriz de melt
Características generales	Brecha Bunte: compuesta de sedimentos consolidados y no consolidados del impacto, con rasgos de metamorfismo de impacto de los estados 0, I, II, como conos estriados y kink bands de biotita. Brecha suevítica, compuesta de fragmentos de roca cristalina, vidrio con esferulitas, gneis de biotita, anfíboles y rocas ígneas extrusivas; muestra todos los estados de metamorfismo de impacto	Brecha polimíctica que pertenece al miembro Basal, subyaciendo se encuentra una brecha tipo suevítica similar a la suevita del Ries. Brecha uniforme con matriz cristalina. En la parte basal del último miembro, se encuentra la misma brecha pero con contenido de carbón y posteriormente una brecha con material retrabajado.	Brecha tipo suevítica con matriz micrítica, presenta fragmentos de gneis altamente foliados, vidrio y vidrios diaplécticos, con bordes de reacción y fragmentos de melt anhídrita y yeso. Brecha tipo suevítica con matriz de melt fragmentos de basamento, anfíboles, vidrios diaplécticos y mosaiquismo. Presenta estados del metamorfismo del 0 al IV.

CONCLUSIONES

El uso de fotografías en la documentación digital de núcleos es una técnica adoptada en la industria petrolera y la investigación, el presente trabajo analiza el funcionamiento de dicha técnica para demostrar las innovaciones que ofrece, ya que en la actualidad es importante aprovechar las facilidades de fotografía digital, como son imágenes digitales de alta resolución y sistemas automatizados que dan rapidez y optimización, obteniendo así un control espacial, una geometría en el núcleo y del punto de observación. La homogeneidad, repetibilidad y condiciones de iluminación, permite la comparación a detalle entre núcleos con distintos espectros de colores.

El uso de las imágenes en programas de computo nos proporciona una fácil manipulación, almacenamiento y accesibilidad en forma individual así como también en conjunto. Obtener una base de datos no sólo nos proporciona imágenes, sino además nos da información adicional como descripción litológica, granulometría, estructuras sedimentarias, etc.

Mediante este sistema se puede hacer una selección de sectores de núcleos para estudios adicionales en los mismos. Las innovaciones pueden ser enormes cuando se trata de documentar varios kilómetros de núcleos

Uniendo técnicas como el sistema de documentación digital, el cual ha sido de gran utilidad para el rápido manejo de muestras de núcleo, así como la petrografía, se logró realizar un estudio detallado del pozo UNAM-5, determinando cuatro unidades principales

Unidad 1. Determinada como una brecha tipo suevítica con matriz arcillosa, con granulometría muy fina, (muestra M-1), presenta fragmentos de roca metamórfica, rocas intrusivas y algunos fragmentos de rocas extrusivas, con gradación normal; el contacto con la unidad inferior es gradacional, disminuyendo la concentración de clastos y aumentando la cantidad de matriz.

Unidad 2. Presenta abundancia de matriz de roca fundida, lo que le da el nombre a la misma, es muy notable su textura fluidal, con inclusiones de clastos en la matriz; las muestras correspondientes a esta unidad son la M-3 del estudio petrográfico y la M-29 del sistema de documentación digital.

Unidad 3. Contiene dos tipos de brechas, una denominada brecha tipo suevítica con matriz de vidrio, y otra con matriz arcillosa; presenta fragmentos de gneis, cuarzo, anfibolitas y feldespatos con marcados rasgos de isotropismo, vidrio diaplético y

mosaiquismo, así como rasgos planares de deformación principalmente en los feldespatos; presenta lentes de brecha con fragmentos de roca metamórfica y porosidad alta. Las muestras analizadas son M-5 y M-7 del estudio petrográfico.

Unidad 4. Brecha tipo suevítica con matriz de roca fundida, con un alto contenido de vidrio, lo que no permite la identificación de clastos debido a la fusión total de la roca, presenta concentraciones notables de anfibolita (muestra M-9 del estudio petrográfico).

Al realizar una comparación de las brechas del pozo UNAM-5 y las brechas suevíticas de los cráteres Ries (Alemania) y Sudbury (Canadá), se concluye que las brechas de estos cráteres tienen grandes similitudes, debido a que la litología donde ocurrió el impacto es muy parecida. En el Chicxulub, la columna presenta composiciones graníticas y metamórficas, así como un depósito de calizas en la parte superior de la columna.

Con respecto al cráter de Sudbury, se encuentran similitudes en los miembros de la Formación Onaping, particularmente en el Miembro Black, ya que las estructuras de flujo que se observan son semejantes a las Unidades 2 y 4 de las brechas estudiadas en este trabajo. Las formaciones del cráter Sudbury en su conjunto, describen estructuras que existen en las brechas del pozo UNAM-5.

Con respecto al cráter del Ries, su estudio ha sido de gran utilidad para poder definir los efectos del metamorfismo de impacto ocurridos en las brechas, de donde podemos deducir que los estados de metamorfismo establecidos por Stöffler, son identificados en las brechas de nuestro estudio, como son los rasgos planares de deformación en varias direcciones, vidrio diaplético, isotropismo y la formación de roca fundida. Las semejanzas de las brechas del cráter Chicxulub con las brechas del cráter de Ries son muchas ya que ambos se encuentran en secuencias carbonatadas y las brechas muestran una matriz clástica lo que nos da más parámetros de comparación.

Es importante mencionar que la Brecha Bunte observada en el cráter de Ries, no fue posible observarse en la brecha del pozo UNAM-5, debido a que posiblemente se infiere que podría estar sepultada más abajo de este; cabe señalar que en los pozos UNAM-7 y UNAM-6 si ha sido registrada.

RECOMENDACIONES

Este trabajo consistió en dos partes; una fue la descripción del método de procesado del Core Scanner, haciendo énfasis en la importancia del mismo para el rápido procesamiento de muestras de núcleo por lo que se recomienda el empleo de éste en todas las muestras de pozos con recuperación de núcleo, para su rápido almacenamiento mediante métodos digitales.

Con respecto al estudio de las brechas todavía faltan muchos estudios por realizarse para poder llegar a tener una mejor interpretación de la misma, ya que hacen falta estudios por ejemplo como de geoquímica e inclusiones fluidas, para estudiar la composición de la matriz, así como un estudio petrográfico detallado con mayor número de muestras, para la definición de cada una de las estructuras de impacto, composición de vidrio, etc.

Mediante estudios de geofísica es como se han podido resolver algunos de los cuestionamientos, pero no cabe duda que los estudios petrográficos, geoquímicos y demás, nos darán la clave a nuestras incógnitas, pues los estudios que se tienen en la actualidad aún son escasos debido a que el descubrimiento del cráter es muy reciente.

ANEXO I

CRÁTERES DE IMPACTO

Características básicas de los cráteres de impacto

Los cráteres de impacto son depresiones topográficas de forma circular, comúnmente producidas por el choque de un cuerpo celeste con una superficie planetaria; en las que se originan diversas características a consecuencia de la actividad mecánica y térmica ocasionada por el impacto.

La forma de este tipo de estructuras depende de varios factores, entre los cuales figura: el ángulo de incidencia del impacto, la geometría y litología de la superficie impactada, un claro ejemplo de los diferentes factores que influyen en la formación de un cráter, es el caso de los cráteres de forma circular, la cual puede ser debida a impactos cuyo ángulo de incidencia varía desde 90° hasta los 6° , considerando velocidades mayores a los 10 km/s. Por lo cual resulta difícil el definir los factores específicos para cada uno de los diferentes casos estudiados hasta el momento. De acuerdo a lo anteriormente citado resulta necesario definir algunos factores.

El ángulo de incidencia se refiere en el ángulo que forma la trayectoria del cuerpo impactor con la superficie, existen cálculos estadísticos que predicen que el ángulo más probable de impacto de un cuerpo es de 45° , por lo que sólo se han definido dos tipos de ángulos: verticales y oblicuos, siendo los más comunes los últimos. En los impactos oblicuos menores a 10° ocurridos a hipervelocidad (velocidades mayores a 10 km/s), por lo general se producen cráteres circulares; *(dicho ángulo también puede variar con la velocidad que ocurre el impacto)*.

La geometría: es la forma que presentan los cráteres, aunque se pueden presentar una gran variedad de formas geométricas las mas comunes son las circulares y elípticas esta depende de factores como el ángulo de incidencia, velocidad y composición del cuerpo impactor, así como de las características propias de la superficie planetaria como la litología, saturación de agua, profundidad del nivel freático, fracturamiento, planos de debilidad y fallamiento.

Los impactos de bajo ángulo y de baja velocidad, generan cráteres elípticos; en el caso de los circulares aunque esta sea circular, los depósitos formados por el material expulsado mostrarán una disposición diferente a la que se observa en un impacto vertical,

ya que se distingue una acumulación mayor en los extremos laterales a la dirección del impacto formando una simetría bilateral que recibe el nombre de "alas de mariposa" o bien se observa una acumulación mayor en el extremo frontal a la dirección del impacto, marcando así un ángulo de incidencia oblicuo (Vera, 1993).

Características de los cuerpos impactores

La formación de cráteres de impacto es un proceso geológico único de acuerdo a la enorme cantidad de energía que es liberada en una pequeña área y en un tiempo muy corto. Los asteroides impactan a la Tierra a una velocidad promedio de 25 km por segundo, un cuerpo cuya masa es mayor de 1000 toneladas cúbicas penetra a la atmósfera prácticamente intacto, sin embargo, un cuerpo cuya masa es menor de 100 toneladas, al pasar por la atmósfera desacelera casi a cincuenta por ciento de su velocidad original. Existe una transferencia de energía cinética al terreno que es convertida en presión y calor, la magnitud de la energía liberada depende principalmente de la velocidad y el tamaño del objeto impactante; la presión ejercida sobre el meteorito y la roca impactada puede llegar a sobrepasar los 100 Gpa (un millón de veces la presión atmosférica) y la temperatura puede alcanzar varios miles de grados centígrados (Grieve, 1991). Estas condiciones pueden variar, dependiendo de la velocidad y el ángulo de inclinación al momento del impacto, así como de la composición de la superficie impactada y del cuerpo impactador.

Distribución de las estructuras de impacto en la tierra

En la actualidad se conocen alrededor de 150 cráteres de impacto terrestres (French, 1998), aunque se descubren de tres a cinco estructuras por año. Debido a diferencias en cuanto al grado de preservación y conocimiento geológico, esta población muestra una tendencia hacia estructuras jóvenes menores a 200 M.a y de diámetros mayores a 20 km, localizadas en los cratones de Australia, Europa y Norteamérica, por ser las zonas más estudiadas en la actualidad.

Por lo anterior se ha llegado a considerar a los impactos de cuerpos sólidos como uno de los procesos importantes que ha tenido lugar en los planetas de tipo terrestre (Shoemaker, 1977). En la figura A1.1, se presenta la ubicación de la mayoría de las estructuras de impacto en la Tierra.

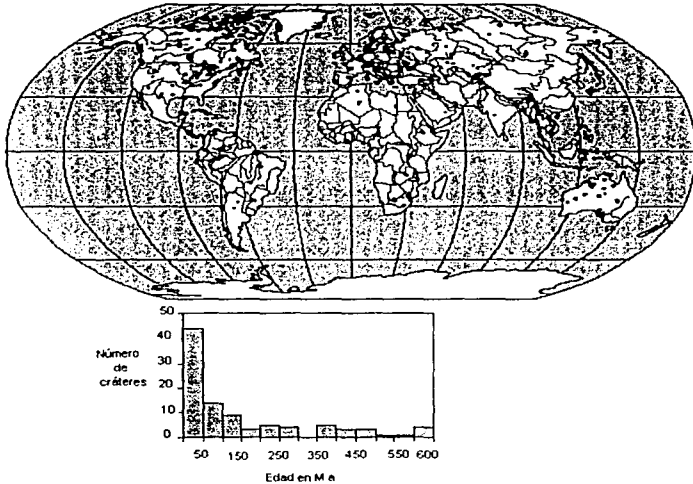


Figura A.1.1 de distribución de cráteres de impacto en la Tierra

MORFOLOGÍA DE LOS CRÁTERES

Existen ciertos parámetros morfológicos que se aplican para definir la estructura de un cráter, teniendo además la aceleración de la gravedad un papel muy importante en la formación de la mayoría de los mismos, cuando tiene grandes dimensiones.

En muchas ocasiones los cráteres de impacto terrestres son altamente degradados o modificados por otros procesos geológicos como la erosión, sedimentación y tectonismo; sin embargo Grieve (1992), menciona dos formas básicas para definir su morfología, como es la de un cráter simple y un cráter complejo. Hay que tomar además en cuenta que la morfología final de un cráter, depende del cociente del diámetro D y del espesor de las capas. (figura 6, Cap. III)

Cráteres simples

El diámetro de un cráter simple varía dependiendo de la naturaleza de la roca impactada y del tamaño del cuerpo impactante. Se sabe que la profundidad máxima de un

cráter está relacionada con la resistencia de la roca, pero hasta el momento no se han aclarado todos los factores que determinan el diámetro máximo de los mismos. Cuando las rocas impactadas son sedimentarias, los cráteres simples llegan a medir hasta dos kilómetros de diámetro, si el objetivo son rocas cristalinas, entonces llegan a tener diámetros de hasta cuatro kilómetros (Dence, 1972).

La morfología de un cráter simple puede ser observada a diámetros arbitrariamente pequeños. Un ejemplo de este tipo de cráter es el mejor expuesto y el más estudiado, el cráter Meteoro localizado en Arizona E.U.A., al sur de la meseta del Colorado, (figura A.1.2), con un diámetro de 1.2 km (Grieve y Pesonen, 1992); se formó hace 50 000 años por el impacto de un meteorito de 100 000 toneladas de hierro, que chocó a una velocidad de aproximadamente 20 km/s. El lugar del impacto es un área de rocas sedimentarias y está pudo haberse formado cuando el nivel freático se hallaba más arriba de lo que hoy se encuentra. Actualmente su profundidad es de 150 m, ya que ha estado afectado por la erosión. La profundidad ha sido disminuida por el relleno de sedimentos lacustres del Pleistoceno y Holoceno (Melosh, 1989).



Figura A.1.2 Cráter simple, (Cráter Meteoro Barringer, en Arizona), French, 1998

Cráteres Complejos

Los cráteres terrestres de impacto con diámetros mayores de cuatro kilómetros, exhiben los rasgos característicos de los cráteres complejos. Los cráteres complejos llegan a ser cientos de veces más anchos en relación con su profundidad, poseen un levantamiento topográfico central llamada pico o anillo topográfico, rodeado por una depresión anular y un borde fracturado, el cual sigue patrones de fallamiento normal

formando terrazas. Entre la estructura central y el borde existen diferentes tipos de materiales transformados por el propio impacto, incluyendo rocas fundidas y brechadas o material fundido por el impacto. En los estudios de estos cráteres, se ha mostrado que el pico central está compuesto de rocas que originalmente estaban bajo el piso del cráter y que fueron levantadas a una distancia aproximadamente el 8% del diámetro del cráter; ese levantamiento del fondo del cráter, marca la gran diferencia entre los cráteres simples y los complejos. En la siguiente figura se muestra los principales rasgos estructurales de un cráter complejo.

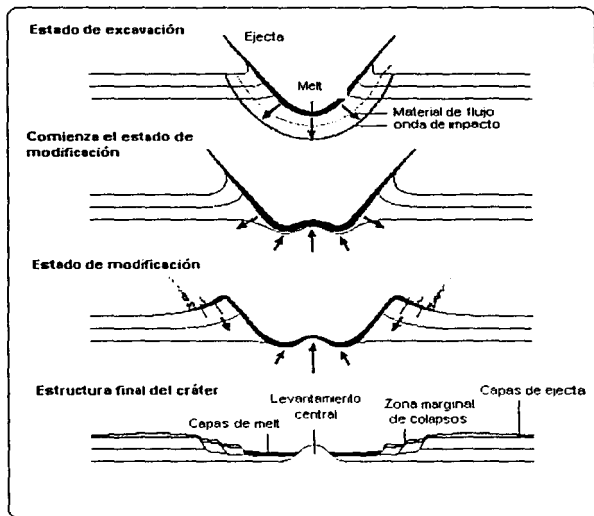


Figura A.1.3 Rasgos de formación de un cráter complejo

De acuerdo con la formación de un cráter complejo, inicialmente se forma siguiendo casi la misma mecánica que uno simple, sin embargo, cuando la cavidad de transición comienza a crecer, algunas de las rocas del centro, rebotan hacia arriba; el efecto del rebote levanta el piso de la cavidad de transición hasta formar una estructura central, este levantamiento en el centro, llega a ser aproximadamente una décima parte del diámetro final del cráter (Grieve 1990)

La erosión diferencial modifica la forma original de los cráteres de impacto terrestres, a pesar de esto actualmente se pueden encontrar en el registro algunos ejemplos de subgrupos morfológicos de cráteres de impacto complejos. Los tipos de cráteres de impacto que se consideran como los más comunes, considerando el diámetro creciente son: cráteres con levantamiento central, cráteres con anillos de picos y cuencas multianilladas.

Los cráteres terrestres con levantamiento central con más de unos cuantos kilómetros, la cavidad transitoria formada por el impacto es gravitacionalmente inestable, el centro de la cavidad transitoria rebota ascendiendo para formar el levantamiento central o pico central, así como el levantamiento de los bordes, colapsando dentro y fuera hasta formar una zona de terrazas de bloques deslizados.

Cráteres con anillos de picos, en grandes cráteres terrestres con decenas de kilómetros, el levantamiento central es inestable por si mismo y subsecuentemente colapsado para formar un pico central. En cuencas multianilladas, definidas con al menos dos anillos, estas son formadas dentro de escarpes asimétricos. Uno de estos anillos quizá es el equivalente al borde del cráter en el anillo de picos; el mecanismo para la formación de anillos de picos en las cuencas multianilladas ha sido ampliamente debatido, (Morgan, 1999).

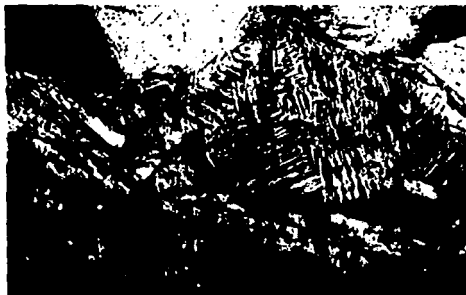
ANEXO II

Microfotografías representativas de las brechas de impacto del pozo UNAM-5

Microfotografías correspondientes a la muestra M-1, de la Unidad 1



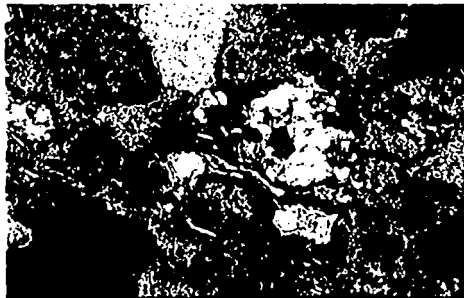
Cuarzo con bordes de reacción (luz reflejada, 10x)



Feldespalos con rasgos planares de deformación, en un gneis, con moscovita, (luz polarizada, 10x)



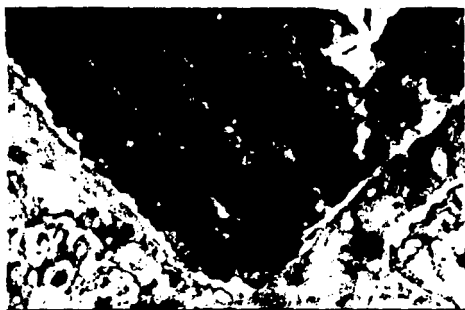
Fragmentos de gneis, (luz reflejada, 10x).



Fragmentos de gneis, (luz polarizada, 10x).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

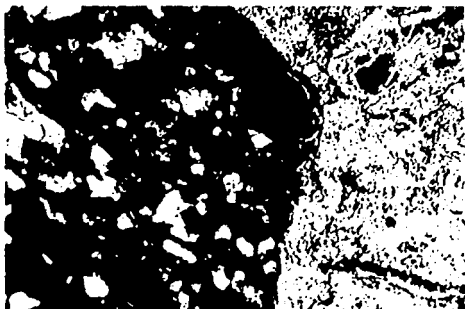
Microfotografías correspondientes a la muestra M-3, de la Unidad 2



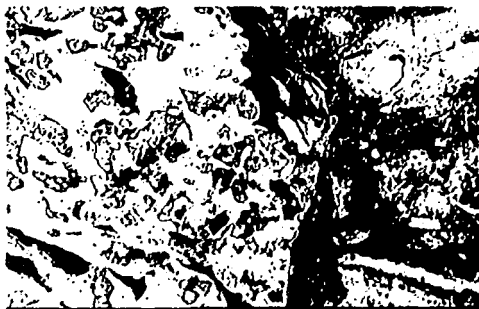
Vidrio diapléctico de feldespato en un gneis,
(luz polarizada, 10x)



Vidrio diapléctico de feldespato en un gneis,
(luz reflejada, 10x)



Fragmento de gneis isotropizado, (luz polarizada, 10x)



Fragmento de gneis isotropizado, (luz reflejada,
10x)

Microfotografías correspondientes a la muestra M-7, de la Unidad 3



Anfíboles en matriz arcillosa, (luz polarizada, 10x)

Microfotografías correspondientes a la muestra M-9, de la Unidad 4



Fragmento máfico isotropizado, (luz polarizada, 10x)

GLOSARIO

- Acreción:** Es el proceso por el cual pequeñas partículas y gases se unieron en la nebulosa solar para formar grandes cuerpos, eventualmente de tamaño planetario. Crecimiento por asimilación.
- Bandas en Kink:** Cambios angulares a través de interfaces planares en mineral con buen crucero.
- Brecha:** Roca clástica compuesta de fragmentos angulares de rocas y/o minerales incluidos en una matriz de grano fino.
- Cóndrulos:** Cuerpos silicatados esféricos a subsféricos encontrados en ciertos meteoritos pétreos y en algunas muestras lunares. Los cóndrulos varían en tamaño desde más de 10 mm hasta menos de 1 mm, principalmente se componen de vidrio, olivino, piroxenos y plagioclasas, o algunas combinaciones de estos minerales; muestran evidencias de fusión parcial o total.
- Cubierta de eyección** (Ejecta blanket) Capa que resulta de la caída de material expulsado durante un impacto, se encuentra dentro o circundando cráteres, por lo que se le asocia a estos, puede ser de formas geométricas variadas.
- Devitrificación:** Cristalización de un vidrio en estado sólido.
- Hipervelocidad:** Velocidad que excede la ordinaria, es la velocidad necesaria para abrir un cráter en alguna superficie planetaria, (velocidades mayores a 10 km/s).
- Impactita:** Roca vítrea fundida o parcialmente fundida que se forma por metamorfismo de choque.
- Masquelinita:** Vidrio diaplético de plagioclasa, que ahora se sabe ocurre en asociación con cráteres de impacto terrestres y lunares.
- Material de eyecta:** Es el material expulsado ya sea de un cráter por la acción del vulcanismo o un impacto meteorítico, o de un objeto estelar, tal como una supernova, por ondas de choque.
- Mesostasis:** Material intersticial vítreo de grano fino que ocupa los pequeños espacios entre cristales mayores en algunas rocas ígneas.
- Meteorito:** Objeto natural de origen extraterrestre que sobrevive a su paso a través de la atmósfera y choca con la superficie del planeta.
- Meteoro:** Fenómeno lumínico producido por el calentamiento friccional de un meteoroido cuando entra a una atmósfera planetaria. Si es particularmente grande se le llamara bola de fuego.

- Meteoroides:** Pequeño objeto natural (menor a 1 km) en una órbita independiente en el Sistema Solar, probablemente un fragmento de un asteroide o un cometa.
- Onda de choque:** Onda compresional que al menos por un periodo de tiempo muy corto actúo sobre el material en el que ocurre un impacto a hipervelocidad o por una explosión.
- Rasgos Planares:** Lamellas. Conjunto de planos paralelos específicamente orientados desarrollados en minerales como cuarzo y feldspatos, como resultado de metamorfismo de impacto, en su mayoría se componen de una fase vítrea del mineral que los contiene.
- Regolita:** Una capa no consolidada compuesta de detritos formados durante impactos, que cubren superficies planetarias.
- Roca de fusión:** (Melt) Porción de la superficie rocosa impactada por un proyectil a hipervelocidad que se funde como consecuencia del impacto en un cuerpo planetario.
- Suevita:** Brecha de impacto, especialmente brechas de caída, que contiene inclusiones vítreas (impactita), así como fragmentos de orcas de las secuencias originales.
- Stishovita:** Un polimorfo de sílice de muy alta presión formado por el paso de una onda de choque durante un periodo de tiempo muy breve, como consecuencia de un impacto.
- Velocidad de escape:** Es la velocidad requerida para que un cuerpo escape al control gravitacional de un cuerpo planetario, velocidad requerida para cambiar de una órbita primaria a otra.
- Vidrio:** Material sólido, cuya composición química varía en un rango amplio y sin orden estructural anatómico.
- Vidrio diapléctico:** Vidrio formado en estado sólido de un mineral preexistente por la acción de ondas de choque o metamorfismo de choque.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez M. Jr., 1969, "Geología, paleogeografía y tectónica de México", Apuntes ESIA-IPN, 212p.
- Anderson T. H., Burkart B., Clemons R. E., Bohnenberger O. H. y Blount D. N., 1973, "Geology of the western Altos Cuchumatanes, northwestern Guatemala", Geol. Soc. Amer. Bull., Vol. 84, p. 805-826
- Anderson T. H. y Schmidt, V., 1983, "The evolution of middle America and the Gulf of Mexico-Caribbean sea region during Mesozoic time", Geol. Soc. of Amer. Bull. Vol. 94, p. 941-966
- Avermann M. y Brockmeyer P., 1992, "The Onaping Formation of the Sudbury Structure (Canada): an example of allochthonous impact breccias", Tectonophysics, Vol. 216, p. 227-234
- Bass y Zartman, 1969, "The basement of Yucatan Peninsula", Abs (EOS) Trans. Ael. AGU, Vol. 50, p. 313
- Bischoff L. and Oskierski W., 1987, "Fractures, pseudotachylite veins, and breccia dikes in the crater floor of the Rochechouart impact structure, SW-France, as indicators of crater-forming processes", en Research in Terrestrial Impact Structures (J. Pohl, ed.), p. 5-29
- Bishop W. F., 1980, "Petroleum geology of Northern Central America", Journal of Petroleum Geology, Vol. 3, p. 3-59
- Blair T. C., 1986, "Paleoenvironments, tectonic and eustatic controls on sedimentation, Regional Stratigraphic correlation and plate tectonic significance of the Jurassic-Lowermost Cretaceous Todos Santos and San Ricardo Formations, Chiapas, Mexico", Tesis doctoral, Universidad de Colorado, p. 251
- Buffler R. T., Schlager W., et al., 1984, "Initial Reports, Deep Sea Drilling Project (DSDP)", V. 77, pozos 537 y 538a., p. 255-336, U.S. Government printing office, Washington D. C.
- Butterlin J. y Bonet F., 1958, "Reconocimiento geológico preliminar del territorio de Quintana Roo", Bol. AMGP, Vol. IX, No. 9 y 10.
- Chowns T. M. y Williams C. T., 1983, "Pre-Cretaceous Rocks Beneath the Georgia Coastal-Regional Implications", en : studies related to the Charleston, south Carolina, earthquake of 1886 - Tectonics and Seismicity. Geological Survey Professional Paper 1313-L.
- Connors, M., A. Hildebrand, M. Pilkington, C. Ortiz, R. Chávez, J. Urrutia Fucugauchi, E. Graniel, A. Camara, J. Vázquez y J. Halpenny, 1996, "Yucatán karst features and the size of Chicxulub crater", Geophys. J. Int., Vol 127, F11-F14.
- Dence M. R., 1965, "The extraterrestrial origin of Canadian craters", Ann. N. Y. Acad. Sci., Vol. 123, p. 941-969
- Dence M. R., Innes M. J. S., and Robertson P. B., 1968, "Recent geological and geophysical studies of Canadian craters.", In Shock Metamorphism of Natural Materials (B. M. French and N. M. Short, eds.), p. 339-362. Mono Book Corp., Baltimore. y N. M. Short, eds.), p. 531-553

- Dence M. R., 1972, "The nature and significance of terrestrial impact structures", Intl. Geol. Congr., 24th, Montreal, Canada, Proc., Sect. Vol. 15, p. 77-89. 130, 275-287
- Dengo G. y Bohnenberger O., 1969, "Structural Development of Northern Central America", en: McBirney R. (Ed.), Tectonic Relation of Northern Central America and the Western Caribbean the Bonacca Expedition, p. 203-220
- Donnelly T. W., Horne G. S., Finch R. C. y Lopez Ramos E., 1990, "Northern Central America: The Maya and Chortis Bloks", en: Dengo G. y Case J. E., (Eds.), The Geology of North America. The Caribbean Region: Geol. Soc. of Am., Vol. A, p. 371-396
- Dressler, B., 1993, "Continental Drilling in Canadian Impact Structures", Ontario Geological Survey, p.1-31
- Dressler B., 1982, "Geology of the Wanapitei Lake area, District of Sudbury": Ontario Geological Survey, report, p. 131-213
- Dressler B. O. and Sharpton V. L., 1997, "Breccia formation at a complex impact crater": Slate Islands, Lake Superior, Ontario, Canada. Tectonophysics, Vol. 275, p. 285-311
- French B. M., Koeberl C., Gilmour I., Shirey S. B., Dons J. A., and Naterstad J., 1997, "The Gardnos impact structure, Norway", Petrology and geochemistry of target rocks and impactites. Geochim. Cosmochim. Acta, 61, p. 873-904
- French B.M., 1998, "Traces of Catastrophe", a handbook of shock- Metamorphic effects in Terrestrial Meteoric Impact structures, p. 17-28, 61-79
- Grieve R. A. F., 1978, "The melt rocks at Brent Crater, Ontario, Canada", Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 9th, p. 2579-2608
- Grieve, 1987, "Terrestrial Impact Structures", Annual Review Earth Planet, Sci, Vol 15, p. 245-270
- Grieve R. A. F., Pilkington M., and Parmentier E., 1990, "Large impact basins and the early Earth", (abstract). En Intl. Workshop on Meteorite Impact on the Early Earth, p. 18-19. Perth, Australia.
- Grieve R. A. F., Stöfler D., and Deutsch A., 1991, "The Sudbury Structure: Controversial or misunderstood?", J. Geophys. Res., Vol. 96, No. Esp., p. 22753-22764.
- Grieve Richard y Pesonen, 1992, "The Terrestrial Impact Cratering record", Tectonophysics, Vol 216 p.1-30
- Grieve, R. Y Ber, J., 1994, "Shocked lithologies at the Wanapitei impact structure, Ontario Canada", Meteoritics, Vol. 29 p. 621-631
- Gomberg D. N., Banks P. O. y McBirney A. R., 1968, "Guatemala preliminary zircon ages from Central Cordillera", Science, Vol. 162, p. 121-122
- Heymann D., Dressler B., Knell J., Thiemens M., Buseck P., Dunbar R., y Mucciarone D., 1999, "Origin of carbonaceous matter, fullerenes, and elemental sulfur in rocks of the Whitewater Group, Sudbury impact structure, Ontario, Canada", Geological Society of America Special Paper 339, p. 345-360

- Hildebrand A.R., Pilkington, Ortiz Alemán Chavez R.E., Urrutia F., Connors M., Graniel C., Camara Z. Halpenny J., Niehaus D., 1998, "**Mapping Chicxulub crater structure with gravity and seismic reflection data**", en: Meteorites: Flux with Time and Impact Effects, Geological Society, London, special publications.
- Klitgord K. D. y Popeone P. 1984, "**Florida: a Jurassic transform plate boundary**", Journal of Geophysical Research, Vol. 89, p. 7753-7772
- Klitgord K. D. y Schouten H., 1986, "**Plate kinematics of the central Atlantic**", en: Vogt P. R. y Tucholke B. E. (Eds.), The western North Atlantic region: Boulder, Colorado., Geol. Soc. Amer., Geology of North America, Vol. M, p. 351-378
- Klitgord K. D., Hutchinson D. R. y Schouten H., 1988, "**U. S. Atlantic Continental Margin, structural an tectonic framework**", en: Sheridan R. E. y Grown J. A. (Eds.), The Atlantic continental margin, Boulder, Colorado. Geol. Soc. Amer., Geology of North America, Vol. 1-2, p. 19-55
- Koeberl C. and Anderson R. R., (1996) "**The Manson Impact Structure, Iowa: Anatomy of an Impact Crater**". Geol. Soc. Amer. Spec. Paper, p. 302. 468
- Kraut F. and French B. M., (1971) "**The Rochechouart meteorite impact structure**", France: Preliminary geological results. J. Geophys. Res., Vol. 76, p. 5407-5413
- Krogh T. E., Kamo S. L., Bohor B. F., 1993, "**U-Pb ages of single shocked zircons linking distal KT ejecta to the Chicxulub crater**", Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 119, p. 425-429
- Lambert P. (1981) "**Breccia dikes: Geological constraints on the formation of complex craters**". In Multi-Ring Basins: Formation and Evolution, Proc. Lunar Planet. Sci. 12A (P. H. Schultz and R. B. Merrill, eds.), p. 59-78. Pergamon, New York.
- López Ramos E., 1973, "**Estudio geológico de la Península de Yucatán**", Boletín de la Asociación Mexicana de Geología Petrolera, Vol. 25, No. 13, p. 23-76
- López Ramos E., 1975, "**Geological summary of the Yucatán Peninsula**", en: Nair A. y Steal F. (Eds.), The Ocean basins and Margins, Vol.3, The Gulf of the Mexico and the Caribbean.
- López Ramos E., 1979, "**Geología de México**", Tesis, México D. F., Vol. 3, 456p.
- Marshall R. H., Ward W. C. y Weidie A. E., 1974, "**Stratigraphy and deposicional history of subsurface Mesozoic strata of the Yucatan Peninsula**", en: A. E. Weidie, (ed.), Field Seminar on water and Carbonate rocks of the Yucatan Peninsula, Mexico: New Orleans Geological Society, p. 10-23.
- Marton György L. y Buffler Richard T., 1994, "**Jurassic Reconstruction of the Gulf of Mexico Basin**", International Geology Review, Vol. 36, p. 545-586
- Marton György L., 1995, "**Jurassic evolution of the Southeastern Gulf of Mexico**", The University of Texas at Austin, Tesis, 276p.
- Masaitis V. L., 1998 "**Popigai crater: Origin and distribution of diamond-bearing impactites**". Meteoritics & Planet. Sci., Vol. 33, p. 349-370
- Melosh H. J. 1989, "**Impact Cratering: A Geologic Process**". Oxford Univ., New York. 245 p.

- McBirney A. R. y Bass N. M., 1969, "**Structural Relations of Pre-Mesozoic Rocks of Northern Central America**", en: Tectonic relation of Northern Central America and the Western Caribbean, the Bonacca expedition McBirney A. R. (Ed.), p. 269-280
- McBirney A. R., 1963, "**Geology of a part of the Central Guatemalan Cordillera**", Publicaciones geológicas científicas de la Universidad de California, Vol. 38, 242p.
- Meyerhoff A., 1967, "**Future Hydrocarbon provinces of the Gulf of Mexico Caribbean region**", Gulf Coast Assoc., Geol. Soc. Trans., Vol. 17, p. 217-260
- Molina Garza R. S., Van Der Voo R. y Urrutia-Fucugauchi J., 1992, "**Paleomagnetism of the Chiapas Massif, southern Mexico: evidence for rotation of the Maya Block and implication for the opening of the Gulf of Mexico**", Boulder CO., Geol. Soc. Amer. Bull., Vol. 104, p. 1156-1168
- Morgan J. Y Warner M., 1999, "**Chicxulub: the third dimension of a multi-ring impact basin**", Geology, vol. 27, No. 5, p. 407-410.
- Mueller P. A., Heatherington A. L., Wooden J. L., Shuster R. D., Nutman A. P. y Williams I. S., 1994, "**Precambrians zircons from the Florida Basement, A Gondwana Connection**", Geology, Vol. 22, p. 119-122
- Muir T. L. and Peredery W., 1984, "**The Onaping Formation. In The Geology and Ore Deposits of the Sudbury Structure**", (E. G. Pye, A. J. Naldrett, and P. E. Giblin, eds.), p. 139-210.
- Muller-Mohr V., 1992, "**Breccias in the basement of a deeply eroded impact structure, Sudbury, Canada**", Tectonophysics, Vol. 216, p. 219-226
- Oberbeck, V. Y Fogleman, G., 1990, "**Impact Constraints on the Origin of life**", Origin and Evolution of the Biosphere, vol 20 p.181-195
- Ortega Gutiérrez F., Mitre Salazar Luis M., Roldan Quintana J., Morán Zenteno D., Alaniz Álvarez Susana A. y Nieto Samaniego Angel F., 1992, "**Texto explicativo de la quinta edición de la carta geológica de la República Mexicana, escala 1:2,000,000**", México D. F., Instituto de Geología de la UNAM-CRM.
- Pilkington M., Hildebrand A., 1994, "**Gravity and magnetic field modeling and structure of the Chicxulub Crater, México**", Journal of Geophysical Research, vol. 99, No.E6, jun., p.13,147-13,162
- Pindell J. L. y Dewey, J. F., 1982, "**Permo-Triassic reconstruction of western pangaea and the evolution of the Gulf of Mexico-Caribbean region**", Tectonics, Vol. 1, p. 179-212
- Pindell J. L., 1985, "**Alleghenian reconstruction and subsequent evolution of the Gulf of Mexico, Bahamas and proto Caribbean**", Tectonics, Vol. 4. No. 1, p.1-39
- Pope, K. O., A. C. Ocampo y D. E. Duller, 1991, "**Mexican site for the K/T crater?**", Nature, Vol. 351, p. 105
- Reimold W. U., Koeberl C., and Brandt D., 1997, "**Suevite at the Roter Kamm crater, Namibia**", Meteoritics & Planet Sci., Vol. 32, p. 431-437
- Sánchez Montes de Oca, 1979, "**Geología petrolera de la Sierra de Chiapas**", Bol. Soc. Mex. Geol. Pet.
- Shand S. J., 1916, "**The pseudotachylite of Parijs**", (Orange Free State) relacionada al "trap-shotten gneiss" y "flinty crush-rock." Quart. J. Geol. Soc. London, Vol. 72, p.198-221

- Sharpton V., Burke, Camargo Zanoguera, Marín L., Suárez Reynoso, Urrutia Fucugauchi, 1993, **"Chicxulub Multiring Impact Basin"**, Size and other characteristics derived from gravity analyses. *Science*, Vol 261, p. 1564-1567
- Sharpton Virgil, Marín Luis E., Carney Charles, Lee Scott, Ryder Graham, Shurayts Benjamin C., Sikara Paul, Spudis Paul D., 1995, **"A model of the Chicxulub impact basin based on evaluation of Geophysical data, well logs and drill core samples"**, *Geol. Soc. Amer., Special Paper 307*, Lunar and Planetary Institute, Contribution No. 873, Junio.
- Shoemaker E. M., 1977, **"Why study impact craters? In Impact and Explosion Cratering"**: Planetary and Terrestrial Implications (D. J. Roddy, R. O. Pepin, and R. B. Merrill, eds.), p. 1-10. Pergamon, New York.
- Sibson R. H., 1975, **"Generation of pseudotachylite by ancient seismic faulting"**, *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, Vol. 43, p. 775-794.
- Spray J. G., 1995, **"Pseudotachylite controversy: Fact or friction?"**, *Geology*, Vol. 23, p. 1119-1122
- Steiner M. B. y Walker J. D., 1996, **"Late Silurian Plutons in Yucatan"**, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. B8, p.17,727-17,735
- Stöffler D., 1974, **"Deformation and transformation of rock forming minerals by natural and experimental shock processes"**, *Fortschr. Mineral.*, Vol 51, p. 256-298
- Stöffler D., 1977, **"Research Drilling Nördlingen 1973: polymict breccias, crater basament, and cratering model of the Ries impact crater"**, *Geol. Bavarica*, Vol 75, p. 443-458
- Stöffler D., Bischoff L., Oskierske W., and Wiest B ,1988, **"Structural deformation, Breccia formation, and shock metamorphism in the basament of complex terrestrial impact craters"**, implications for the cratering process. En *Deep Drilling in Crystalline Bedrock*, Vol 1, p. 277- 297
- Stöffler D. y Grieve R.A.F., 1994, **"Classification and nomenclature of impact metamorphic rocks: a proposal to the IUGS Subcommittee on the Systematic of Metamorphic Rocks"**, (abstract). En *European Sci. Foundation Second Intl. Workshop on "Impact Cratering and the Evolution of Planet Earth"*:
- Urrutia Fucugauchi J., Marín Luis y Trejo García A., 1996a, **"Initial results of the UNAM scientific drilling program on the Chicxulub impact structure: rock magnetic properties of UNAM-7 Texax borehole"**, *Geofísica Internacional*, Vol. 35, No. 2, p. 125-133
- Urrutia Fucugauchi J., Marín Luis y Trejo García A., 1996b, **"UNAM scientific drilling program of Chicxulub impact structure. Evidence for a 300 kilometer crater diameter"**, *Research Letters*, Vol. 23, No. 13, p. 1565-1568
- Urrutia Fucugauchi J.,Alva Valdivia, Espíndola Castro, 1997, **"El Límite Cretácico Terciario y El Cráter Chicxulub"**, *Monografía No. 4, Unión Geofísica Mexicana*, p. 137-146
- Vázquez Castro Gabriel, 2000, **"Algunas características geoquímicas y litológicas de fragmentos basales de la brecha del cráter Chicxulub"**, tesis de licenciatura, p. 1-26
- Vera Sánchez P., Sharpton V. L. y Schuraytz B. C., 1993, **"Petrological characterization of melt rocks of the Chicxulub multiring impact basin"**, Papers presented at the Ninth Annual Summer Intern Conference, Agosto 19, Houston, Texas, p. 67-69

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Viniegra O., 1971, "Age and evolution of salt basin of southeastern Mexico", Amer. Asso. Petr. Geol. Bull., Vol. 55, p. 478-494
- Von Engelhardt, 1990, "Distribution, petrography and shock metamorphism of the ejecta of the Ries crater in Germany, - a review", Tectonophysics, Vol 171, p. 259-273
- Von Engelhardt W., 1997, "Suevite breccia of the Ries impact crater, Germany: Petrography, chemistry, and shock metamorphism of crystalline rock clasts", Meteoritics & Planet. Sci., 32, 545- 554
- Weidie, Ward y Marshall, 1978, "Geology of the Yucatan Platform", en Ward y Weidie (Eds.), Geology and Hidrogeology of Northeastern Yucatan, New Orleans, Geol. Soc. p. 3-29
- Weidie A. E., 1985, "Geology of Yucatan platform", en: Ward W.C., Weidie A. E. y Back W. (Eds.), "Geology and hydrogeology of the Yucatan and Quaternary geology of northeastern Yucatan Peninsula", Publicado por The New Orleans Geological Society.
- Weyl R., 1980, "Geology of the Central America", 2a ed., Gebrüder Borntraeger, Berlín.