

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“PROYECTO UNIVERSITARIO DE INVESTIGACIÓN SOBRE
LA PLATAFORMA CARBONATADA DE YUCATÁN: CASO
CHICXULUB, ANÁLISIS DE NÚCLEOS DE PERFORACIÓN”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A
RAYA RAMÍREZ RAMIRO**

DIRECTOR: DR. JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI

MÉXICO, D.F. 2007.





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.



FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-1311

SR. RAMIRO RAYA RAMÍREZ
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 Petrolero:

**PROYECTO UNIVERSITARIO DE INVESTIGACIÓN SOBRE LA PLATAFORMA
CARBONATADA DE YUCATÁN: CASO CHICXULUB, ANÁLISIS DE NÚCLEOS DE
PERFORACIÓN**

	RESUMEN
I	INTRODUCCIÓN
II	GENERALIDADES
III	DESARROLLO
IV	EVALUACIÓN DE LOS INTERVALOS DE INTERÉS
V	DISCUSIÓN
	CONCLUSIONES
	BIBLIOGRAFÍA

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 HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria, D.F., a 27 de octubre de 2006

EL DIRECTOR

M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB*JAGC*gtg

Agradecimientos

En memoria de Mamá Irene y Jacobo V.

A mis papás y a mi olo por la paciencia y el apoyo incondicional que he recibido todo el tiempo.

A mis hermanos por todo lo que me han apoyado y compartido.

A toda mi familia que por cuestiones de espacio no los puedo poner a todos pero sepan que aquí están.

A la UNAM que desde la preparatoria me dio la oportunidad de formar parte de su comunidad.

A la Facultad de Ingeniería por haberme enseñado que la suerte no existe.

Al Dr. Jaime Urrutia por darme la oportunidad y haberme dirigido la elaboración de este trabajo.

A los ingenieros: Ing. Oscar Peña, M. en C. Gabriel Vázquez, M. en C. Elia Escobar, Ing. Alexis Aguilar, Ing. Oscar Dimas, por el apoyo y amistad que me dieron durante la elaboración de esta tesis y que me fueron de una ayuda insustituible.

A todos mis compañeros y amigos de la facultad que me ayudaron dentro y fuera de las aulas: Jorge Montaña, Omar Pérez, Daniel Sandoval, Oscar Dimas, Oscar Peña, Oscar Castillo, Francisco Ávila, C. Copel, José Luís Zague, Vladimir López, Agustín Chapas, Toño Ruso, Gabriel Ramírez, Claudia Susa Rey, Lizbeth Evia, Daniel Juárez, Elizabeth Reyes, Lidia Meneses, Lucino A, Ísaël, Saúl, Tadeo Resendiz, Raúl Hernández, José Luis Morelia, José Castillo, Gustavo Mora, Jorge Banda, Lucia Jácome, Héctor Cavadas, Delfino, Libia y a todos los demás.

A mis compañeros y amigos de la prepa 1, Jacob Ramírez, Ángel Velasco, Felipe Vara, Francisco Flores, Humberto Medina, Crox Olivares, Sergio Laurel.

A mis amigos que algunos desde la infancia están conmigo: Carlos, Ernesto y Jesús, Martínez, Adolfo Andrade, Marco y Miguel Alcázar, David Chulin, Mario Galicia, Juan Carlos Canceco, David Córdoba, Alex Parientico, José y Adrián Ramírez, Mónica Citalán, al pequeño y dulce Miky, Erick Martínez., Erika Reyes, Raúl Villavicencio, Lolita Martínez, Argel, Sofía Hernández, Luciano Pineda, Carlos Amador, Juan Ángel Chávez, Carlos Cruz, Aaron Venegas, Alberto y Gabriel Briceño, Fabiola Canceco, Gloria, Elizabeth y Araceli Montaña., Liliana Silva, Alejandra Pineda, Antonio Contla, Teresa Martínez, Franz.

Doris y Ale gracias por estar conmigo en todo momento.

A Ana Berenice gracias por tu amistad y cariño espero contar contigo siempre.

A Hilda y a Laura por estar conmigo en los momentos cuando yo más necesitaba.

A Susana y a Valeria por darme un motivo más de superarme en todos los aspectos.

“No solo no hubiera sido nada sin ustedes, si no toda la gente que estuvo a mi alrededor desde el comienzo, algunos, siguen hasta hoy, gracias.....totales”

INDICE

	Página
Resumen.....	5
I. Introducción.....	7
II. Generalidades.....	10
II.1 Importancia de la Hidráulica.....	11
II.2 Conceptos de parámetros petrofísicos.....	16
III.3 Programa de Perforación.....	19
IV.4 Programa hidráulico por etapa.....	21
III. Desarrollo.....	34
III.1 El magnetismo en los materiales.....	35
III.2 técnicas de magnetismo de las rocas.....	40
IV. Evaluación de los intervalos de interés.....	44
V. Discusión.....	66
VI. Conclusiones.....	68
VII. Recomendaciones.....	69
VIII. Bibliografía.....	70

Resumen

El cráter Chicxulub se encuentra ubicado en la porción noroeste de la Península de Yucatán, sepultado por una secuencia de rocas carbonatadas de edad Terciaria. La estructura tiene un diámetro de 180-200 km aproximadamente y es definida morfológicamente como una cuenca multianillada con un levantamiento central. El impacto que formó Chicxulub ha sido asociado a los eventos que marcan la frontera Cretácico/Terciario (K/T). El cráter ha sido estudiado en las últimas dos décadas empleando diversos métodos geofísicos y a través de una programa de perforaciones dentro del Programa Universitario de Chicxulub y la frontera K/T. El programa de perforaciones incluye recuperación continua de núcleos y comprende varios pozos localizados en el sector sur de la estructura.

El proyecto de investigación en que se basa esta tesis forma parte del programa universitario y se concentra en el pozo UNAM 5 (Santa Elena), que permite investigar la secuencia carbonatada terciaria y la secuencia de impacto. El pozo se localiza al sur del anillo principal definido por las anomalías gravimétricas y los cenotes dentro del bloque levantado por la falla Ticul, a unos 110 km del centro del cráter. La profundidad total del pozo es de 503 m. El contacto entre la secuencia carbonatada del Terciario y las rocas de impacto se presenta a los 223 m ; Las rocas de impacto están formadas por brechas tipo suevita, rica en fragmentos de roca fundida y de basamento de silicatos, tiene una matriz macrocristalina así como una alta susceptibilidad magnética.

El presente trabajo tiene como objetivo hacer una correlación del registro de susceptibilidad magnética con sus respectivas características litoestratigráficas exponiendo el resultado del estudio al que fueron sometidos los núcleos extraídos del pozo UNAM 5. Este estudio se compone principalmente de mediciones de alta resolución de la susceptibilidad magnética acompañado de una descripción macroscópica de la litológica de los núcleos que presentaron una alta susceptibilidad, así como una comparación litológica de dichos intervalos y una discusión sobre los mismos. Como

conclusión se observó que la susceptibilidad magnética es un registro geofísico muy confiable para determinar cambios litológicos en diferentes unidades litoestratigráficas así como cambios específicos dentro de las mismas y constituye una herramienta de correlación estratigráfica de alta resolución.

I. Introducción

Los estudios sobre el cráter Chicxulub en la península de Yucatán han atraído la atención de grupos de investigación científica ocupados en temas tan diversos como la extinción de organismos, evolución de la vida, impactos de cometas y asteroides, evolución tectónica, geohidrología en ambientes carbonatados, cambios climáticos, etc. El cráter Chicxulub ha sido relacionado a una de las grandes catástrofes en la historia de la Tierra, que ocasionó la extinción de más del 60-70 % de las especies (entre ellas los dinosaurios) y marcó el inicio de la era Cenozoica (con la expansión de los mamíferos). El estudio del cráter de Chicxulub y los eventos que marcaron la transición del Mesozoico al Cenozoico (límite K/T) representa una valiosa oportunidad para la ciencia mexicana.

Como antecedente se puede mencionar que antes de 1980 se había sospechado de posibles relaciones entre la extinción masiva del Cretácico - Terciario y causas extraterrestres, tales como los efectos de supernovas y la colisión con meteoritos. Sin embargo, es a partir del estudio reportado por Álvarez y colaboradores (1980), que se contó con evidencia experimental sobre un posible impacto. A partir de este estudio y otros reportados en los dos siguientes años se generó un interés importante en la comunidad de ciencias de la Tierra. Este grupo de investigadores se encontraba investigando las secuencias sedimentarias carbonatadas en la provincia de Umbría, Italia, realizando estudios paleontológicos de foraminíferos (pequeños organismos marinos) realizados a principios de la década de 1960, habían permitido localizar la frontera Cretácico - Terciario. Esta frontera está representada por una delgada capa de arcilla intercalada entre formaciones carbonatadas. El interés principal de los trabajos era estudiar los cambios de polaridad del campo geomagnético registrados en las secuencias carbonatadas y documentar esos cambios en relación con la escala geomagnética de polaridad. Álvarez y colaboradores (1980) se interesaron en estimar el tiempo involucrado en la formación de esta capa y para ello decidieron analizar el contenido de Iridio, elemento que es relativamente raro en rocas terrestres y abundante en material extraterrestre.

Entre los grandes proyectos de investigación sobre este límite (el K/T), destaca el programa de perforación profunda en Chicxulub, que cuenta con una amplia participación internacional y es encabezado por investigadores mexicanos.

El cráter de impacto de Chicxulub tiene una alta importancia científica no sólo por su edad y sus consecuencias ambientales, sino porque constituye una estructura de impacto especialmente bien preservada debido a su formación y sepultamiento en una región tectónicamente estable en la plataforma carbonatada de la península de Yucatán. (Figura 1).

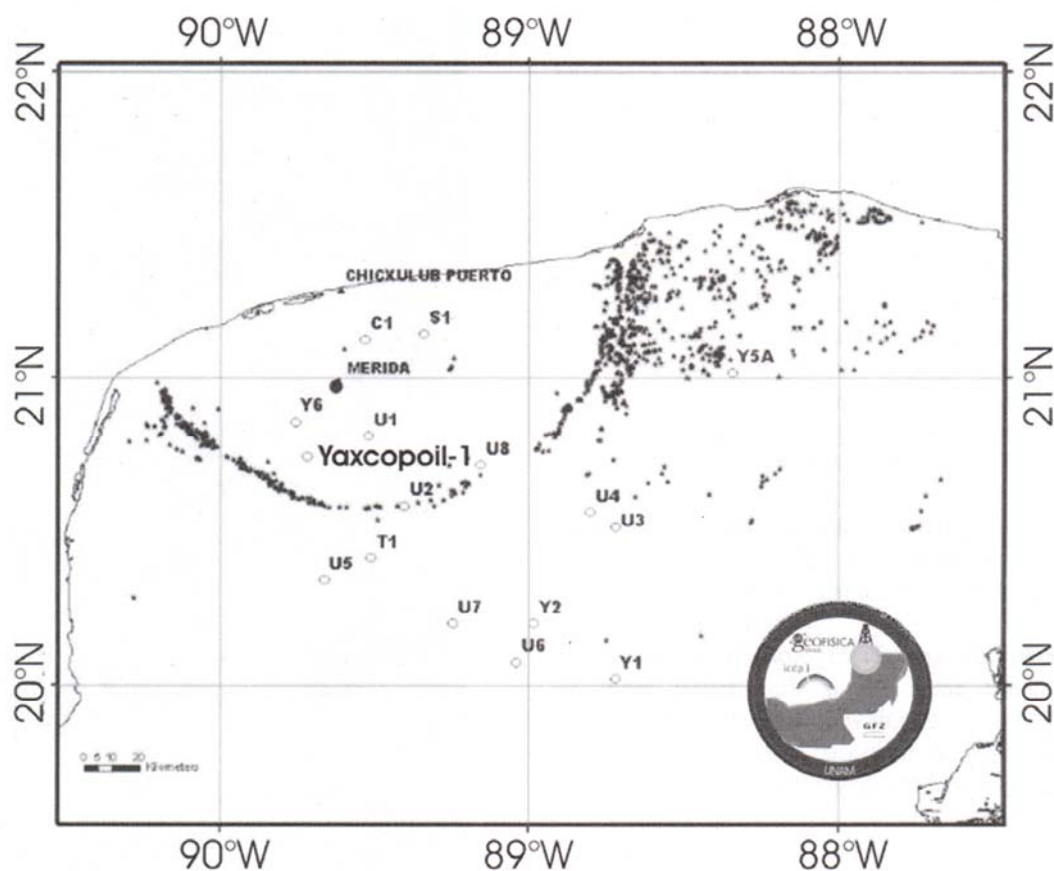


Fig. 1. Mapa de la localización del Proyecto de Perforación Científica de Chicxulub, donde se puede observar la ubicación de los pozos UNAM 5 (U5) y el pozo Yaxcopoil-1. El programa de perforación científica de la universidad incluye los pozos identificados con U y el número de pozo. Las perforaciones de exploración de PEMEX incluyen a los pozos C1, S1, Y6, Y5A. Los pozos de UNAM y Yaxcopoil-1 incluyen recuperación continua de núcleos. Y los de PEMEX con recuperación intermitente de núcleos.

Dentro de los temas científicos que han sufrido mayores revaloraciones con el descubrimiento del impacto de Chicxulub se encuentran: las extinciones masivas de vida en el planeta y el surgimiento de nuevos patrones evolutivos; el origen de las discontinuidades estratigráficas de escala mundial; las causas del cambio climático global y el papel del CO₂ en dichos cambios; el tiempo necesario para la restauración de los sistemas ecológicos después de grandes catástrofes, y las deformaciones de la corteza y otras consecuencias asociadas a impactos de meteoritos mayores. Para el estudio de los últimos tres temas tiene una gran relevancia la posibilidad de tener acceso a través de una perforación a muestras de diferentes niveles de la corteza superior en el sitio de impacto

En relación a los aspectos aplicados en el estudio de Chicxulub resaltan los relacionados a la geohidrología (acuíferos e intrusión salina profunda) en la región, conocimiento del subsuelo (estructura, estratigrafía y tectónica) y los recursos energéticos. Entre los logros de la investigación aplicada, se encuentra el descubrimiento de una buena parte de las rocas almacenadoras de petróleo en los campos del Sureste Mexicano, originadas como resultado del impacto de Chicxulub. Estos resultados ya han sido dados a conocer en publicaciones internacionales en las que han participado científicos del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), de Petróleos Mexicanos (PEMEX) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Esta relación está siendo evaluada también por los directivos técnicos del área de exploración en PEMEX y los modelos de génesis de las rocas asociadas a los yacimientos petroleros están siendo revisados.

II. Generalidades

En la mayor parte de la península de Yucatán aflora una secuencia cenozoica, principalmente calcárea, que no representa deformaciones significativas y está formada por capas que conservan una actitud horizontal.

Los depósitos cenozoicos de la península de Yucatán están representados principalmente por secuencias calcáreas y dolomíticas con intercalaciones de evaporitas. Investigadores han reconocido una columna que varía desde el Paleoceno hasta el Cuaternario. Esta columna incluye, en orden ascendente, las formaciones Chichén Itzá e Icalache del Paleoceno-Eoceno; las formaciones Bacalar; Estero Franco y Carrillo Puerto del Mioceno Superior, Plioceno y las calizas con moluscos del Pleistoceno-Holoceno. El Oligoceno no ha sido reconocido en superficie, pero fue cortado en las perforaciones exploratorias de los pozos Chicxulub No 1 y Sacapuc No. 1. La distribución en superficie de las unidades del Cenozoico muestra claramente una retirada gradual de los mares hacia la línea de costa actual y sólo en el Eoceno cuando los mares transgreden y cubren casi por completo la península de Yucatán.

La secuencia cretácica reconocida en las perforaciones de Petróleos Mexicanos, está constituida principalmente por anhidritas, calizas, dolomías e intercalaciones de bentonita y algunos materiales piroclásticos, sobre todo hacia la base que se encuentra formada por las evaporitas Yucatán (López Ramos, 1979). Todos los sedimentos del Cretácico que se han encontrado en las perforaciones de PEMEX pertenecen a la parte media y superior de este periodo.

Durante la segunda mitad del Cretácico y gran parte del Cenozoico, la península de Yucatán y su plataforma marina constituyeron un banco calcáreo en su forma de alto fondo marino, que se extendía hasta Chiapas y el sur de Veracruz, con el desarrollo de un borde que ha sido el principal objetivo petrolero de Tabasco y la plataforma marina de Campeche.

Debajo de esta secuencia cretácica se encontró, en los pozos Yucatán No.1 y No. 4, limolitas y areniscas con algunas intercalaciones de arenas y gravas de cuarzo, así como de bentonita verde y caliza dolomítica que López

Ramos considera en principio como perteneciente al intervalo Jurásico-Cretácico.

Tanto la secuencia cretácica que se encuentra en el subsuelo, como la secuencia cenozoica, no presentan mayores perturbaciones estructurales ya que sobreyacen a una masa cristalina que ha permanecido estable desde el Paleozoico.

II.1 Importancia de la Hidráulica y de los Registros Geofísicos.

La importancia de la Hidráulica para perforar se basa en la:

1. Remoción de recortes en el espacio anular.
2. Presión hidrostática para balancear la presión del poro y prevenir que se colapse el agujero del pozo.
3. DEC (Densidad Equivalente de Circulación)
4. Presiones de surgencia / suaveo durante los viajes de entrada y salida de la sarta en el pozo
5. Limitación de la capacidad de bombeo
6. Optimización del proceso de perforación (Máximo HHP consumido en la barrena o Máximo Impacto del Chorro)
7. Efectos de Presión y Temperatura

Entre otras aplicaciones de la hidráulica podemos mencionar:

1. Para calcular o estimar las velocidades de asentamiento de los recortes perforados con o sin circulación
2. Para calcular las presiones de surgencia y de suaveo
3. Para calcular velocidades seguras en corridas de sarta de perforación y de revestimiento
4. Para calcular la máxima velocidad de penetración para un gradiente de fractura dado

En el área de la ingeniería petrolera el estudio de la información de las características de las formaciones y así como el conocimiento de los diversos parámetros que tal información proporciona, son necesarios para evaluar eficientemente un yacimiento. Esta información se obtiene utilizando un método de muestreo llamado registro geofísico, que consta de la introducción (mediante cables con conductores eléctricos) de dispositivos medidores de los distintos parámetros característicos de las formaciones atravesadas y de su contenido.

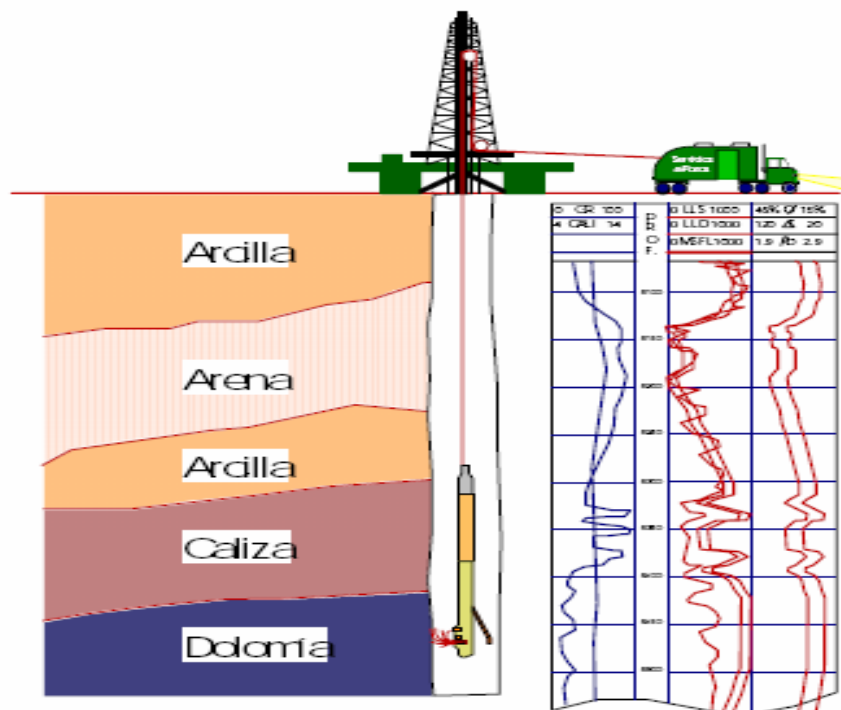


Figura 2. Representación del montaje básico del proceso de registro. Las herramientas de registro miden diferentes propiedades, a medida que la sonda es llevada a superficie. La información es procesada por una computadora en un vehículo de registro, y es interpretada por un ingeniero.

Los Registros geofísicos cumplen con diversos objetivos de los cuales se pueden mencionar los siguientes:

1. Determinación de las características de la formación (porosidad, saturación de agua e hidrocarburos, densidad)
2. Delimitación de la litología.
3. Medición del diámetro del agujero.
4. Dirección del echado de formación.

5. Evaluación de la cementación.
6. Condiciones mecánicas de la Tubería de revestimiento.

La formación es medida por la herramienta que es introducida en el pozo, esta contiene fluidos y es de forma irregular, así pues el sensor debe ser capaz de medir la propiedad de la formación con exactitud y enviar la información a la superficie.

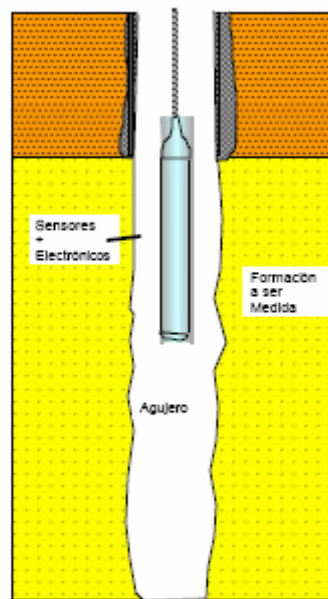


Fig. 3 Representación gráfica de la utilización de la herramienta midiendo en el interior del pozo.

Un conocimiento práctico de cada uno de los conceptos básicos de análisis de registros es fundamental para efectuar un estudio de la formación en cuestión. Los parámetros físicos necesarios para la evaluación de las formaciones resultan difíciles de obtenerse directamente. Es por eso que se deducen o se obtienen de la medición de otros parámetros físicos de las formaciones, las herramientas de registros actuales nos permiten obtener una gran cantidad de parámetros como son: la densidad, el tiempo de tránsito, el potencial natural, la radioactividad natural.

La interpretación de registros permite traducir estos parámetros medibles en los parámetros petrofísicos en los parámetros petrofísicos

deseados de porosidad, saturación de hidrocarburos, permeabilidad, litología entre otros. La interpretación de registros se complica debido a las alteraciones que provoca el proceso de la perforación, este proceso altera el contenido de fluidos en la vecindad del pozo, es por eso que las técnicas de interpretación son capaces de compensar el efecto de la zona alterada.

El propósito de las diferentes herramientas de registros geofísicos es proporcionar mediciones de donde se puedan obtener las características petrofísicas de las rocas del yacimiento. El objetivo de la **interpretación cuantitativa** de los registros es proporcionar las ecuaciones y técnicas para que dichos cálculos puedan llevarse a cabo.

La evaluación de formaciones es la práctica de determinar las propiedades físicas y químicas de las rocas y los fluidos contenidos en ellas, su objetivo es localizar, definir el material que se encuentra en la formación, los registros geofísicos son sólo algunas fuentes de datos usados en la evaluación de formaciones.

<i>Operación</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Métodos</i>
Exploración	Definir Estructura	Sísmica, mapeo gravitacional y mapeo magnético.
Perforación	Perforar el pozo	Registro de lodos, núcleos.
Toma de registros	Registrar el pozo	Registros de pozo abierto
Evaluación primaria	Análisis de registros y prueba	Núcleos de pared, sísmica vertical (VSP), pruebas de formación con cable, prueba de formación con tubería.
Análisis	Análisis de núcleos	Estudios de laboratorio
Retroalimentación	Refinamiento del modelo sísmico y análisis de registros	Calibración de registros vía resultados de análisis de núcleos,

		calibración sísmica de los resultados de análisis de registros
Explotación	Producción de hidrocarburos	Análisis de balance de materiales
Recuperación Secundaria	Inyección de agua o gas y registros de producción	Análisis de los registros de producción, análisis de propiedades microscópicas de la roca
Abandono	Decisiones económicas	

Tabla 1. En esta tabla se muestran la variedad de métodos de evaluación de formación utilizados por las compañías petroleras.

Para evaluar eficientemente una formación es indispensable contar con diferentes técnicas necesarias para obtener las características de la roca de una manera selectiva:

1. Registros Geofísicos.
2. Núcleos.
3. Métodos Sísmicos.

La **interpretación cualitativa** de los registros se compone de hacer una descripción general al conjunto de registros con la finalidad de identificar las zonas de interés, dentro de las cuáles en el ambiente petrolero se designan las siguientes:

1. Identificación de litologías.
2. Localización de zonas permeables.
3. Contenido de fluidos de las zonas permeables.
4. Condiciones del agujero que pueden afectar la respuesta de la herramienta.

(Cavernas, rugosidad, salinidad del lodo, etc.)

Es necesario que para tener una eficiente interpretación de los registros geofísicos, se debe tener conocimiento y manejo de los principios

básicos de operación y respuesta de las herramientas utilizadas así como las limitaciones en diferentes litologías, fluidos y condiciones de pozo.

II.2 Conceptos de parámetros petrofísicos

Los parámetros petrofísicos necesarios para evaluar una formación son la porosidad, saturación de agua y la permeabilidad.

Porosidad

La porosidad es el volumen de los poros por cada unidad volumétrica de formación. Puede ser primaria o secundaria.

Se pueden distinguir diferentes tipos de porosidad:

- a. Porosidad Total (ϕ_t): es la relación del volumen total de espacios vacíos poros que existen entre los diferentes elementos minerales de la roca, con respecto al volumen total de la roca.

$$\phi_t = (V_t - V_s) / V_t = V_p / V_s$$

Donde:

V_p = Volumen de espacios vacíos

V_s = Volumen ocupado por los elementos sólidos

V_t = Volumen total de la roca

- b. Porosidad primaria (ϕ_p): Es aquella formada exclusivamente por aquellos poros que están conectados entre sí.
- c. Porosidad Secundaria (ϕ_s): Es un término usado exclusivamente en el análisis de registros de pozos, es la porosidad accesible a los fluidos libres, excluye por lo tanto a la porosidad no conectada y al volumen ocupado por el agua ligada a las arcillas.

Saturación

Es la fracción del volumen de poro de una roca que está lleno de fluido.

$$S = (\text{volumen de fluido}) / (\text{volumen del poro})$$

En registros de pozos generalmente se habla de la saturación de agua, ya que es muy común evaluarla.

Permeabilidad

Es la medida de la capacidad del medio para permitir el paso de los fluidos. Es una característica física de la roca que depende del arreglo de los granos. Es difícil cuantificarla a partir de los registros, la unidad es el milidarcy. Se puede dividir en absoluta, cuando sólo hay un fluido en los poros, efectiva cuando hay más de un fluido en los poros y relativa que es la relación entre la permeabilidad efectiva con un fluido en específico y la permeabilidad absoluta.

Hasta ahora la manera más exacta de cuantificarla es a partir de análisis de núcleos. Una estimulación a partir de registros para rocas granulares es propuesta por Timur:

$$K = (0.136 \phi)(S_{wi}^2) \text{ milidarcys}$$

Donde S_{wi} es la saturación del agua irreductible

De los parámetros de la formación obtenida directamente de los registros geofísicos, el de resistividad es de particular importancia, es un parámetro esencial para la determinación de las saturaciones. Se utilizan mediciones de resistividad, individualmente ó en combinación, para conocer la resistividad de la formación de la zona virgen, esto es detrás de la zona contaminada por los fluidos de perforación.

También son utilizadas para determinar la resistividad de la zona cercana a la pared del pozo, donde el filtrado del lodo ha remplazado gran parte de los fluidos originales. Se usan los datos de resistividad junto con los de porosidad y de la resistividad del agua de formación para obtener valores de saturación de agua. Los datos de saturación obtenidos a partir de mediciones de resistividad de poca o mucha penetración en la formación son computados

después, para evaluar la probabilidad de que la formación en estudio produzca hidrocarburos.

Resistividad

La resistividad de una sustancia es su capacidad para impedir la circulación de una corriente eléctrica a través de esta sustancia. La unidad de resistividad usada en el registro eléctrico es el ohm - metro. La resistividad de una formación en ohm - metro es la resistencia en ohm de un cubo de un metro de lado cuando la corriente fluye entre las caras opuestas al mismo.

Todos los minerales secos, no-metálicos (matriz de roca), tienen una alta resistividad. Los hidrocarburos (aceite o gas) tienen una alta resistividad, el agua de formación tiene un valor de resistividad que cambia dependiendo de la salinidad y la temperatura del agua.

<i>Tipos de Formación</i>	<i>Rangos de Resistividad (ohm – m)</i>
Blandas (arenas con lutitas)	0.2 a 50
Duras (Carbonatos)	0 a 1000
Evaporitas (sal y anhidrita)	+ 1000

Tabla 2. Se muestra los diferentes rangos de resistividad para diferentes tipos de formación.

Los registros son usados, para ubicar y evaluar depósitos de minerales (galena, calcopirita) tienen resistividades muy bajas. Se puede determinar rápidamente la profundidad y el espesor de estos depósitos minerales con registros de resistividad.

La mayoría de las formaciones que contienen hidrocarburos están constituidas por rocas que, al no tener fluidos conductores o estar secas, no conducen corriente eléctrica. La corriente puede fluir solamente a través del agua irreductible, la que es conductora debido a su contenido de sales en solución. Siendo constantes otros factores, a mayor concentración de sales menor la resistividad del agua de formación y, por tanto de la formación. En el caso de un agua de formación que contiene solamente cloruro de sodio, su resistividad R_w , es función de su salinidad y su temperatura.

La arcillosidad también contribuye a la conductividad de las formaciones. El efecto neto de la arcillosidad depende de la cantidad, tipo y distribución, y la naturaleza y cantidad relativa del agua de formación.

II.3 Programa de Perforación en la estructura de impacto Chicxulub

La primera etapa es la de planeación; en esta se contemplan las siguientes fases:

1. Recopilación de la información.
2. Análisis de la presión de formación.
3. Predicción del gradiente de fractura.
4. Asentamiento de la T.R's.
5. Diseño de la geometría del pozo.
6. Diseño del fluido de perforación.
7. Diseño de la cementación.
8. Programas de barrenas.
9. Diseño de T.R's.
10. Diseño de la sarta de perforación.
11. Selección del equipo de perforación.
12. Planeación de la terminación.
13. Estimación de costos.

Teniendo una buena planeación de la perforación lo que sigue es tener un control muy detallado de las herramientas necesarias para que ésta sea segura, eficiente y económica.

Considerando la información de otros pozos perforados con anterioridad en la zona de Yucatán, específicamente el pozo Yucatán-6 en donde se utilizó sin ningún problema agua como fluido de perforación, se utilizó también en el pozo Yaxcopoil - 1 un lodo bentonítico base agua. Del cual se muestra el control del lodo por etapas:

<i>Diámetro</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Densidad</i>	<i>Filtrado</i>	<i>Viscosidad</i>
17 1/2 "	0.00 - 10.0	1.02 - 1.04	5.0 - 7.0	55 - 60

12 1/4 "	10.0 - 400.0	1.06 - 1.08	12.0 - 14.0	45 - 50
8 1/2 "	400.0 – 800.0	1.08 - 1.10	10.0 - 12.0	45 - 50

De igual forma se tomó en cuenta el pozo Yucatán 6 para el control de barrenas, de las cuales se tiene como característica que se utilizaron barrenas del tipo tricónicas con insertos de carburo de tungsteno y dientes de acero. A continuación se muestra el control de las barrenas por etapas:

<i>Diámetro ext.</i>		<i>Tipo Tob.</i>		<i>Intervalo</i>
1°	17 1/2"	5-2-7	20/32"	0 - 10.
2°	12 1/4"	3-1-1	15/32"	10 - 100
	12 1/4"	3-1-1	15/32"	100 - 250
	12 1/4"	3-1-1	15/32"	250 – 400
	4"	Corona		400 - 800
3°	8 1/2"	5-1-7	14/32"	400 - 470
	8 1/2"	5-1-7	14/32"	470 – 540
	8 1/2"	5-1-7	14/32"	540 – 610
	8 1/2"	5-1-7	14/32"	610 – 680
	8 1/2"	5-1-7	14/32"	680 -800

Con respecto a las tuberías de revestimiento se utilizaron tres con las siguientes características:

1. Conductora: de 13 3/8 " de diámetro, grado k-55 de 54.5 lb/ft instalada de 0 a 10 m. de profundidad, con el objetivo de aislar los acuíferos de la zona y proporcionar un conducto para la circulación del lodo de perforación desde la superficie hasta la barrena.
2. Superficial: de 9 5/8" de diámetro, grado J-55 de 32.3 lb/ft instalada de 0 a 400 m de profundidad, con el objetivo de aislar y proteger los acuíferos, mantener la estabilidad del pozo, instalar los sistemas de seguridad y soportar el peso de las demás tuberías.

3. Intermedia: de 7" de diámetro, grado J-55 de 17 lb/ft instalada de 0 a 800 m de profundidad, con el objetivo de cubrir zonas de alta presión, así como el de aislar formaciones salinas, lutitas, cubrir zonas cavernosas y mantener la estabilidad del pozo.

A continuación se presenta la siguiente tabla con el objetivo de mostrar por etapa el programa hidráulico y las sartas utilizadas:

IV.4 Programa hidráulico del pozo por etapa

BOMBA GARDNER DENVER MODELO PZ-8-750-HP--TRIPLEX - 6 1/4"X 8"								
EMB/MIN	170	160	150	140	130	120	MAX PRESION	GAL/REV
CAMISA	DESCARGA EN GPM							
6 1/4	542	510	478	446	414	382	2200	3.19
6	499	470	441	411	382	352	2385	2.94
5 1/2	419	395	370	345	321	296	2843	2.47
5	346	326	306	285	265	244	3433	2.04
4 1/2	280	264	247	231	214	198	4238	1.65
4	222	209	196	183	170	157	5381	1.31
MAX HP	772	728	684	640	596	552		

Tabla 3. Información de las bombas empleadas para el programa hidráulico.

Calculo de la hidráulica de fluidos de perforación para la 1ª. Etapa

DATOS DE BOMBAS		
CAMISA (pg)	CARRERA (pg)	% EFICIENCIA
6.25	12	95
EMBOLADAS POR MINUTO		170
GASTO (gal/min)		772

DATOS DEL LODO		
DENSIDAD (gr/cm ³)	VISCOCIDAD PLÁSTICA (cp)	PUNTO DE CEDENCIA (lb/100 pie)
1.09	14	10
FANN 3 rpm		8

DIAMETRO DE LA BARRENA		17 1/2	
TOBERAS (pg)			
20/32	20/32		20/32
AREA TOTAL DE FLUJO (T.F.A.)		0.9204	

DATOS DE T.P. (16.60 lb/pie)		
D.E. pulg.	D.I. pulg	Long. mts
4 1/2	3.816	10

PROFUNDIDAD, mts.	10
--------------------------	----

Datos hidráulicos

Caída de Presión Interior en la sarta, psi.	6.4
Caída de Presión en el espacio anular, psi.	0.1
Caída de Presión en la barrena, psi.	588.4
Caída de Presión total, psi.	594.8
Densidad Efectiva de Circulación, gr/cm ³	1.097
Velocidad Anular entre la T.P. y Aguj.,pie/min	66
Volumen Interior., Lts	0.145
Volumen anular, Lts.	1
Volumen en el agujero sin sarta, Lts.	2
Tiempo de atraso, min	1
Eficiencia de transporte de recortes	73.5
Concentración de recortes a 20 m/hr	2.4 %
D.E.C. con cortes, gr/cm ³	1.134

Calculo de la hidráulica de fluidos de perforación para la 2ª. Etapa

DATOS DE BOMBAS		
CAMISA (pg)	CARRERA (pg)	% EFICIENCIA
6.25	12	95
EMBOLADAS POR MINUTO		120
GASTO (gal/min)		545

DATOS DEL LODO		
DENSIDAD (gr/cm ³)	VISCOCIDAD PLÁSTICA (cp)	PUNTO DE CEDENCIA (lb/pie)
1.09	14	12
FANN 3 rpm		8

DIAMETRO DE LA BARRENA (pg)		12 1/4	
TOBERAS (pg))			
15/32	15/32	15/32	
AREA TOTAL DE FLUJO (T.F.A.)		0.5177	

DATOS DE T.P. (16.60 lb/pie)		
D.E. pulg.	D.I. pulg	Long. mts
4 ½	3.816	319

DATOS DE T.R. (36 lb/pie)		
D.E. pulg.	D.I. pulg	Long. mts
3 3/8	12.275	10

DATOS DE H.W.		
D.E. pulg.	D.I. pulg	Long. mts
5	2.812	54

DATOS DE D.C.		
D.E. pulg.	D.I. pulg	Long. mts
8	2.812	27

PROFUNDIDAD, mts.	400
-------------------	-----

Datos hidráulicos

Caída de Presión Interior en la sarta, psi.	222.8
Caída de Presión en el espacio anular, psi.	10.1
Caída de Presión en la barrena, psi.	926.5
Caída de Presión total, psi.	1159.5
Densidad Efectiva de Circulación, gr/cm ³	1.108
Velocidad Anular entre T.P. y T.R., pie/min	102
Velocidad Anular entre la T.P. y Aguj.,pie/min	103
Velocidad Anular entre D.C.-Aguj.,pie/min	155
Volumen Interior., Lts.	3 000
Volumen anular, Lts.	26 000
Volumen en el agujero sin sarta, Lts.	30 000
Tiempo de atraso, min	12
Eficiencia de transporte de recortes	82.4
Concentración de recortes a 20 m/hr	1.5 %
D.E.C. con cortes, gr/cm ³	1.130

Calculo de la hidráulica de fluidos de perforación para la 3ª. Etapa

DATOS DE BOMBAS		
CAMISA	CARRERA	% EFICIENCIA
6	12	95
EMBOLADAS POR MINUTO	122	
GASTO	688	

DATOS DEL LODO		
DENSIDAD	VISCOCIDAD PLÁSTICA	PUNTO DE CEDENCIA
1.09	64	14
FANN 3 rpm		8

DIAMETRO DE LA BARRENA		8 1/2	
TOBERAS (PG)			
14	14	14	
AREA TOTAL DE FLUJO (T.F.A.)		0.4510	

DATOS DE T.P. (16.60 lb/pie)		
D.E. pulg.	D.I. pulg	Long. mts
4 ½	3.816	584

DATOS DE T.R. (36 lb/pie)		
D.E. pulg.	D.I. pulg	Long. mts
9 5/8	8.921	400

DATOS DE H.W.		
D.E. pulg.	D.I. pulg	Long. mts
5	2.812	135

DATOS DE D.C.		
D.E. pulg.	D.I. pulg	Long. mts
6.5	2.812	81

PROFUNDIDAD, mts.	800
-------------------	-----

Datos hidráulicos

Caída de Presión Interior en la sarta, psi.	738.8
Caída de Presión en el espacio anular, psi.	136.6
Caída de Presión en la barrena, psi.	1037
Caída de Presión total, psi.	1912.5
Densidad Efectiva de Circulación, gr/cm ³	1.210
Velocidad Anular entre T.P. y T.R., pie/min	207
Velocidad Anular entre la T.P. y Aguj.,pie/min	236
Velocidad Anular entre D.C.-Aguj.,pie/min	410
Volumen Interior., Lts.	5 000
Volumen anular, Lts.	21 000
Volumen en el agujero sin sarta, Lts.	31 000
Tiempo de atraso, min	11
Eficiencia de transporte de recortes	88.2
Concentración de recortes a 20 m/hr	0.7 %
D.E.C. con cortes, gr/cm ³	1.22

La siguiente figura muestra las características y profundidad de asentamiento de las diferentes tuberías seleccionadas.

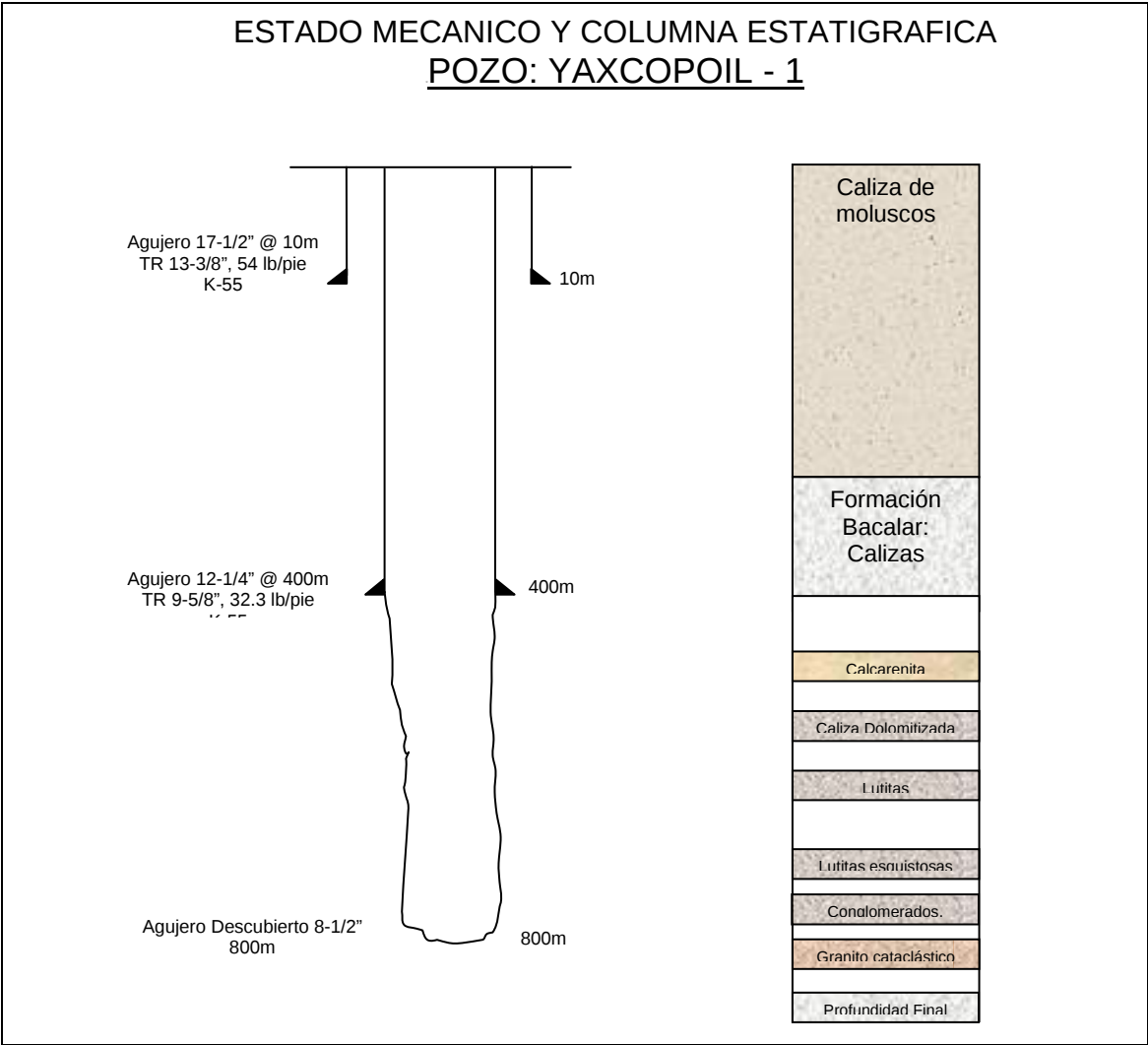


Figura 4. Diagrama mecánico del pozo Yaxcopoil – 1 y columna estratigráfica de la península de Yucatán (modificada de Anderson et al., 1973, tomada de la tesis de Vázquez, 2000)

Datos hidráulicos

La disponibilidad de la potencia hidráulica y de la velocidad de rotación así como el equipo para el manejo y el control del fluido se tomaron en cuenta para la selección del equipo. (*)

Características del Equipo PIT - EP - 007:

- Capacidad de 450 H.P.
- Carga Máxima de 250 Toneladas
- Velocidad de rotación de 200 RPM

Construcción del contrapozo

Se construyó de acuerdo a la altura de la mesa rotaria permitiendo la libre instalación del equipo de control superficial requerido. Sus características son 3.0 m de largo 2.0 m de ancho y 1.7 m de profundidad.

Para el abastecimiento de agua dulce para la preparación de lodos y otros usos fue necesario perforar un pozo artesano a una profundidad de 10.0 m.

Perforación de la etapa conductora

Al terminar con la excavación del contrapozo, se perforó con barrena de 17 1/2" de diámetro y sarta de perforación hasta la profundidad de 10.0 m. después se procedió a cementar tubería de revestimiento de 13 3/8" de D.E. de 54 lb/ft, grado K-55 rosca butres, bombeando 0.63 m³ de lechada de cemento, el cual se desplazó bombeando 0.62 m³ de lodo.

Perforación de la etapa superficial

Se realizó con una barrena de 12 1/4" de diámetro y sarta estabilizada. La zapata de cemento dentro de la tubería se tuvo que rebajar, y se perforó en estas condiciones hasta los 400 m de profundidad. Se taponaron todos los intervalos de pérdidas de circulación totales o parciales, mediante la colocación de tapones de cemento. Después se instaló a esta una zapata flotadora de 9 5/8" de diámetro, con las mismas características de 32.3 lb/ft, grado K-55, rosca STC en el extremo inferior del primer tramo, así como un cople flotador de 9 5/8" de diámetro con las mismas características de operación entre el primero y el segundo tramo. Durante la corrida se llenó la tubería en tres estaciones, para evitar la flotación. después se procedió a cementar la tubería de revestimiento de 9 5/8" de D.E., de 32.3 lb/ft, grado K-55, rosca STC, posteriormente se instaló el equipo superficial de control la cementación de esta tubería se llevó a cabo bombeando 14.0 m³ de cemento que se desplazaron con 39.0 m³ de lodo.

Una vez cementada se colocó el equipo superficial de control del pozo, instalando el cabezal en la tubería de 9 5/8" cementada, este se preparó para alojar cuñas colgadoras para la tubería de revestimiento de 5" de diámetro y se utilizó como guía en la etapa de corte de núcleos.

Posteriormente se colocó el juego de preventores QR 10 serie 900 de arietes, anular y ciego, preventor esférico 12"-3000. Posteriormente se armo la barrena 8 1/2" D.E. y sarta lisa, se bajó circulando hasta la profundidad aproximada de 385.0 m, donde se verificó la ubicación de los tapones y se rebajaron al igual que el cople flotador, cemento y la zapata flotadora, perforando hasta 401.0 m. se circuló para limpiar el agujero.

Perforación de la etapa intermedia

Se utilizó una corona de 4" de diámetro, barril muestrador y se bajó la sarta hasta los 400 m, para comenzar a cortar de 400 m a 800 m recuperando los núcleos hasta la superficie.

Con barrena de 8 1/2" de diámetro, la sarta estabilizadora se bajó hasta los 400 m y se amplió el intervalo nucleado hasta los 800 m, una vez terminada esta etapa se inició un viaje de reconocimiento acondicionando el lodo.

Proceso y Recuperación de Núcleos

Se llevó a cabo a partir de los 287 m. El equipo (DOSECC) fue instalado al equipo PIT-EP-007, para iniciar el programa de corte y recuperación de núcleo continuo, hasta la profundidad programada. Se utilizó como guía la tubería de revestimiento de 7", J-55 de 17.0 lb/ft, rosca LTC que se colgó al cabezal de revestimiento de 9 5/8".

El sistema híbrido de nucleado continuo, presenta un mecanismo rotatorio y un dispositivo de alimentación hidráulico o top drive conectado a los elevadores de la torre de perforación. Este tipo optimiza sustancialmente la operación de recuperación continua y en poco tiempo, reduciendo los costos.

Equipo utilizado para la recuperación de núcleos

El equipo de corte utilizado es el WL-HYBRID CORINGS SYSTEM (DOSECC), complementado con bombas triples, rotaría móvil, cilindro alimentador, malacate, etc.

Procedimiento de la recuperación continua de núcleos con el sistema DOSECC

1. Ciclo de la recuperación de núcleos

Se inicia con la conexión de un tramo de tubería en la sarta de perforación, después se da movimiento a la sarta a través de la rotaria para que la corona actúe con el efecto de corte sobre la roca.

Mientras el agujero es perforado, la roca que va siendo cortada se introduce en el interior del barril muestrero, cuando el tramo conectado ha penetrado la profundidad a la longitud del barril nucleador, entonces se procede a recuperarlo.

Ya en la superficie es desconectado y se mete un nuevo barril que se ha preparado con anticipación, el cual se deja caer actuando el peso del barril únicamente por la fuerza de gravedad y el efecto de flotación funciona como sistema de amortiguamiento y frenado en la caída del mismo. Mientras un nuevo barril cae, se procede a conectar un tramo de tubería de perforación y de este modo se completa todo el ciclo.

2. Características de los núcleos

Los núcleos recuperados tienen un diámetro de 63 mm, el cual fue obtenido por un barril de diámetro exterior de 76 mm y una longitud de 3.05m o 10 ft, este diámetro se conservó de los 400 m a los 800 m de profundidad. A los mismos no se les realizó ninguna prueba de orientación.

3. Manejo de los núcleos

Una vez que se recuperó el barril muestrador, se extrae el núcleo mediante la mecánica adecuada para no perder la secuencia de penetración, es decir, la cima y la base del núcleo. Este núcleo entonces se deposita en la base metálica y se marca con dos líneas de diferente color, diametralmente opuestas, para asegurar no perder la cima y la base del núcleo, se mide la longitud del mismo, se lava con agua y se seca, después se corta en fragmentos de 60 cm de largo y se guarda en cajas, que de igual manera, tienen marcado el inicio y término del tramo, por último, para distinguir donde termina una corrida y donde empieza otra, se separan por medio de un pedazo madera, el cual tiene impreso el número de corrida de inicio,

la profundidad de la misma (por un lado) y por el otro, el número de la corrida anterior y la profundidad de la misma.

Para su manejo se depositaron en cajas, cada una con la siguiente información:

- Nombre del pozo
- Número de caja.
- Profundidad de inicio del núcleo, (tanto en parte superior como en los laterales).
- La caja también se marca con su número, inicio y final de la misma.

Terminación

Los preventores utilizados fueron de tipo esférico y el otro doble (QRC2002); como el programa no tenía contemplado que tipo de terminación se requería, se optó por dejarlo descubierto de 400 m a 800 m, y en la cabeza se instalaron las herramientas correspondientes para que en su momento pueda ser abierto, ya sea para la toma de registros geofísicos o bien para retomar la exploración.

III. Desarrollo

Antecedentes

A principios del siglo XX (1906), se descubre los efectos de las inversiones magnéticas en basaltos, al observar que algunos flujos de rocas volcánicas estaban magnetizados en dirección opuesta al campo magnético actual. En 1929 se argumenta que la escala de tiempo está asociada a cambios de polaridad pues las rocas más recientes, tienen polaridad normal y las más antiguas del Cuaternario, son de polaridad invertida y propone la primera escala magnética para el Plioceno. En 1963 se propone una primera Escala de Tiempo de Polaridad Geomagnética, con base en medidas directas realizadas en rocas volcánicas fechadas con K/Ar (Barreto, 1997). En la actualidad a esta disciplina que estudia el magnetismo de la Tierra, se le conoce como Geomagnetismo, para evitar el uso de la antigua expresión híbrida “magnetismo” (del griego) y “terrestre” (del latín), (Chapman, 1938).

Aún conocemos relativamente poco acerca del origen del campo magnético terrestre y los cambios rápidos que han sido detectados se oponen a la hipótesis de un imán permanente en el interior de la Tierra. Por su parte, los estudios sismológicos que han contribuido a mejorar el conocimiento del interior de la misma, no proporcionan evidencias de que exista una enorme concentración de magnetita actuando como un imán permanente en su interior, además, muchos de los minerales magnéticos que ocurren naturalmente, solo pueden existir en la corteza terrestre (primeros 30 km de la misma), ya que por debajo de esa profundidad deberían desmagnetizarse debido al calor interno del planeta. De este modo, el campo magnético terrestre no puede ser generado por el simple magnetismo de las rocas (Alva, 1996, 2005).

III.1 El magnetismo en los materiales

(Diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo)

El campo magnético se produce por el movimiento de carga eléctrica, que a nivel atómico es producido por el movimiento de un electrón, por tanto se puede decir que todas las sustancias son magnéticas, aunque con comportamientos distintos y pueden ser clasificadas como diamagnéticas, paramagnéticas o ferromagnéticas.

La respuesta **diamagnética** a la aplicación de un campo magnético, es la adquisición de una pequeña magnetización inducida, M_i , opuesta al campo aplicado, H (magnetización antiparalela). La magnetización depende linealmente del campo aplicado y se reduce a cero al remover el campo. Los materiales diamagnéticos se caracterizan porque en ellos el momento magnético atómico es cero, la susceptibilidad es negativa, es independiente de la temperatura y es del orden de 10^{-5} SI (Figura 2a); ejemplos de este tipo de sustancias son el cuarzo, la calcita, los feldespatos y el agua (Butler, 1998; Evans y Heller, 2003).

Los materiales **paramagnéticos** contienen átomos con momentos magnéticos atómicos diferentes de cero y adquieren una magnetización inducida, M_i , paralela al campo aplicado, H ; para cualquier condición geológica relevante, M_i es linealmente dependiente de H . Al igual que en los materiales diamagnéticos, la magnetización se reduce a cero cuando se quita el campo magnetizante (Figura 2b). El paramagnetismo es un fenómeno muy dependiente de la temperatura, y esto se expresa en la ley Curie de susceptibilidad paramagnética, la cual predice que la susceptibilidad disminuye con el aumento en temperatura y se aplica a cualquier situación típica en magnetismo de rocas. El olivino, los piroxenos (p.e. augita), los anfíboles (p.e. hornblenda), las micas (biotita, clorita, etc), las arcillas ricas en Fe, la lepidocrocita y la siderita, son ejemplos de sustancias paramagnéticas (Evans y Heller, 2003).

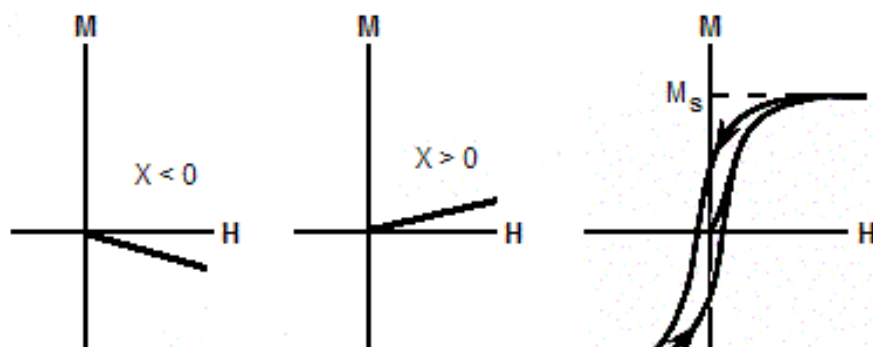


Figura 2. Comportamiento magnético de diferentes sustancias. (a) Sustancia diamagnética, (b) paramagnética y (c) ferromagnética. H es el campo magnético aplicado; M la Magnetización; M_s la magnetización de saturación; y χ es la susceptibilidad magnética (Butler, 1998).

Los sólidos **ferromagnéticos** tienen átomos con momentos magnéticos diferentes de cero, pero estos sí interactúan fuertemente con los momentos atómicos adyacentes, este efecto produce magnetización de varios órdenes de magnitud mayores que los sólidos paramagnéticos bajo el mismo campo magnetizante. Para cierto material ferromagnético y una temperatura dada hay una magnetización máxima llamada magnetización de saturación, M_s , ésta disminuye conforme aumenta la temperatura, y es cero en la temperatura Curie, T_c , característica de cada mineral ferromagnético (580 °C para magnetita y 680 °C para hematita), para temperaturas mayores a la T_c el material se vuelve paramagnético. La propiedad fundamental del material ferromagnético es su capacidad de registrar la dirección del campo magnético aplicado. Al quitar el campo magnetizante, la magnetización no regresa a cero sino que guarda un registro del campo aplicado. A la trayectoria de magnetización M , en función del campo magnético aplicado, H , se le llama *ciclo de histéresis* (Figura 2c), (Butler, 1998).

En los materiales ferromagnéticos, el intercambio de energía puede producir un acoplamiento de intercambio paralelo o antiparalelo (Figura 3), esto hace que los materiales se clasifiquen en **Ferrimagnéticos**, que son metales como el hierro, magnetita, maghemita, goetita y pirrotita, en los que los momentos magnéticos de los átomos son desiguales y antiparalelos (en el mismo sentido), por lo que resulta una magnetización apreciable; y los **Antiferromagnéticos**, óxidos como la hematita, ulvoespinela o la ilmenita con capas con momentos magnéticos iguales y antiparalelos, $M_s = 0$, que

ocasionan una magnetización débil o nula; esta propiedad desaparece al calentarse y pasar por una temperatura típica, conocida como temperatura de Neel (Evans y Heller, 2003).

El **Superparamagnetismo** (SP), es un comportamiento especial de los granos ferrimagnéticos muy pequeños (dominio sencillo de 0.001-0.01 μm de diámetro), que bajo la presencia de un campo magnético adquieren una gran magnetización remanente, pero muy inestable y de una manera similar a lo que sucede con las sustancias paramagnéticas, desaparece rápidamente en cuanto se elimina el campo magnetizador. Son incapaces de retener una magnetización remanente estable a temperatura ambiente, lo que se atribuye al desarrollo de vibraciones térmicas.

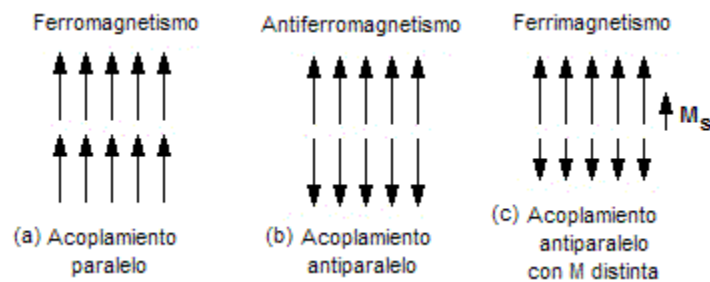


Figura 3. Comportamiento de los materiales ferromagnéticos. (a) El intercambio de energía puede producir un acoplamiento de intercambio paralelo o antiparalelo. (b) Los *Antiferromagnéticos*, tienen momentos magnéticos iguales y antiparalelos, $M_s = 0$, lo que ocasiona una magnetización débil o nula. (c) Los Ferrimagnéticos tienen los momentos magnéticos de los átomos desiguales y antiparalelos (en el mismo sentido), por lo que resulta una magnetización apreciable. M es la magnetización; y M_s la magnetización de saturación.

Tipos de magnetizaciones en las rocas

La magnetización remanente en las rocas está dada por la presencia de minerales ferrimagnéticos o ferromagnéticos parásitos, incluidos en una matriz de minerales diamagnéticos o paramagnéticos. Ésta magnetización es la evidencia de cambios en el campo magnético terrestre, sucedidos a lo largo del registro geológico y es detectada más fácilmente en las rocas ígneas máficas, como el basalto, aunque también es posible detectarla en rocas metamórficas, sedimentarias e inclusive en sedimentos.

Los mecanismos mediante los cuales las rocas pueden adquirir sus diversos tipos de magnetizaciones remanentes, dependen de los procesos físico-químicos presentes en el momento de la magnetización; a continuación se mencionan los más frecuentes.

Magnetización remanente térmica o termo remanente

Ocurre cuando la lava se enfría y se forman pequeños cristales de magnetita, que están por un momento libres en el fluido, moviéndose y orientándose por si mismos con el campo magnético Terrestre existente. Al pasar el tiempo, la lava se solidifica y los cristales de magnetita adquieren esa posición fija, registrando el alineamiento del campo magnético en ese instante (Figura 4).

El proceso que le ocurre al magma, es que al enfriarse y pasar por debajo del punto de Curie, los minerales ferromagnéticos adquieren el magnetismo y por tanto se orientan con el campo magnético terrestre; esta temperatura o punto Curie, es característica de cada mineral ferromagnético, por ejemplo, para la magnetita es de 580 °C y para la hematita de 680 °C; en los materiales antiferromagnéticos se le denomina temperatura de Neel.

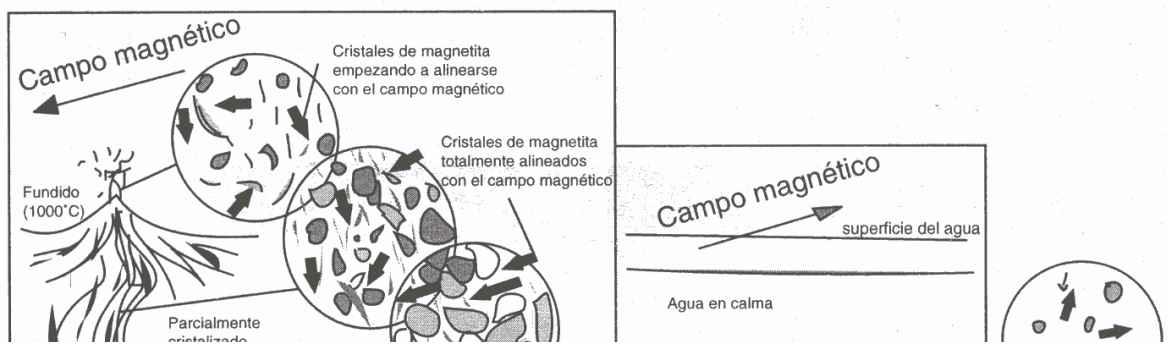


Figura 4. Orientación de partículas magnéticas con el Campo Magnético Terrestre. A la izquierda se observa el proceso en lavas, el cual se conoce como Magnetización Remanente Térmica y a la derecha se observa en sedimentos, conocido como Magnetización Remanente Detrítica (Tomada de Alva, 1996).

Magnetización detrítica

Es similar a la anterior, ya que los minerales magnéticos (magnetita y hematita) arrastrados como partículas en un medio acuoso, son libres de rotar como agujas imantadas y se orientan paralelamente al campo magnético terrestre antes de su depósito y quedan inmovilizados por el sedimento sobreyacente cuando se depositan. Al quedar sepultados por sedimentos subsecuentes, ya no pueden moverse libremente y de este modo se forma un registro permanente de los campos magnéticos pasados de la Tierra (Alva, 1996). (Figura 4).

Magnetización posdetrítica

Se adquiere posterior al depósito del sedimento y es previa a la consolidación del mismo. Ocurre cuando los sedimentos se compactan y por tanto reorientan su inclinación magnética, al perder el agua intersticial

III.2 Técnicas de estudio del magnetismo en rocas

Los minerales magnéticos en la naturaleza, son derivados de diversas fuentes y procesos tanto en la atmósfera como en la litósfera, hidrósfera y biósfera, dando lugar al depósito de los mismos en diferentes ambientes, aunque estos minerales también pueden originarse debido a procesos posdeposicionales. Cada uno de estos aspectos puede ser analizado por las técnicas de estudio del Magnetismo Ambiental. Estos estudios han sido aplicados en diversos campos tales como: climatología, ecología, geomorfología, hidrología, uso del suelo, limnología, oceanografía, sedimentología y pedología (Thompson y Oldfield, 1986).

Los estudios de magnetismo de rocas en sedimentos, requieren fundamentalmente que sean definidas tres variables de la fracción magnética: la concentración, la distribución de tamaños de grano (dominio magnético) y el tipo de mineralogía magnética presente. Para ello, se analiza un conjunto de propiedades magnéticas que por sí solas, o expresadas en cocientes entre ellas, son sensibles a una o más de estas variables.

La *concentración* de minerales magnéticos se estima a partir de parámetros tales como la susceptibilidad, la magnetización de saturación y la remanencia de magnetización de saturación (isotermal y anhistérica). Para estimar estos parámetros, es necesario impartir en el laboratorio magnetizaciones (reversibles e irreversibles) y remanencias artificiales. La *distribución de tamaños de grano* se establece generalmente a través de la medida de parámetros de histeresis (coercitividades, saturaciones) y de algunos cocientes entre estos parámetros. La *mineralogía magnética* puede determinarse indirectamente a través de la medida de la temperatura de Curie, de las transiciones cristalográficas que algunos minerales presentan debajo de la temperatura ambiente, o del espectro de coercitividades.

También es posible la observación e identificación directa de los granos en microscopio, para lo cual hay que llevar a cabo previamente un proceso de separación de minerales. La observación directa de los minerales magnéticos permite no sólo confirmar y complementar las estimaciones de la mineralogía, elaboradas a través de la medida de parámetros magnéticos, sino que también permite estudiar la morfología de los granos y evaluar el desarrollo de procesos diagenéticos.

A continuación se describe la técnica principal de estudio del magnetismo de rocas, incluyendo aquellas que han sido desarrolladas más recientemente y que han sido utilizadas para la determinación de las tres variables de la fracción magnética mencionadas en el párrafo anterior.

Susceptibilidad magnética (χ)

Hay dos tipos básicos de magnetización; la magnetización inducida y la magnetización remanente. Cuando un material es expuesto a un campo magnético H , adquiere una magnetización inducida, M_i . Estos se relacionan por medio de la susceptibilidad magnética, χ :

$$M_i = \chi \cdot H$$

La susceptibilidad magnética, χ , es una propiedad de los materiales referente a la facilidad con la que estos pueden magnetizarse, es decir, la magnetizabilidad de una sustancia bajo la presencia de un campo magnético externo (Thompson y Oldfield, 1986).

La fórmula anterior usa la susceptibilidad como escalar, lo que implica que M_i es paralelo a H . Sin embargo, hay materiales que exhiben *anisotropía magnética* y, por tanto M_i no es paralelo a H . Para una sustancia anisotrópica, un campo magnético aplicado en una dirección X inducirá una magnetización no sólo en esa dirección, sino también en dirección Y y Z . Entonces la

susceptibilidad magnética se expresa como un tensor, χ , requiriéndose una matriz de 3 x 3 para una descripción completa.

Además de la magnetización inducida resultado de la acción del campo magnético actual, un material también puede poseer *magnetización remanente*, M_r , que es un registro de los campos magnéticos pasados que han actuado sobre el material.

Como la magnetización (M) y el campo magnético (H) tienen las mismas unidades de medida, entonces la susceptibilidad (χ) es adimensional aunque por convención se reporta en unidades SI (Sistema Internacional). La susceptibilidad de las rocas o sedimentos, depende de todas las fracciones minerales de una roca, en ellas están presentes la fracción ferromagnética, paramagnética y diamagnética con las cuales se determina el valor de la susceptibilidad total de la roca (Butler, 1998).

La susceptibilidad magnética es el parámetro magnético más común y más simple de medir, se realiza a la temperatura ambiental del laboratorio con un campo magnético bajo, generalmente de 0.1 mT. La susceptibilidad dependiente de la masa específica, se obtiene dividiendo el volumen de la muestra entre su peso (muestra seca).

El método más común para medir la susceptibilidad inicial es utilizando un campo alterno. Existen varios equipos disponibles para realizarlo, estos van desde los más sencillos y poco sensibles, hasta los altamente sensibles, utilizados para sedimentos de lago, donde la señal no es tan fácil de detectar; estos últimos son útiles hasta para medir la contribución diamagnética del tubo de plástico donde se tienen los sedimentos.

Susceptibilidad magnética en altas temperaturas

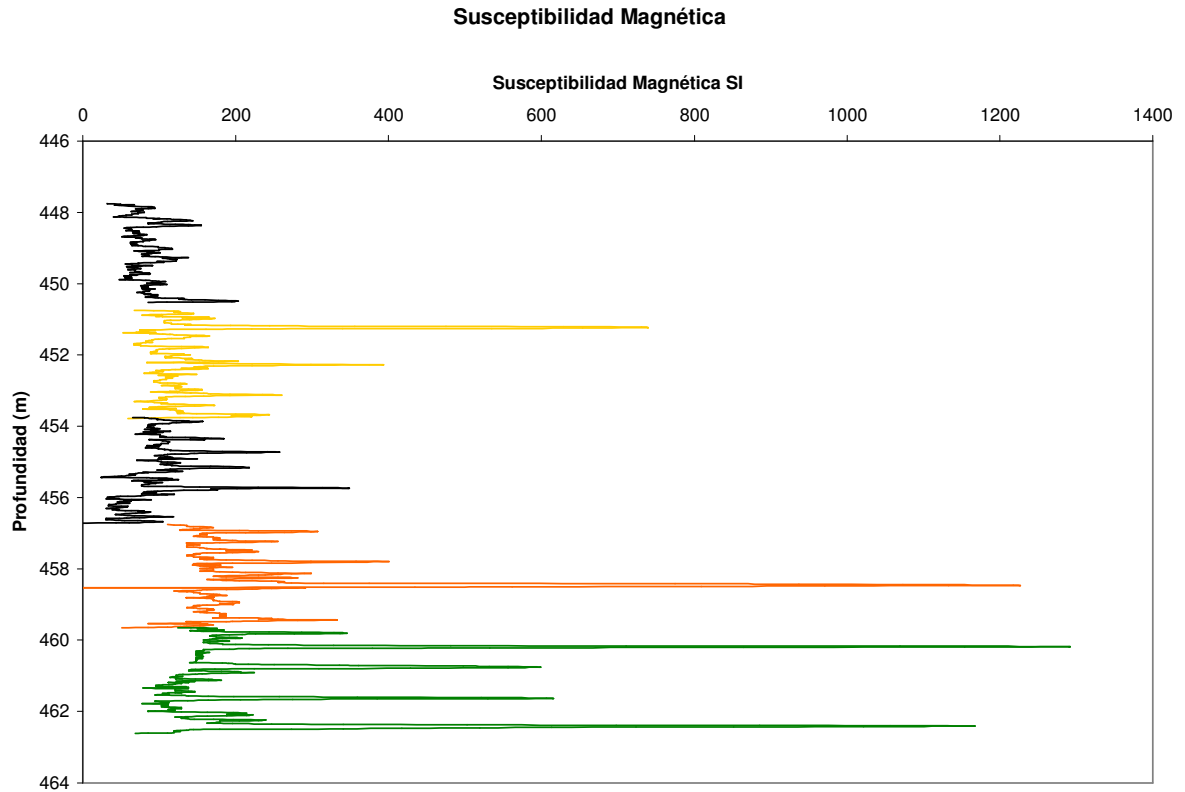
Son curvas que describen la desmagnetización de una roca. Esta técnica o proceso resulta cuando una muestra se calienta hasta que su susceptibilidad magnética se vuelva cero, con el objeto de registrar este punto de anulación de la susceptibilidad que es específico de cada mineral magnético. Esta temperatura es a partir de la cual, la agitación térmica impide

el ordenamiento magnético, de manera que cuando un material supera dicha temperatura, desaparece su ferromagnetismo y se convierte en paramagnético. Esta temperatura es un parámetro proporcional al grado de alteración que presenta una roca, a mayor alteración esta se incrementa (Butler, 1998).

El proceso contrario ocurre en rocas generadas a partir de magma, es decir, al enfriarse y pasar por debajo del punto de Curie, sus minerales magnéticos adquieren magnetismo y se orientan con el campo magnético terrestre. Esta temperatura es característica de cada mineral ferromagnético, por ejemplo, para la magnetita es de 580 °C y para la hematita de 680 °C; en los materiales antiferromagnéticos se le denomina temperatura de Neel.

Con cierto tipo de susceptibilímetros es posible observar la dependencia de la susceptibilidad con respecto a varias frecuencias del campo (de la misma baja intensidad magnética). Se puede calcular esta dependencia en términos de valores absolutos o como un porcentaje de baja frecuencia de la susceptibilidad magnética. Estos datos pueden ser utilizados para determinar la presencia de granos ultrafinos superparamagnéticos ($< 0.03 \mu\text{m}$).

Durante este proceso también es posible observar si se presenta alguna transición cristalográfica como la de Verwey, que no es otra cosa que la presencia de una inflexión en la curva de calentamiento, presentada alrededor de los 110 °K y que es característica de la magnetita.



(Gráfica 7). Registro de susceptibilidad magnética correspondiente a la profundidad que va de 447.76 a 462.62 m.

Núcleo UNAM - 5, Caja Nº 139 de 450.75 a 453.75 m, 100 % recuperación

La susceptibilidad magnética en este segmento del núcleo muestra variaciones de valores de 66.4 a $739.2 \cdot 10^{-6}$ SI. En el intervalo analizado en detalle la susceptibilidad alcanza valores del orden de $739.2 \cdot 10^{-6}$ SI (Imagen 11).

Roca color gris claro con clastos de fragmentos de roca (caliza), vidrio (color oscuro) sin alteración y otros alterados a minerales arcillosos. La mayoría de los clastos son de vidrio o roca cristalizada. La forma de todos los clastos es de semiangulosa a semiesférica. Los clastos están soportados por una matriz de arena fina o ceniza fina. La matriz tiene un porcentaje del 20 %. El tamaño de los clastos van de 1 mm. a 3 cm. El tamaño de los clastos es más homogéneo con un promedio entre éstos de 5 mm. Está mal clasificado y sin gradación. La matriz contiene carbonato de calcio pero éste no actúa como cementante. En algunos fragmentos de roca se observa textura fluidal que podría indicar que son rocas fundidas y posteriormente litificadas.



(Imagen11). Imagen digital del segmento del núcleo en la profundidad de 451.23 m. Correspondiente a los valores altos de susceptibilidad magnética (ver Gráfica 7).

Núcleo UNAM - 5, Caja N° 141 de 456.75 a 459.65 m, 100 % recuperación

La susceptibilidad magnética en este segmento del núcleo muestra variaciones de valores de 51.1 a $1226.3 \cdot 10^{-6}$ SI. En el intervalo analizado en detalle la susceptibilidad alcanza valores del orden de $1226.3 \cdot 10^{-6}$ SI (Imagen 12).

Roca de color gris verdoso constituida por fragmentos de roca semiangulosos y semiesféricos de caliza, vidrio sin alterar y alterado a minerales arcillosos (en su mayoría) y fragmentos de roca recristalizada. Los clastos están soportados por una matriz de arena fina. El porcentaje de la matriz es de aproximadamente 20 %. El tamaño de los clastos va de 1 mm. a 6 cm., está muy mal clasificada y sin gradación.



(Imagen 12). Imagen digital del segmento del núcleo en la profundidad de 458.46 m. Correspondiente a los valores altos de susceptibilidad magnética (ver Gráfica 7).

Núcleo UNAM - 5, Caja N° 142 de 459.65 a 462.65 m, 100 % recuperación

La susceptibilidad magnética en este segmento del núcleo muestra variaciones de valores de 68.1 a $1290.2 \cdot 10^{-6}$ SI. En el intervalo analizado en detalle la susceptibilidad alcanza valores del orden de $1290.2 \cdot 10^{-6}$ SI (Imagen 13).

Roca color gris con clastos de roca de forma subangulosa a subesférica. Los clastos son de roca recristalizada, caliza y vidrio con alteración muy pronunciada. La matriz es de arena fina. El porcentaje de matriz es de aproximadamente 20 %. En este caso el tamaño entre clastos es más heterogéneo. Esta muy mal clasificado y sin gradación,

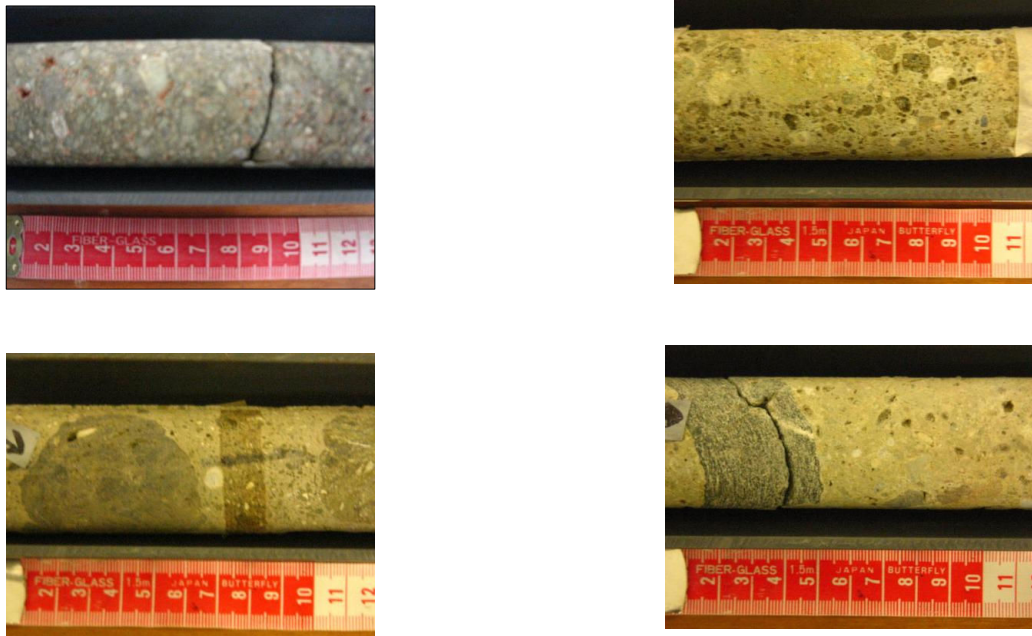


(Imagen13). Imagen digital del segmento del núcleo en la profundidad de 460.18 m. Correspondiente a los valores altos de susceptibilidad magnética (ver Gráfica 7).

Teniendo el registro de susceptibilidad magnética y la descripción litológica de los núcleos en los puntos donde se tiene un alto valor de ésta, se prosiguió a buscar dentro de dichos intervalos lo que se tiene en común o sus diferencias litológicas, encontrándose los siguientes resultados:

1. Presentan clastos de color verde oscuro a pardo de longitud de 3 cm. en promedio y forma subangulosa a subredondeada con alteración.
2. Contienen fragmentos de minerales con apariencia de roca ígnea de forma subangulosa y con matriz arcillosa.
3. Los fragmentos tienen una magnitud promedio de 5 cm., de forma semiredondeada y en algunos casos presentan vesículas y otros clastos contenidos en ellos de fragmentos de roca. En algunos casos las vesículas se encuentran rellenas por minerales de alteración.

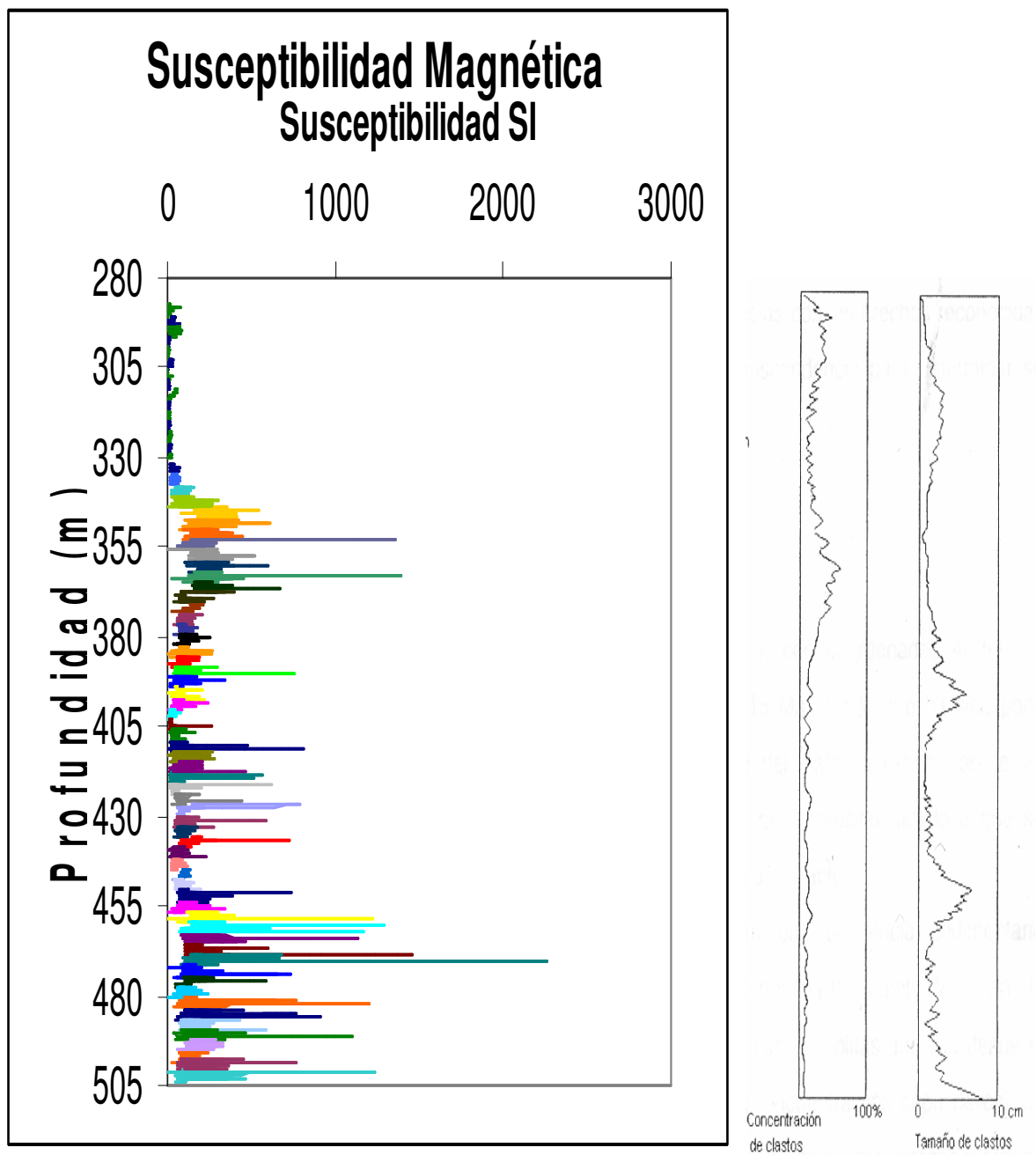
La siguiente imagen se muestra con la finalidad de observar la semejanza de la litología de los núcleos estudiados.



(Imagen 14). Resumen de las diferentes caracterización de la brecha, mostrando las variaciones en el contenido de los clastos y matriz observada a lo largo del núcleo.

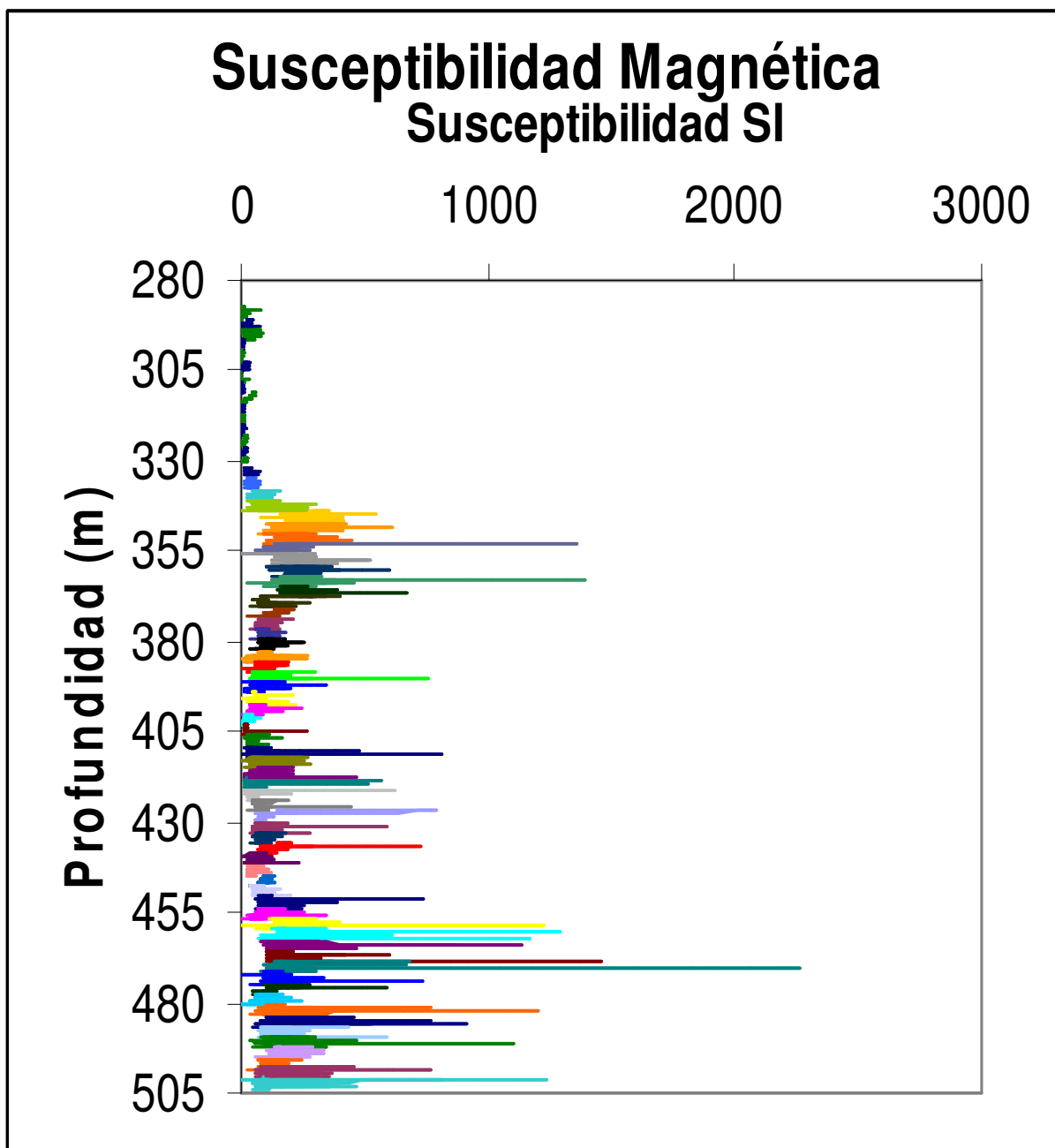


(Imagen 15). Núcleos en los cuales la susceptibilidad magnética es de valor alto, siendo estos de profundidades diferentes se encuentran algunas similitudes. A las profundidades de 470.34 m., 482.34 m., y 486.15 m. respectivamente.



(Gráfica 7). Registro de susceptibilidad magnética para el pozo UNAM-5. Los diferentes colores en el registro magnético corresponden a segmentos de 3 metros en los núcleos. Se hace una comparación con la concentración y tamaño de clastos. (tomadas de la tesis de Escobar 2002)

V. Discusión



(Gráfica 8). Registro de susceptibilidad magnética correspondiente al pozo UNAM 5. El registro permite un análisis de la variabilidad de las concentraciones de material ferromagnético, en donde las concentraciones relativas altas están marcadas por los valores altos de susceptibilidad.

Las características litológicas las cuales se presentan a lo largo de las muestras tratadas con el susceptímetro son las siguientes:

- I. A la profundidad 0 a 332.05 m, donde la susceptibilidad es baja y corresponde a estratos de calizas cristalinas con algunos escasos fragmentos retrabajados de la brecha.
- II. De la profundidad 332.05 a 347.05 m, se presenta estratificación graduada normal; en la cima los clastos son menores a 1mm, presenta laminación cruzada y en la base los fragmentos son de grano grueso. El contacto entre los sedimentos carbonatados del Terciario y las primeras capas de la brecha de impacto se observa a los 332 m de profundidad, correspondiendo con el incremento de los valores de susceptibilidad.
- III. De la profundidad 347.05 a 412.05 m, se presentan fragmentos angulosos (en la cima de 1 a 4 cm., de diámetro y en la base son de menores a 0.5 cm), también presenta fragmentos de vidrio y se observan lentes (de brecha) con mayor concentración de fragmentos pequeños (de tamaño menor a 5 mm).
- IV. De la profundidad de 412.05 a 464.80 m, se presentan clastos de roca ígnea extrusiva, se observan vesículas y el tamaño de los clastos va disminuyendo.
- V. De la profundidad de 464.80 a 503.9 m se presentan fragmentos de basamento de 0.5 a 1.5 cm., muy angulosos.

VI. Conclusiones

- ✓ El tipo de magnetismo de roca en las brechas de impacto de Chicxulub es ferromagnético. Una característica de los materiales ferromagnéticos es que al cambiar el campo magnético terrestre, la magnetización no regresa a cero si no que guarda un registro de la anterior y que corresponde a la magnetización remanente.
- ✓ Los minerales magnéticos que se registraron en el susceptímetro por el tipo de magnetización remanente se encuentran preferencialmente en los fragmentos de roca fundida y los clastos de rocas de basamento. En particular los fragmentos de rocas intrusitas (granitos, granodioritas y dioritas) y metamórficos.
- ✓ En este estudio se identificaron cinco intervalos caracterizados por diferentes contrastes de susceptibilidad magnética y que corresponden a: **I)** de 0 a 332.05 m. **II)** de 332.05 a 347.05 m. **III)** de 347.05 a 412.05 m. **IV)** de 412.05 a 464.80 m. **V)** de 464.80 a 503.90 m. El contacto entre los sedimentos carbonatados del Terciario y las primeras capas de la brecha de impacto se observa a los 332 m de profundidad, correspondiendo con el incremento de los valores de susceptibilidad.
- ✓ La recuperación continua de núcleos permite comparar directamente los resultados de los registros geofísicos con las diferentes litologías, en este caso particular el de susceptibilidad magnética permite investigar las variaciones estratigráficas a lo largo de la columna litológica. El registro magnético es una herramienta de costo bajo y de rápidos resultados.

VII. Recomendaciones

- ✓ El uso de la susceptibilidad magnética es una herramienta que permite la identificación de diferentes tipos de litología dentro de una secuencia litoestratigráfica, lo cual en ingeniería petrolera es primordial para investigar la estratigrafía.
- ✓ En este caso particular el de susceptibilidad magnética permite investigar las variaciones estratigráficas a lo largo de la columna litológica. El registro magnético es una herramienta de costo bajo y de rápidos resultados.
- ✓ El empleo de esta técnica, permite corroborar la información de los registros geofísicos de pozos, se tiene por un lado de manera representativa la columna litológica por medio de los registros geofísicos y por otra tenemos de manera física los núcleos.

VII. Bibliografía

- Alva L. (1996), Propiedades geofísicas de la tierra, *cuadernos del Instituto de Geofísica, UNAM*, No. 10, 1a. edición, Coeditado por Universidad Nacional Autónoma México y Plaza y Valdez, editores, México, DF, 30 pp
- Barreto L. (1997), El geomagnetismo, *cuadernos del Instituto de geofísica, UNAM*, No. 11, 1a. edición, coeditado por Universidad Nacional Autónoma de México y Plaza y Valdez, editores, México, DF, 52 pp
- Chapman S. (1938), Geomagnetism or Terrestrial Magnetism, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 3, EEUU, 50 pp
- Dunlop D., y Özdemir Ö., (1997), "Rock magnetism, fundamentals and frontiers", 1a ed., Cambridge University Press, Nueva York, EEUU, 573 p.
- Fabian K., (2003), "Some additional parameters to estimate domain state from isothermal magnetization measurements", *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 213, pp. 337-345.
- Geiss C. y Banerjee S., (1997), "A multiparameter rock magnetic record of the last glacial-interglacial paleoclimate from south-central Illinois, USA", *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 152, pp. 203-216.
- Geiss C., (1999), The development of rock magnetic proxies for paleoclimate reconstruction, *Tesis de doctorado, Universidad de Minnesota*, EEUU, 274 p
- Heller, R. Kretzschmar, M. E. Evans, L. P. Yue and D. K., Nourgaliev, Detrital and pedogenic magnetic mineral phases in the loess/palaeosol sequence at Lingtai (Central Chinese Loess Plateau) *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, Vol. 140, 4ª edición, 2003, 255-275 pp
- Escobar Sanchez J.E., (2002), Características litológicas de las brechas de impacto del crater Chicxulub (pozo UNAM-5), tesis de licenciatura, *Facultad de Ingeniería*, México, DF, 84pp.
- Kravchinsky V., Krainov M., Evans M., Peck J., King J., Kuzmin M., Sakai H., Kawai T. y Williams D., (2003), "Magnetic record of Lake Baikal sediments: chronological and paleoclimatic implication for the last 6.7 Myr", *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, Vol. 195, pp. 281-298.
- Kryc K., Murray R., y Murray D., (2003), "Al-to-oxide and Ti-to-organic linkages in biogenic sediment relationships to paleo-export production and bula Al/Ti", *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 211, pp. 125-141.
- Liu Q., Jackson M., Banerjee S., Zhu R., Pan Y. y Chen F., (2003), "Determination of magnetic carriers of the characteristic remanent magnetization of Chinese loess by low-temperature demagnetization", *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 216, pp. 175-186.
- López Ramos E., "Geología de México", Tesis, México, D.F., Vol. 3, 456p.
- Lozano S. y Ortega B., (1994), "Palynological and magnetic susceptibility records of Chalco Lake, central Mexico", *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, Vol. 109, pp. 177-191.
- Maher B., Karloukovski V. y Mutch T., (2004), "High-field remanence properties of synthetic and natural submicrometre haematites and goethites: significance for

environmental context”, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 226, pp. 491-505.

- Moreno E., Thouveny N., Delanghe D., McCave N. y Shackleton N., (2002), “Climatic and oceanographic changes in the northeast Atlantic reflected by magnetic properties of sediments deposited on the Portuguese Margin during the last 340 ka”, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 202, pp. 465-480.
- Ortega B., Caballero C., Lozano S., Israde I. y Vilaclara G., (2002), “52000 years of environmental history in Zacapu basin, Michoacán, Mexico: the magnetic record”, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 202, pp. 663-675.
- Ortega B., Thompson R. y Urrutia F., (2000), “Magnetic properties of lake sediments from Lake Chalco, central Mexico, and their palaeoenvironmental implications”, *Journal of Quaternary Science*, Vol. 15, No. 2, pp. 127-140.
- Ozdemir O., (2003), “Low-temperature behavior and memory of iron-rich titanomagnetites (Mt. Haruna, Japan and Mt. Pinatubo, Philippines)”, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 216, pp. 193-200.
- Peck J., King J., Colman S. y Kravchinsky V., (1994), “A rock-magnetic record from Lake Baikal, Siberia: evidence for Late Quaternary climate change”, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 122, pp. 221–238.
- Perforaciones Industriales Térmicas S.A. de C.V.: empresa propiedad del equipo de perforación.
- Retallack G., Sheldon N., Cogoini M. y Elmore R., (2003), “Magnetic susceptibility of early Paleozoic and Precambrian paleosols”, *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, Vol. 198, pp. 373-380.
- Reynolds, R. L. and King, J. W. (1995). Magnetic records of climate change, *Reviews of Geophysics*, 33, suppl. (IUGG Report), pp. 101–110.
- Sandgren P., Risberg J. y Thompson R., (1990), “Magnetic susceptibility in sediment record of lake Ådran, eastern Sweden: correlation among cores and interpretation”, *Journal of Paleolimnology*, Vol. 3, pp. 129-141.
- Snowball I., (1993), “Mineral magnetic properties of Holocene lake sediments and soils from the Kårsa valley, Lapland, Sweden, and their relevance to palaeoenvironmental reconstruction”, *Terra Nova*, Vol. 5, No. 3, pp. 258-270.
- Thouveny N., De Beaulieu J., Bonifay E., Creer K., Guiot J., Icole M., Johnsen S., Jouzel J., Reille M., Williams T. y Williamson D., (1994), “Climate variation in Europe over the past 140 kyr deduced from rock magnetism”, *Nature*, Vol. 371, pp. 503–506.
- Urrutia J., Ortega J. y Cruz R., (1997), “Rock-magnetic study of the Pleistocene-Holocene sediments from the Babícora lacustrine basin, Chihuahua, northern Mexico”, *Geofísica Internacional*, Vol. 36, No. 2, pp. 77-86.
- Urrutia Fucugauchi J., Morán Z., Sharpton V., Buffler R., Stöffler D. (2001), “The Chicxulub: Scientific Drilling Project”, UNAM, *Instituto de Geofísica Series del Instituto de Geofísica*, 45pp.
- Urrutia Fucugauchi J., Morgan J., Buffer R., Grieve R., (2002), “Chicxulub: Drilling the K-T Impact Crater”, UNAM, *Instituto de Geofísica Series del Instituto de Geofísica*, 39pp.
- Urrutia Fucugauchi J., Leyva Contreras A., Caballero Miranda C., González Lozano J., Campos Enríquez J., Zuñiga Dávila – Madrid F., (2002), UNAM, *Instituto de Geofísica primer informe*, 90pp.

- Urrutia Fucugauchi J., Morgan J., Stöfler D., Claeys P., (2004), "The Chicxulub Scientific Drilling Project", Meteoritical Society, EEUU pp 787 – 790.
- Verosub K. y Roberts A., (1995), "Environmental magnetism: past, present, and future", Journal of Geophysical Research B: Solid Earth, Vol. 100, pp. 2175–2192.
- Watkins S. y Maher B., (2003), "Magnetic characterization of present-day deep-sea sediments and sources in the north Atlantic", Earth and Planetary Science Letters, Vol. 214, pp. 379-394.
- Williamson D., Jelinowska A., Kissel C., Tucholka P., Gibert E., Gasse F., Massault M., Taieb M., Van Campo E. y Wieckowski K., (1998), "Mineral-magnetic proxies of erosion/oxidation cycles in tropical maar-lake sediments (Lake Tritrivakely, Madagascar): paleoenvironmental implications", Earth and Planetary Science Letters, Vol. 155, pp. 205-219.