

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ENEP CAMPUS ARAGÓN



**VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS DE LA ZONA
KU-MALOOB-ZAAP EN LA SONDA DE CAMPECHE, EN FUNCIÓN DE LA
SEPARACIÓN EN LOS ESTUDIOS GEOTÉCNICOS**

T E S I S

Que para obtener el Título de :
INGENIERO CIVIL

PRESENTA
JOSÉ VALDEZ GUTIÉRREZ

ASESOR DE TESIS:
ING. LUIS P. VIGUERAS MUÑOZ



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



ESCUELA NACIONAL
DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN - UNAM
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES ARAGÓN - UNAM

JEFATURA DE CARRERA
DE INGENIERÍA CIVIL

OFICIO No. ENAR/JCIC/066/2004

ASUNTO: Sínodo.


~~LIC. ALBERTO IBARRA ROSAS
SECRETARIO ACADÉMICO
PRESENTE~~

Por medio del presente me permito relacionar los nombres de los profesores que sugiero integren el Sínodo del Examen Profesional del C. JOSÉ VÁLDEZ GUTIÉRREZ, con número de cuenta: 09303346-6, con el tema de tesis: " VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS DE LA ZONA KU-MALOOB-ZAAP EN LA SONDA DE CAMPECHE, EN FUNCIÓN DE LA SEPARACIÓN EN LOS ESTUDIOS GEOTÉCNICOS ".

PRESIDENTE:	ING. PASCUAL GARCÍA CUEVAS
VOCAL:	ING. GABRIEL ÁLVAREZ BAUTISTA
SECRETARIO:	ING. KARLA IVONNE GUTIÉRREZ VÁZQUEZ
SUPLENTE:	ING. LUIS POMPOSO VIGUERAS MUÑOZ
SUPLENTE:	ING. MARTÍN ORTIZ LEÓN

Quiero subrayar que el director de tesis es el Ing. Luis Pomposo Viguera Muñoz, el cual está incluido en base a lo que reza el Reglamento de Exámenes Profesionales de esta Escuela.

A T E N T A M E N T E

" POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPERANZA " 
San Juan de Aragón, Estado de México, 27 de febrero del 2004

EL JEFE DE CARRERA

ING. MARTÍN ORTIZ LEÓN



c.c.p. Lic. Ma. Teresa Luna Sánchez.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Ing. Karla Ivonne Gutiérrez Vázquez.- Secretaria Técnica de Ingeniería Civil.
Ing. Luis Pomposo Viguera Muñoz.- Director de Tesis.
Comité de Tesis.
Interesado.

MOL/mlev*

DEDICATORIA

A mi Padre

Porque gracias a tu apoyo y comprensión me diste la gran satisfacción de ser lo que ahora soy.

Padre te dedico este trabajo muchas gracias por tu apoyo ya que sin ti no hubiera podido realizarme, nunca te olvidare Papa.

A mi esposa Vicky

Mi vida, este trabajo también te lo dedico a ti ya que me has comprendido sin recibir nada a cambio, gracias por aquellos momentos tan difíciles que compartiste conmigo.

A mi hijo

A ti hijo, que fuiste la inspiración para realizar este trabajo, espero y sea un ejemplo a seguir, te amo bebe.

A mi madre

Aunque no estés conmigo, espero y me comprendas algún día.
T.Q.M.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Porque a través de sus aulas y profesores me formaron para hacer una persona de bien, y también la oportunidad de hacerme de mi un gran triunfador .

Al Instituto Mexicano del Petróleo

Por su apoyo económico y por darme la oportunidad de realizar este trabajo.

A mis asesores de tesis

Al Ing. Luis Pomposo Viguera Muñoz ,Ing. Gabriel Álvarez Bautista al Dr. Jaime Núñez Farfán y al M. en C. Prócoro Barrera Nabor . Gracias por su apoyo y comprensión y sobre todo paciencia para la realización de mi tesis, a todos ellos mil gracias .

INTRODUCCIÓN

I ANTECEDENTES

I.1 OBJETIVO.....	1
I.2 INTRODUCCION.....	1
I.3 ESTUDIOS PRELIMINARES.....	2
I.4 ESTUDIOS GEOLOGICOS.....	2
I.5 METODOS DE EXPLORACION Y EQUIPO.....	3
I.6 PLATAFORMAS MARINAS FIJAS.....	3
I.7EXPLORACIÓN Y MUESTREO.....	4
I.8 SISTEMA DE PERFORACIÓN TIPO DOLPHIN.....	9

II CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA SONDA DE CAMPECHE.

II.1 GEOLOGÍA DE MÉXICO.....	18
II.2 GEOLOGÍA DE LA ZONA DE CAMPECHE.....	21
II.2 METODOLOGIA DE EXPLORACIÓN DE LA ZONA DE PROYECTO.....	23
II.4 GEOLOGÍA REGIONAL DE LA ZONA KU-MALOOB-ZAAP.....	27

III FUNDAMENTOS DE PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA.

III.1 EL MÉTODO DE LA INGENIERIA ESTADÍSTICA Y EL PENSAMIENTO ESTADISTICO.....	36
III.2 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	42
III. INFERENCIA ESTADÍSTICA.....	52

IV GEOESTADISTICA CONCEPTOS Y APLICACIONES.

IV .1 PROBLEMA QUE DIO ORIGEN A LA GEOSTADÍSTICA.....	60
IV .2 DOMINIOS Y APLICACIONES.....	61
IV.2.1 GEOESTADÍSTICA.....	61
IV.3 VARIABLES ALEATORIAS REGIONALIZADAS.....	62
IV.4 CONCEPTOS DE VARIABLE ALEATORIA REGIONALIZADA.....	62
IV.5 ETAPAS DEL ESTUDIO GEOESTADISTICO.....	64
IV.6 ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	64
IV.7 CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA BÁSICA NECESARIOS.....	66
IV.8 SEMIVARIOGRAMA EXPERIMENTAL.....	66
IV.9 CONSTRUCCION DEL SEMIVARIOGRAMA EXPERIMENTAL.....	69
IV.10 PROBLEMAS MAS COMUNES EN LA CONSTRUCCIÓN DEL SEMIVARIOGRAMA.....	71
IV.11 MODELADO DE LOS SEMIVARIOGRAMAS.....	72

IV.12 MODELOS TEORICOS DE LOS SEMIVARIOGRAMAS.....	73
IV.13 APLICACIÓN DE LA GEOESTADISTICA DE LA ZONA DE KU-MALOOB-ZAAP.....	74
V PROPIEDADES DEL SUELO DE LA ZONA KU-MALOOB-ZAAP.	
V.1 CONTENIDO DE AGUA.....	83
V.2 PESO VOLUMÉTRICO.....	84
V.3 LÍMITES DE ATTERBERG.....	85
V.4 TORCÓMETRO.....	86
V.5 VELETA EN MINIATURA.....	87
V.6 PRUEBA TRIAXIAL UU.....	88
V.7 CONDICIONES GENERALAES DEL SUELO MARINO.....	89
V.8 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	93
VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	127
BIBLIOGRAFIA.....	130

INTRODUCCIÓN

Las necesidades de producción de hidrocarburos de Petróleos Mexicanos requieren de diseños de plataformas marinas urgentes, siendo necesario para esto contar con información geofísica y geotécnica, casi inmediatamente obligando a los diseñadores de estructuras marinas a tratar de conseguir información geotécnica de algún sitio cercano al punto de interés.

En respuesta a lo anterior, el Instituto Mexicano del Petróleo recopiló sondeos geotécnicos del área de Ku-Maloob-Zaap y discretizó el perfil del suelo en capas de pequeño espesor, obteniendo para cada una de estas capas las siguientes propiedades índice y mecánicas, en función de la distancia a un punto localizado de referencia localizado en el centro del área de estudio.

El tratamiento estadístico dado a las propiedades de los suelos permitió estimar perfiles estratigráficos aproximados de aquellos sitios que no cuentan con información de mecánica de suelos para la simulación del suelo de cimentación y efectuar el análisis y el diseño preliminar de plataformas marinas para la explotación de hidrocarburos.

Considerando las muchas incertidumbres que se tiene respecto a la exploración geotécnica marina es posible adoptar esta información para el diseño de pilotes definitivos y por consiguiente el ahorro que representa la no ejecución de un estudio geotécnico en cada sitio donde se requiera la instalación de una plataforma marina.

Los resultados de los análisis de ingeniería geotécnica está generalmente afectados por grandes incertidumbres asociadas al desconocimiento de los parámetros mecánicos del suelo, a la variabilidad espacial de dichos parámetros a la falta de confiabilidad de las pruebas de campo y laboratorio realizadas .

Resulta por tanto indispensable, en cualquier análisis geotécnico reconocer esta incertidumbre y estimar el margen posible error de los resultados. Los métodos más adecuados para esta estimación son los que se basan en la teoría de la probabilidad que superan ampliamente los simples análisis paramétricos.

A continuación se describe de forma breve el contenido de esta investigación

Capítulo 1 Se describe de forma breve los tipos de muestreos exploratorios para la recuperación de las muestras así como algunas funciones de las plataformas marinas.

Capítulo 2 Se muestra de forma general la geología de México, así como también de forma detallada la geología del área en estudio.

Resulta por tanto indispensable, en cualquier análisis geotécnico reconocer esta incertidumbre y estimar el margen posible de error de los resultados. Los métodos más adecuados para esta estimación son los que se basan en la teoría de la probabilidad que superan ampliamente los simples análisis paramétricos.

A continuación se describe de forma breve el contenido de esta investigación

Capítulo 1 Se describe de forma breve los tipos de muestreos exploratorios para la recuperación de las muestras así como algunas funciones de las plataformas marinas.

Capítulo 2 Se muestra de forma general la geología de México, así como también de forma detallada la geología del área en estudio.

Capítulo 3 Se da el conocimiento de los fundamentos de Probabilidad y Estadística básicos necesarios para la desarrollar la Geostatística.

Capítulo 4 Este capítulo es la esencia del trabajo, se describen los pasos para la construcción de los variogramas, análisis de anisotropía, problemas para la construcción de los variogramas, análisis estructural.

Capítulo 5 Se describe el procedimiento de las pruebas efectuadas a las muestras del suelo marino y el análisis de los resultados obtenidos y por último.

Capítulo 7 Conclusiones y recomendaciones

1 ANTECEDENTES

1.1 Objetivo

De acuerdo a las características y formaciones geológicas en la zona de Ku-Maloob-Zaap, se requiere saber la variación de los estratos y propiedades del suelo marino en función de la distancia en los sondeos geotécnicos, tomando como valores al esfuerzo cortante, contenido de humedad, así como en los límites de Atterberg.

El objetivo principal de esta investigación es verificar si es posible la aplicación de la Geoestadística, con los sondeos geotécnicos que se realizaron dentro de la zona.

1.2 Introducción

A partir de 1976, México experimentó un desarrollo inusitado en la Industria Petrolera, se inician grandes obras de infraestructura, sobre todo en el medio marino, creciendo y diversificándose. Su explotación y transporte hasta la fecha ha representado un gran reto y compromiso para los técnicos mexicanos, debiendo desarrollar tecnologías para el análisis, diseño, construcción e instalación de plataformas, además el petróleo necesitaba ser transportado desde los campos marinos hasta los sitios de refinamiento y distribución mediante tuberías submarinas.

Es por eso, que con el presente trabajo se pretende informar de uno de los campos de la Mecánica de Suelos que es la Geotécnia Marina donde la ingeniería mexicana se ha desarrollado para diseñar la cimentación de plataformas fijas, autoelevables y tuberías submarinas.

Para la elaboración de un estudio geotécnico se tiene que recurrir a múltiples fuentes de información, tanto teóricas como prácticas con el fin de asegurar que el suelo marino seleccionado tenga la suficiente capacidad de carga para soportar en forma segura las estructuras propuestas, en base al conocimiento de los diversos parámetros del suelo, obtenidos a partir de pruebas de laboratorio.

Para desarrollar esta tipo de trabajo, se requiere de estudios preliminares de Geología y Geofísica, requiriéndose de una embarcación que deberá cumplir con ciertas especificaciones para poder realizar los trabajos geotécnicos.

1.3 Estudios preliminares.

Los estudios preliminares consisten en la recopilación de estudios geológicos y geofísicos, para seleccionar finalmente el lugar donde se ejecutará un estudio geotécnico.

1.4 Estudios Geológicos.

Enfocándonos a la Plataforma Continental del Golfo de México, Petróleos Mexicanos ha dividido en las siguientes provincias geológicas: Provincia de Laguna Madre, Provincia de Tampico, Provincia de Veracruz, Provincia de Coatzacoalcos y la provincia de Campeche. A su vez la Provincia de Coatzacoalcos esta dividida en dos: Occidental y la Sonda de Campeche.

La Sonda de Campeche, (ver figura 1.1), a la cual nos enfocaremos, se localiza dentro de la Bahía de Campeche. Esta limitada por el talud occidental de una paleoplataforma Mesozoica-Cenozoica cubierta de sedimentos terrígenos, en esta zona se han llevado a cabo los descubrimientos para la explotación de hidrocarburos, provenientes de formaciones dolomíticas porosas del Terciario y del Mesozoico, presentando espesores hasta de 1000.0 m. Al oriente existen los anticlinales asimétricos y afallados, hacia el centro y sur los diapiros.

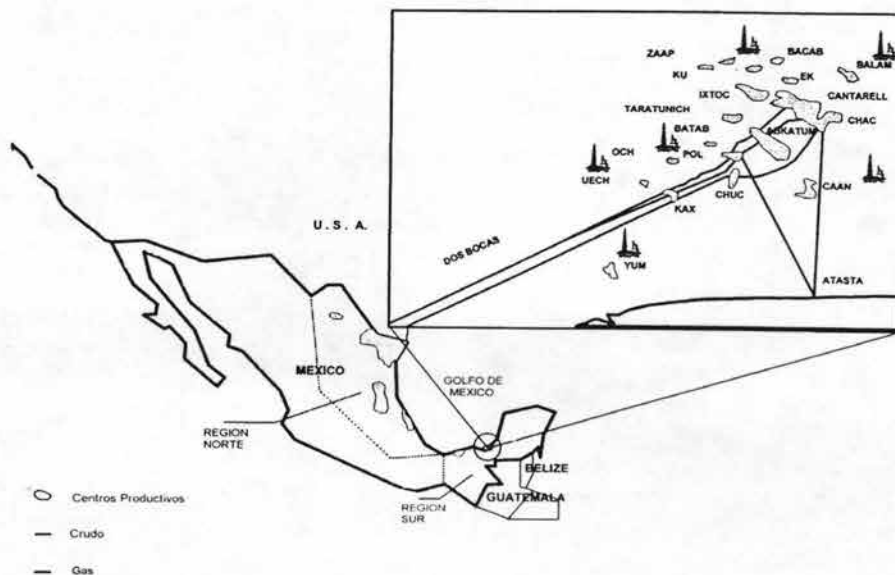


Figura 1.1 Localización de la Sonda de Campeche y ubicación de las Plataformas Marinas

La Sonda cuenta con una amplia superficie de estructuras productoras, su origen data de la última orogénesis del Paleozoico en la que se formaron el sistema montañoso localizado hacia el sur de la región, posteriormente se tuvieron deslizamientos hacia la cuenca por efectos de las fallas encontradas en los límites con la costa. En el Jurásico hubo la depositación de sales y evaporitas, en el Cretácico prosiguieron los carbonatos y los clásticos térreos.

En el Terciario viene la formación de sedimentos areno-arcillosos. A su vez dentro de esta región encontramos arrecifes de coral y montículos de carbonatos.

1.5 Métodos de exploración y equipo.

Las técnicas de investigación del subsuelo marino así como el equipo a utilizar para un sitio particular, dependerá del tipo de estructura a instalar y de las características de los elementos de sustentación.

Las plataformas marinas fijas, autoelevables y sumergibles así como las tuberías submarinas son básicamente las estructuras sobre las que descansan todas las actividades de exploración y explotación de hidrocarburos en la Sonda de Campeche.

A excepción de las plataformas sumergibles cuya instalación y fijación es a base de anclas, todas las demás estructuras requieren de un estudio detallado del subsuelo para el diseño y comportamiento de la cimentación o de su interacción con los suelos de apoyo.

En los párrafos subsecuentes se hará una descripción breve de la metodología de exploración de los suelos marinos así como de los equipos y de las herramientas utilizables, para cada una de las estructuras mencionadas.

1.6 Plataformas marinas fijas.

Son metálicas y se componen de superestructura y pilotes de cimentación. La superestructura va directamente apoyada a los pilotes, las cuales van insertados dentro de los canutos principales o piernas de la subestructura, hasta la profundidad de desplante. En la figura 1.2 se muestra una estructura típica.

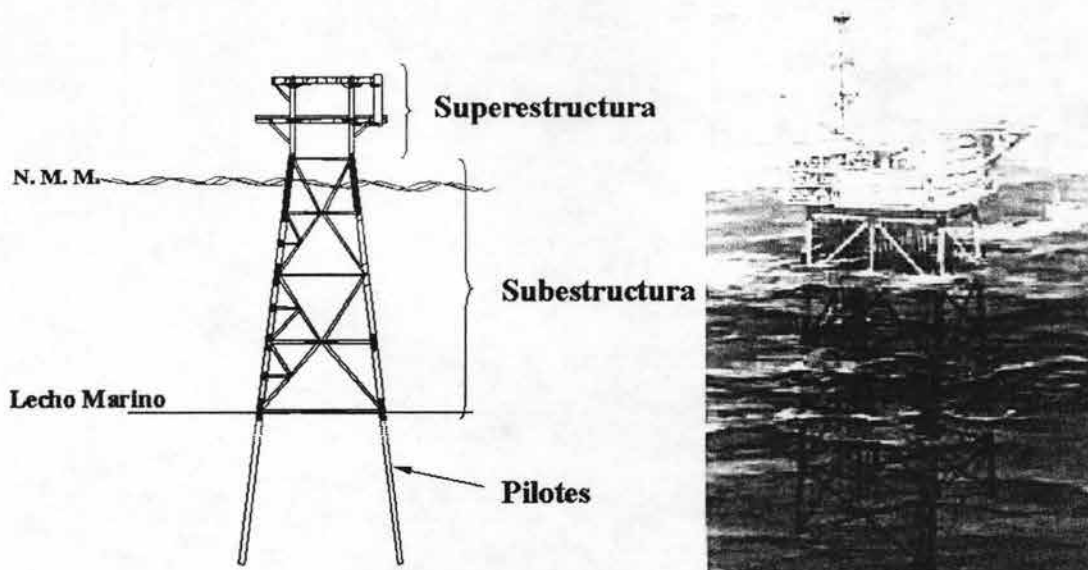


Figura 1.2 Plataforma marina fija típica

1.7 Exploración y muestreo.

Los métodos de exploración de muestreo fuera de costa incluyen algunas técnicas convencionales de campo, ajustadas a las condiciones del trabajo mar adentro, como son oleaje, vientos corrientes, tirantes de agua que obligan el uso de equipos de perforación más potentes, mayores costos de operación, y trabajo continuo.

En el Golfo de México, en áreas cercanas a Veracruz, Florida y Nueva Orleans, compañías Norteamericanas efectuaron operaciones fuera de costa desde 1962.

Los procedimientos que se adoptaron en esa fecha son los que se emplean en la Sonda de Campeche actualmente.

El método de exploración marina usual es el adoptado de los estudios geotécnicos de campo denominados sondeos mixtos, que combinan el uso de la penetración estándar con la recuperación de las muestras alteradas en suelos granulares y el muestreo de suelos arcillosos por medio de tubos especiales de pared delgada, (ver foto 1.2), en donde se muestra la recuperación de la muestra del suelo arcilloso tubo shelby.

El equipo de penetración estándar tradicional consiste en hincar, en el fondo de una perforación, un tubo partido longitudinalmente, con una zapata de acero endurecido y un cabezal que lo une al extremo interior de una columna de barras de perforación que transmiten la energía de hincado desde la parte superior.

La energía de hincado consiste en el golpe de un martillo de 64 Kg. en caída libre guiada de 75 cm. que impacta una pieza de acero integrada a la parte superior de la columna de barras de perforación, (ver figura 1.3). El número de golpes requerido para hincar este penetrómetro 30 cm. es la medida indirecta de la resistencia al corte del suelo.

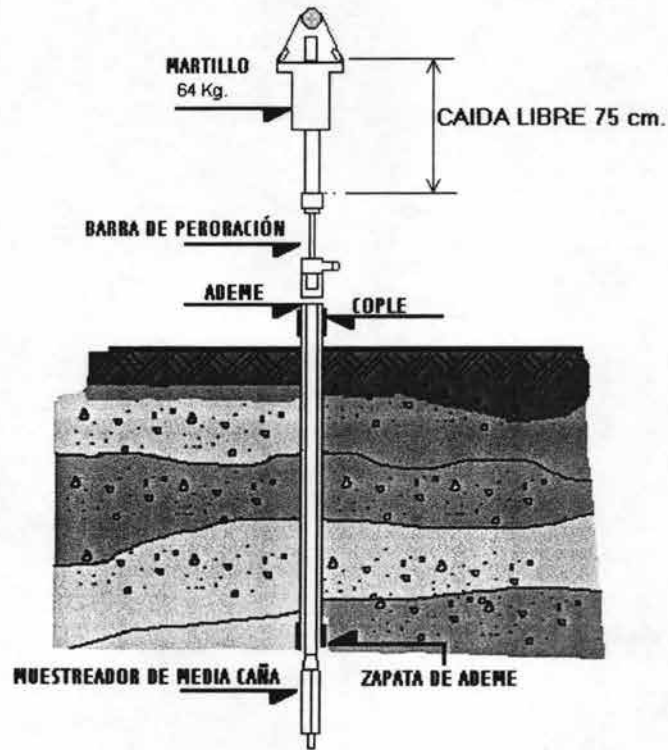


Figura 1.3 Sistema de penetración estándar

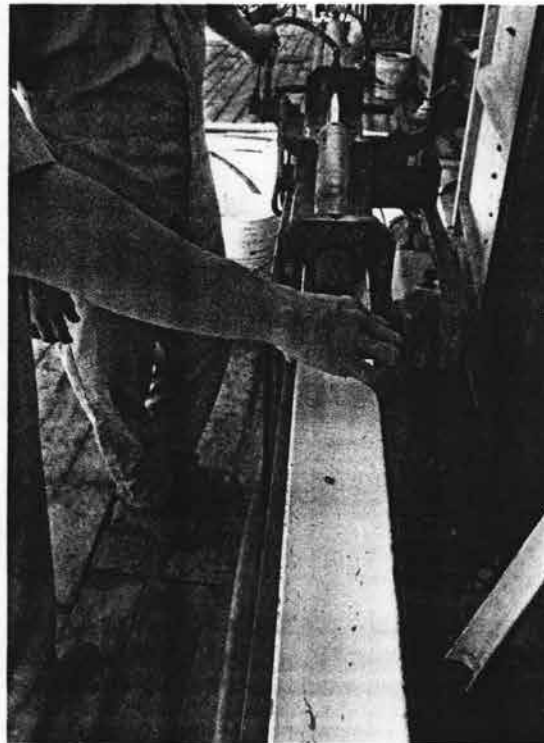


Foto 1.2 Recuperación de la muestra de arcilla en tubo shelby

En medios marinos el método de exploración y muestreo utilizado incluye también una medida de la resistencia a la penetración que no es la estándar sino que es un procedimiento adaptado al sistema adaptado al sistema de operación de cable guía (*wire line*); en este procedimiento el tubo muestreador para suelos granulares tiene las mismas dimensiones que el penetrómetro estándar y es hincado por medio del golpe de un martillo de 75 Kg. en la caída libre guiada de 1.5 m, tomando como medida de la resistencia a la penetración el número de golpes requeridos para hincar el tubo 61 cm dentro del suelo. (Ver figura 1.4).

Para el muestreo de suelos cohesivos se han empleado dos tipos de tubo de acero con paredes delgadas de diferente espesor: uno de diámetro exterior de 6.35 cm y de diámetro interior de 5.71 cm que se utiliza en los primeros metros para muestrear los suelos mas blandos, al cual se le insertan cuatro tubos de fibra de vidrio de 12.7 cm de longitud y 5.4 cm de diámetro interior; y el otro que se emplea en los estratos profundos mas resistentes, que tiene 5,71 cm de diámetro exterior y 5.4 cm de diámetro interior.

Cuando este equipo se opera en el mar el lodo de perforación no se recircula y se pierde en el momento que sale por la boca del pozo en el piso marino; por esto, es necesario reabastecerlo continuamente. El lodo empleado debe tener las características de peso y de consistencia adecuadas para estabilizar las paredes de la perforación sobre todo en suelos granulares, por lo que estas características deben ser controladas en el sitio con viscosímetros del tipo del cono Marsh. Los lodos o lechadas típicas para este propósito se preparan con barita y atalpigita.

En la exploración fuera de costa la plataforma de operación es la cubierta de un barco en la sonda se han utilizado barcos, por lo cuál el sistema cable guía cuenta con un indicador de peso y con topes y amortiguadores para compensar el levantamiento del barco.

El muestreo mediante el cable-guía, desde la cubierta del barco, se lleva a cabo de la manera siguiente: cuando se alcanza la profundidad para muestrear, se detiene la circulación del fluido de perforación y se remueve el vástago de conexión de las barras (*swivel*) y la tubería de perforación se soporta mediante elevadores con la broca suspendida a una cierta distancia del pozo, (ver figura 1.4a), se introduce el muestreador hasta el fondo de la perforación; se hinc a la profundidad señalada y finalmente se extrae la muestra a través de las barras, tirando de un cable flexible que se desplaza en su interior.

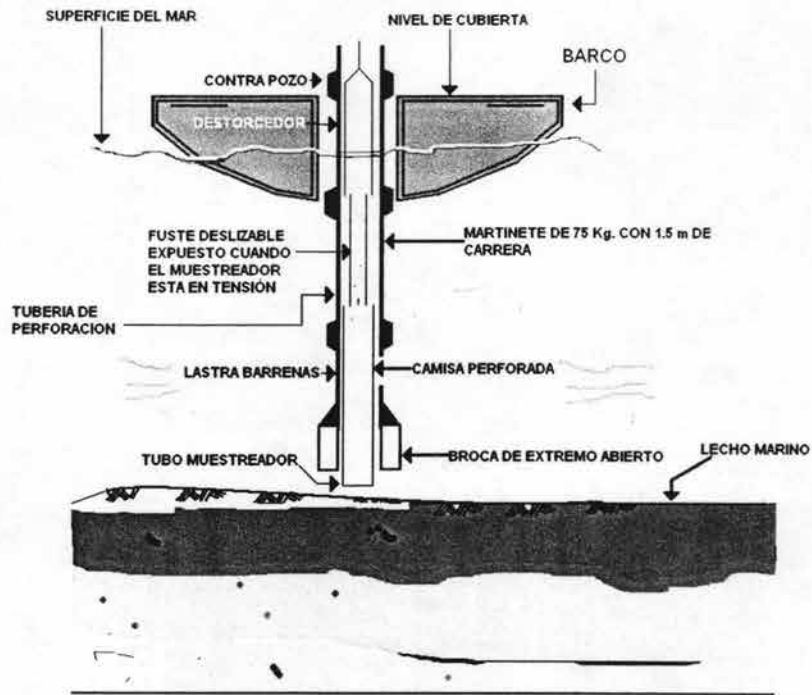


Figura 1.4 Sistema de operación cable guía.

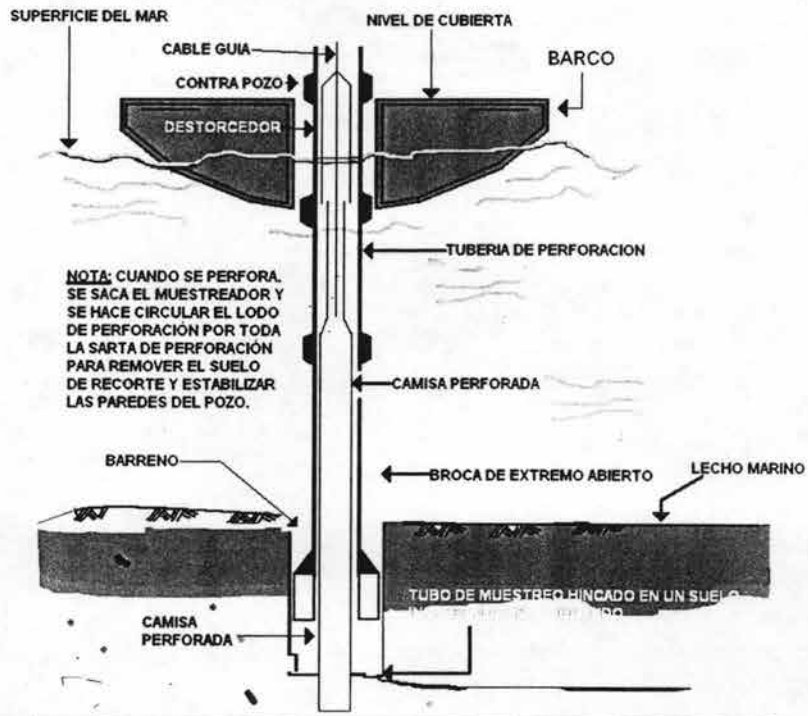


Figura 1.4 a, Procedimiento del muestreo

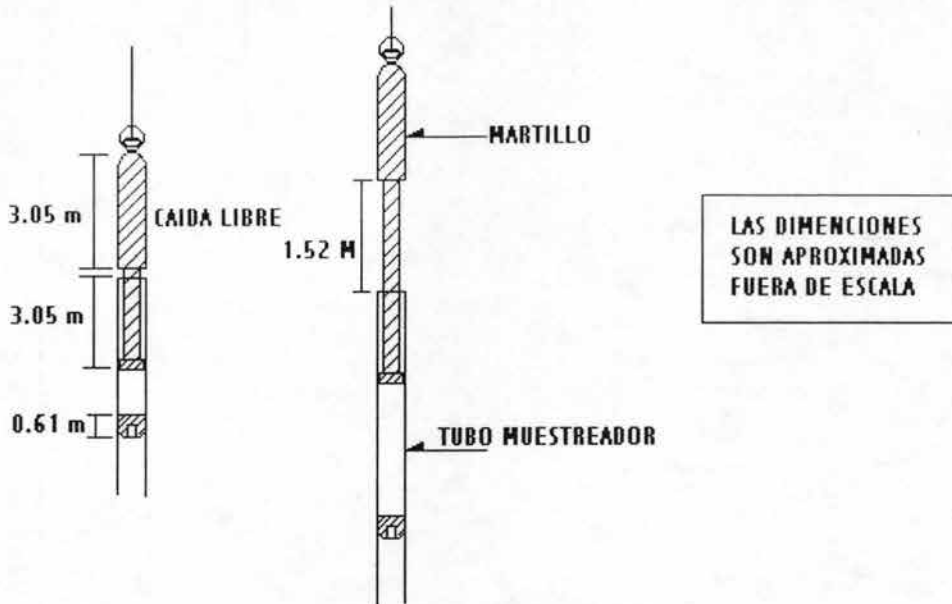


Figura 1.5 Martillo de hincado y muestreador

El muestreador en el sistema cable-guía consta de una sección tubular en su parte interior integrada a un martillo cilíndrico sólido (ver figura 1.5), el tramo de tubo que sirve de guía al martillo durante su caída tiene una longitud de 3.05 m de los cuales solo emplean 1.52 m para producir la penetración del muestreador mediante los golpes del martillo que es accionado desde la cubierta del barco por medio del cable guía.

Los 1.52 m. restantes de la sección tubular constituyen una tolerancia al movimiento vertical del barco durante el muestreo.

La tubería de perforación comúnmente usada tiene un diámetro exterior de 8.89 cm y uno interior de 7.62 cm en tramos de 6.10 m. el diámetro final del pozo es de 17.8 cm y sus paredes se estabilizan como ya se mencionó por medio de lodo que circula por el espacio anular que existe entre la tubería y la paredes del pozo, arrastrando los cortes hechos por la broca.

Una vez ejecutadas las pruebas de veleta, torcómetro y penetrómetro de bolsillo, (ver foto 1.3), se extraen las muestras del tubo muestreador mediante un pistón accionado hidráulicamente, siguiendo la dirección en la que la muestra penetra al tubo hincado; se identifica visual y manualmente; se separan los diferentes tipos de suelo que la muestra pueda contener, se anotan las características físicas relevantes de cada parte: se protegen contra la pérdida de agua en bolsas o recipientes herméticos y se envían a los laboratorios más completos en tierra.



Foto 1.3 Pruebas en la muestra de recuperación de penetrómetro de bolsillo

1.8 Sistema de perforación. (ACTUAL)

Este instrumento incorpora, un sistema completo de rotación de nivelación para la compensación total por movimiento vertical, con una unión giratoria de impulso tipo complementada por una sarta API de perforación de 5.0" de diámetro equipada con una broca de aletas de centro abierto. Para realizar la perforación, se utilizó un templete de aproximadamente 4.4 m² de área efectiva de apoyo sobre el lecho marino, con un peso de 14.0 toneladas. El templete proporciona la reacción necesaria para el muestreo y las pruebas "in situ".

1.9 Equipo de Muestreo y Pruebas "in situ".

El conjunto de equipos y herramientas para llevar a cabo las pruebas in situ y operaciones de muestreo costa afuera ha sido denominado Sistema Dolphin ver Figura 1.6.

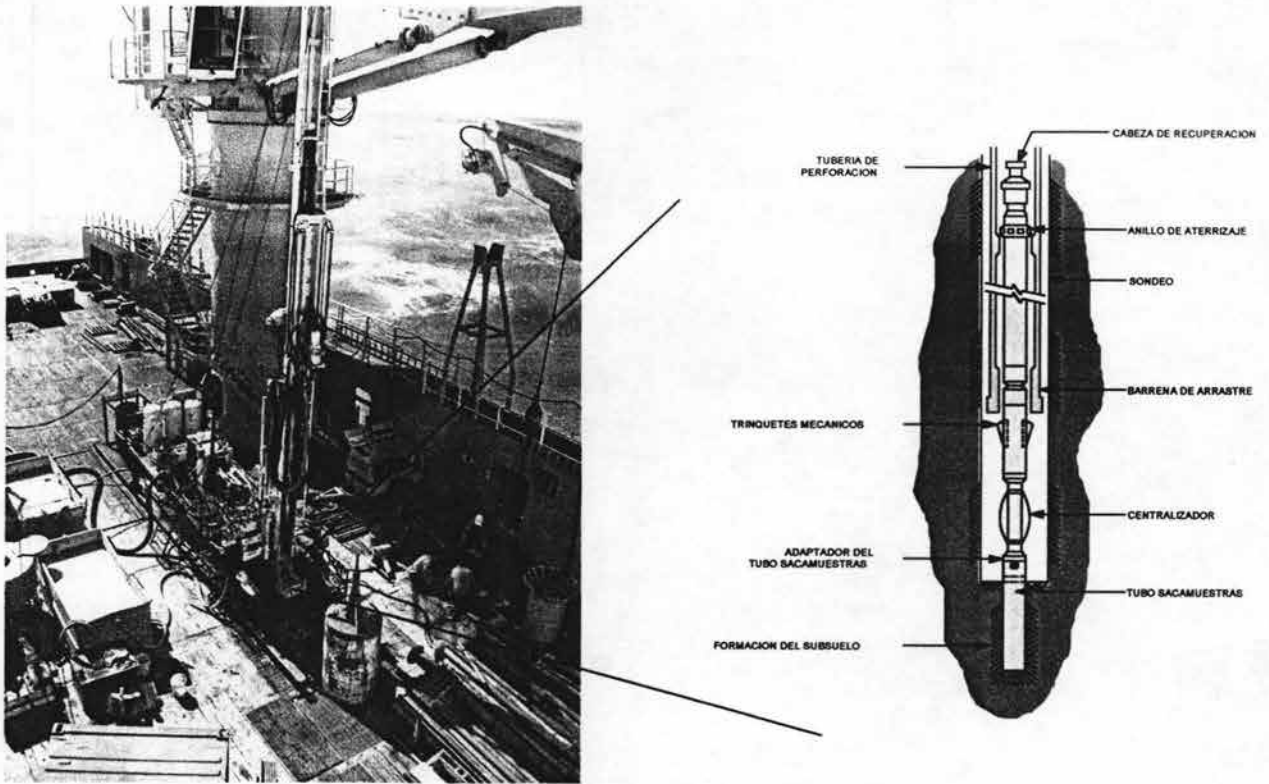


Figura 1.6. Muestreador por Presión Tipo Dolphin

Los componentes principales de este sistema son:

- Sistema de adquisición de datos Dolphin.
- Herramienta Dolphin tipo downhole.
- Malacate/sistema hidráulico umbilical.
- Compensador de movimiento vertical entre la sarta de perforación y el barco.
- Ensamblaje de la sarta de perforación e impulsador
- Masa de reacción.
- Tubo muestreador por presión de pared delgada (Shelby) de 76 mm.
- Tubo muestreador por percusión de pared delgada (Shelby) de 57 mm.

El muestreador por presión Dolphin obtiene muestras cohesivas de alta calidad mediante presión hacia la formación del suelo con el peso de la sarta de perforación.

Para muestrear suelos blandos se utilizó un muestreador especial de doble tubo de 64 mm de diámetro exterior cuya tubería interior consiste en tubos de baquelita, que a su vez puede ser utilizada como empaque de las muestras. (Ver foto 1.4).

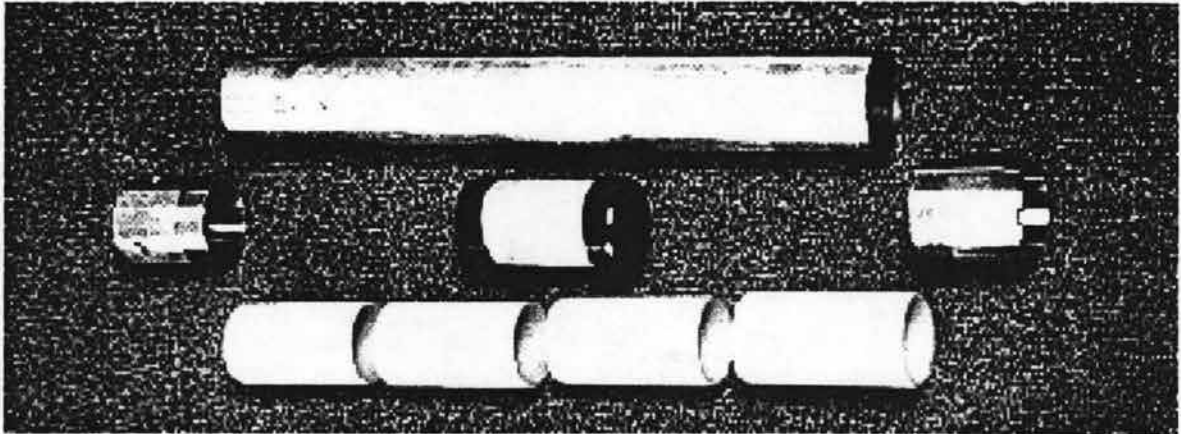


Foto 1.4 . Muestreador de Doble Tubo para Suelos Blandos.

El muestreo de arenas se realiza con una tubería lisa de 57mm de diámetro exterior, insertado a percusión con un martillo de 79.45 Kg. con una altura de caída de 1.5 m (cable guía), (ver foto 1.5).

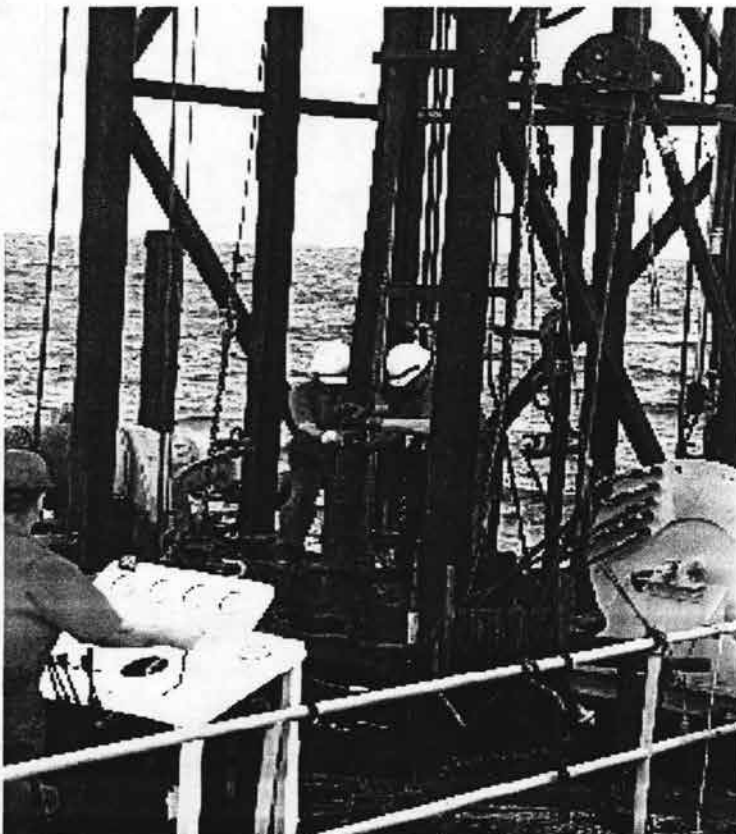


Foto 1.5 Muestreo por percusión

1.10 Plataformas autoelevables.

Estos equipos son empleados en determinados lugares para la perforación exploratoria de pozos petroleros, en los que se realizaron previamente diversos estudios que indicaron la posible existencia de gas y/o hidrocarburos. Son móviles y se componen de tres o cuatro piernas en cuya parte inferior se localizan sus elementos de cimentación, que puede ser a base de zapatas de acero independientes con punta al centro o consistir de una ancha placa en forma de "A" a la que llegan todas las piernas. En las figuras 1.7a, y 1.7b, se representan ambos tipos de plataformas.

La exploración del subsuelo para este tipo de estructuras se puede realizar de las dos maneras siguientes:

- A bordo de un barco acondicionado para trabajos geotécnicos, igual al mencionado anteriormente. Con el mismo equipo de perforación, muestreo y lodos utilizado para plataformas marinas fijas.
- A bordo del mismo equipo autoelevable, utilizando su equipo y lodos de perforación. En este caso, únicamente se sube a la plataforma el equipo de muestreo y laboratorio así como el personal necesario para la operación pruebas de laboratorio y estudios de Ingeniería. Adicionalmente, se suben algunos accesorios de perforación como la barrena y sus conexiones de acople a la sarta.

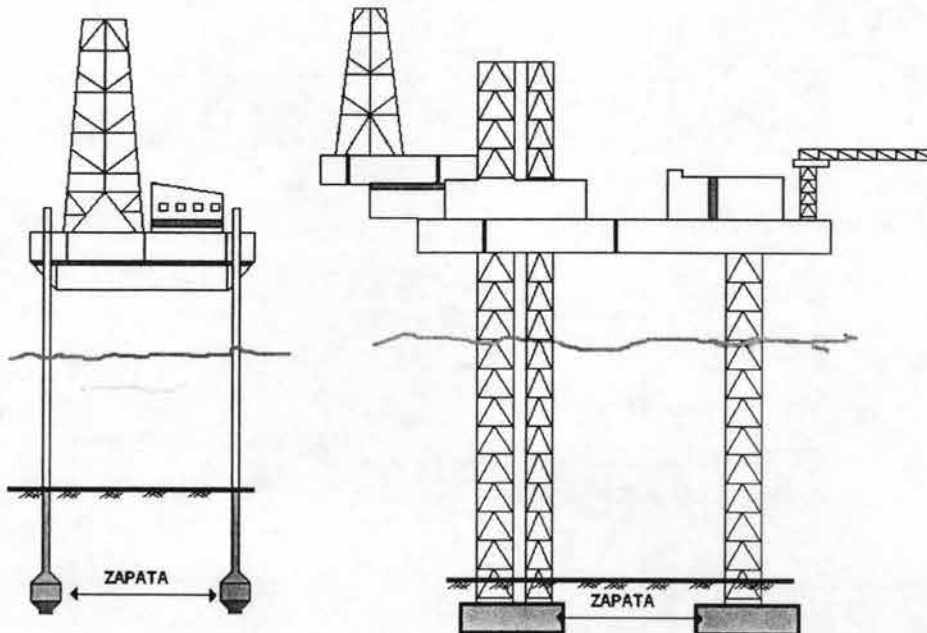


Figura 1.7a Tipos de plataformas Autoelevables

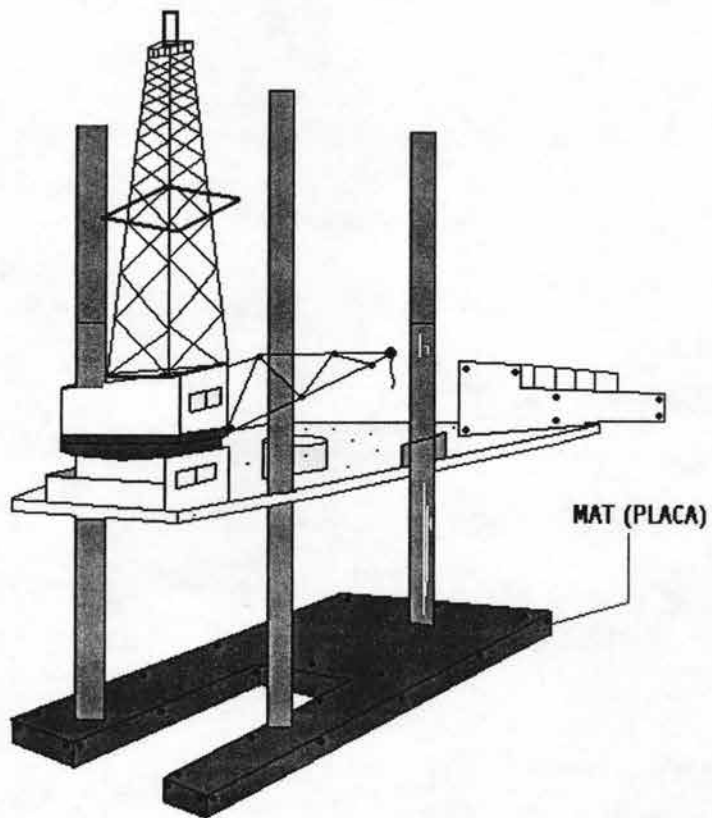
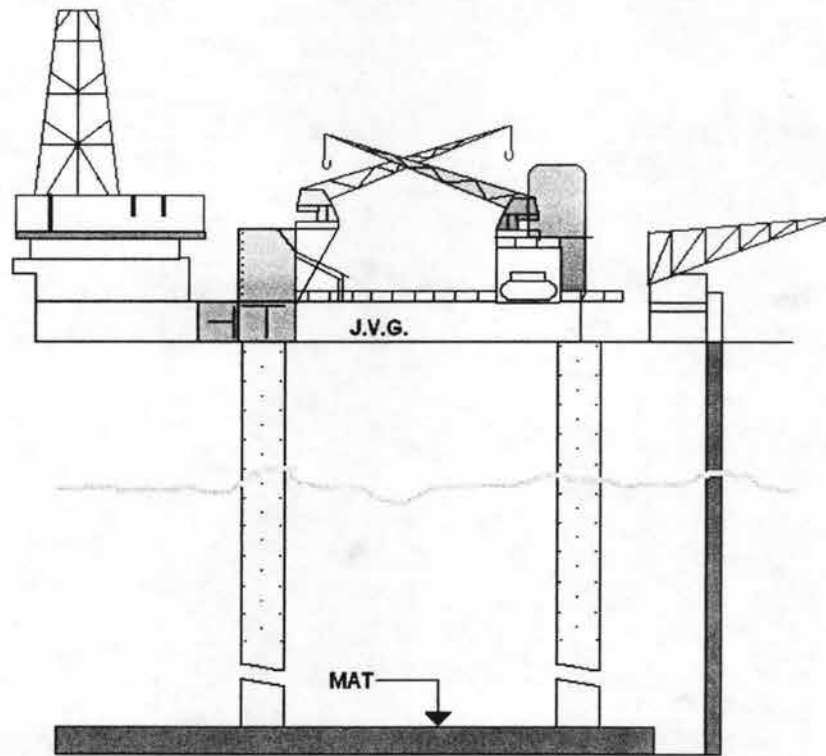


Figura 1.7b Tipos de plataformas autoelevables

Las técnicas de perforación, recuperación de muestras y empleo de lodos, en ambos casos, es similar a la de plataformas piloteadas. La única diferencia es en la secuencia de muestreo, ya que en este caso se trata de cimentaciones superficiales que requieran un conocimiento más detallado de los suelos de apoyo.

Para el caso de las zapatas independientes, la secuencia de muestreo en los primeros 12.0 m se realiza igual al del caso de los pilotes, es decir a cada 90 cm. De 12.0 a 18.0 metros o hasta el final del sondeo, a la profundidad de que el ingeniero a bordo considere conveniente, el intervalo de obtención de especímenes se hará a cada 1.50 m. Para el caso de plataformas con cimentación tipo losa instaladas en la Sonda de Campeche, solo se deberá aplicar el muestreo semicontinuo a cada 90 cm hasta una profundidad de 12.0 metros o menor según los antecedentes del lugar y el criterio del ingeniero geotécnico a bordo.

Como es de observarse el problema a resolver en los dos casos de equipos autoelevables es diferente, principalmente debido a los fenómenos de consolidación y asentamientos a corto y mediano plazo, que pueden presentarse sobre todo en las plataformas con cimentación tipo losa durante su operación. En las plataformas de zapatas independientes el mayor riesgo es la prevención de penetraciones súbitas de las zapatas durante la instalación, por la presencia de estratos altamente resistentes, pero de poco espesor, bajo los que se encuentran estratos más débiles, presentándose así la falla del suelo por punzonamiento en la punta de la zapata.

1.11 Pruebas de laboratorio.

Cada muestra que se recupera se somete a diversos ensayos de laboratorio, para la clasificación del suelo y para definir sus propiedades índice y mecánicas, para calcular razonablemente la capacidad de carga de los pilotes de una plataforma fija, la penetración de las zapatas o losa, bajo el lecho marino de las plataformas autoelevables, o la interacción de las tuberías con el suelo en las que serán tendidas. La cantidad de pruebas a realizar, deberán ser las suficientes para obtener un registro confiable de las propiedades del subsuelo antes de dar por terminado los trabajos en el área de trabajo.

1.12 Pruebas de campo.

Las pruebas de campo que se ejecutan a bordo del barco para el caso de plataformas fijas y autoelevables, se han planteado con la finalidad primordial de controlar la profundidad del sondeo.

Esto se logra calculando, simultáneamente a la perforación y a la elaboración del perfil stratigráfico, la capacidad de carga del suelo para un diámetro de pilote establecido con fines de diseño, o la penetración de una zapata de dimensiones y características conocidas.

La clasificación de los suelos se hace visual y al tacto, determinando la resistencia al corte en suelos cohesivos en base a ensayos rápidos y sencillos a porciones de muestras con veleta miniatura, torcómetro y Penetrómetro de bolsillo también, a juicio del ingeniero geotécnico se ejecutan en el barco pruebas de compresión simple y de compresión triaxial no consolidada no drenada a ciertas muestras escogidas, en donde las mediciones obtenidas con equipos mas sencillos son incongruentes. Así mismo, como adelantado a las pruebas en tierra se efectúan pruebas índice, como el contenido natural de agua y el peso volumétrico.

En el caso de pilotes a los materiales granulares se les practicó pruebas índice de solubilidad en ácido clorhídrico, para definir su contenido de carbonato así como el contenido de finos mediante la determinación del porcentaje de material que pasa por la malla No. 200.

Las muestras de suelo cohesivo no trabajadas se protegen contra los cambios de humedad envolviéndolas con papel parafinado y luego con papel aluminio se recubren de parafina introduciéndolas posteriormente en tubos de cartón relleno el espacio anular entre el tubo y la muestra con aserrín y sellado los extremos con parafina líquida. De este modo quedan listas para su envío a tierra junto con el programa de pruebas de laboratorio respectivo, asignado por el ingeniero a bordo. Las muestras de suelos granulares que se envían para ensayos adicionales en tierra, se colocan en bolsas de polietileno.

Todas las muestras no probadas en el barco ya protegidas se etiquetan con el nombre de la localización donde se realizó el estudio, la fecha y el número consecutivo en caso de ser dos tramos de una sola muestra.

Para el caso de tuberías submarinas, no se realizan pruebas de laboratorio a bordo, limitándose los trabajos a una clasificación visual y al control de la posición de las muestras en cada punto seleccionado a lo largo del corredor.

1.13 Pruebas en tierra.

Para estructuras fijas y Autoelevables, en esta etapa se realizan todos los ensayos tendientes a complementar y afirmar la información obtenida de campo, tanto de los parámetros interpretados como de los análisis de ingeniería efectuados.

Aquí, es fundamental el criterio de los ingenieros que participarán en la elaboración de los informes preliminar y final, por lo que el programa de ensayos enviados del barco podría variar según sus observaciones.

Por lo general a las muestras recibidas se les realizan un completo programa de laboratorio que comprende las siguientes pruebas:

En suelos cohesivos.

- Clasificación visual y determinación del contenido natural de agua a cada 30 cm de muestra recuperada.
- Obtención de los límites de consistencia de Atterberg a cada 60 cm, efectuándose cuando menos una prueba de este tipo en cada muestra.
- Pruebas de resistencia al cortante con veleta miniatura, efectuadas antes de extraer la muestra de tubo de plástico (muestreador).
Estas pruebas se hacen cada 60 cm.
- Pruebas de veleta miniatura en muestras remoldeadas, para valuar la sensibilidad de la arcilla.

En suelos granulares

- Identificación, clasificación y contenido natural de agua a cada 30 cm de muestra recuperada.
- Análisis granulométrico a cada 90 cm.
- Determinación del contenido de carbonatos, cuando menos a cada 90 cm de cada muestra recuperada.

2

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA SONDA DE CAMPECHE

2.1 GEOLOGÍA DE MÉXICO

2.1.1 Aspectos Generales

La República Mexicana es rica en una gran variedad de rocas, estructuras y formaciones geológicas de interés económico, que surgieron como resultado de la acción de fenómenos volcánicos, tectónicos y otros, tanto internos como externos, ocurridos a lo largo del tiempo geológico.

La interpretación de todos estos elementos puede llevar a la reconstrucción de la historia geológica del territorio nacional y en consecuencia, a la comprensión del origen y posible distribución de muchos yacimientos de importancia económica.

Las rocas predominantes en la República Mexicana son: Al Occidente, las ígneas extrusivas, principalmente Cenozoicas, escasas metamórficas, ígneas intrusivas, extrusivas mezo y paleozoicas, aún más exiguas las sedimentarias paleozoicas,(ver figura 2.1). En la porción oriental se hallan profusamente rocas sedimentarias marinas mezo y cenozoicas, principalmente calcáreas y en menor grado a partir de clásticos; además depósitos continentales del Cenozoico Superior se encuentran ampliamente distribuidos.

La porción septentrional de la Península de Baja California está constituida de Oriente a Poniente por tres franjas: la primera batolítico y metasedimentaria.

Mesozoica con una provincia cenozoica en el Golfo de California; la segunda volcánico-volcanoclástica mesozoico y la tercera sedimentaria del Mesozoico Superior. La porción austral de esta Península es una zona de rocas sedimentarias marinas y volcánicas cenozoicas y algunos depósitos continentales del Cenozoico Tardío y plutónicas mesozoicas, así como una secuencia de afinidad oceánica también Mesozoica.

En la región de Sonora se encuentran rocas metamórficas y sedimentarias precámbricas; sedimentarias paleozoicas; ígneas, sedimentarias y metamórficas mesozoicas, con estructuras esencialmente de homoclinales en distribución errática de bloques colapsados, de sierras y cuencas, bajo una exigua cubierta volcánica cenozoica de la Sierra Madre Occidental que se interna en territorio estadounidense.

Rocas metasedimentarias de plataforma afloran primordialmente en el flanco occidental de la Sierra Madre Occidental, cuyo núcleo lo constituyen las rocas intrusivas ácidas del

Batolito de Sinaloa. A mediados del Cenozoico sucede el evento volcánico piroclástico-ignimbrítico que origina la gran meseta volcánica, que es propiamente esta expresión fisiográfica, siendo la cubierta de este tipo más extensa de la Tierra.

La porción Norte y Noreste de México está constituida principalmente por rocas sedimentarias mesozoicas y cenozoicas, así como por depósitos continentales recientes, que cubren gran parte de la Mesa Central, Sierras y Cuencas del Norte, y la Paleocuenca de Burgos, esta última cenozoica. En diversas localidades se tienen pequeñas ventanas de rocas metamórficas principalmente del Precámbrico y Paleozoico. Un rasgo importante en esta zona de México es la Sierra Madre Oriental, cuya formación se inicia a mediados del Mesozoico y culmina al inicio del Cenozoico.

En el Cenozoico Superior la neotectónica distensiva irrumpe en la mayor parte del territorio nacional, y adquiere su máxima expresión en la provincia de Cuencas y Sierras del Norte; como un reflejo de la apertura y migración del Golfo de California y quizá en la Cordillera Neovolcánica, se ubican rocas cenozoicas situadas transversalmente en las principales estructuras del país.

En la zona centromeridional de México se tienen los terrenos tectonoestratigráficos Oaxaqueño, Mixteco y Juárez respectivamente, con una orientación Norte-Sur, y los terrenos Guerrero y Xolapa y la parte mesozoica aflorante del terreno Maya con dirección aproximadamente Este-Oeste, los cuales se correlacionan en gran parte de las secuencias meta-volcánica-sedimentarias aflorantes en Guerrero a partir de un arco volcánico insular-marginal denominado "Teloloapan-Alisitos", superpuestos por rocas calcáreas Mesozoicas de plataforma.

El terreno Xolapa, de la Sierra Madre del Sur, es un complejo cristalino intrusivo-metamórfico principalmente del Mesozoico, alineado a la Trinchera de Acapulco, que hacia el sureste de la República continúa como el Macizo Chiapaneco del Paleozoico Superior.

Al Sureste de México continúa la Sierra Madre Frontales de Chiapas. En el Área del Golfo de México, principalmente en el subsuelo de las cuencas terciarias del Istmo y Tabasco, así como las correspondientes plataformas continentales de Campeche, principalmente, yacen las reservas más importantes de hidrocarburos con que cuenta el país.

La península de Yucatán constituye una plataforma estable de rocas sedimentarias cenozoicas en posición horizontal sin perturbación orogénica importante.

Los yacimientos minerales se hallan profusamente distribuidos en la República Mexicana, a excepción de las áreas del Golfo de México y península de Yucatán.

La distribución de los Recursos Naturales no renovables de México guarda una estrecha relación con las provincias geológicas del territorio.

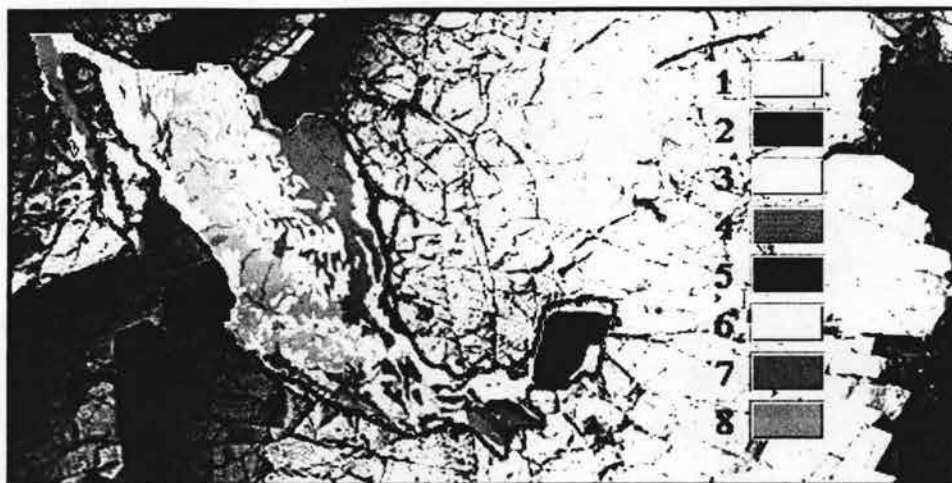


Figura 2.1 Geología de México

- 1. Pleistoceno y reciente.**
- 2. Cenozoico cuaternario.**
- 3. Cenozoico terciario.**
- 4. Mesozoico.**
- 5. Paleozoico.**
- 6. Proterozoico y Arqueozoico.**
- 7. Rocas ígneas intrusivas.**
- 8. Rocas ígneas extrusivas.**

En la Sierra Madre Occidental existen importantes yacimientos minerales, principalmente en forma de vetas y filones a partir de fracturas, criaderos alojados en zonas de fallas y a lo largo de contactos entre rocas ígneas intrusivas y sedimentarias, que originan minerales, principalmente hierro, cobre, oro, plomo y zinc.

En la Península de Baja California existen yacimientos de sulfuro de hierro y cobre, minerales de tungsteno, manganeso, cobre, plata, plomo, wolframio y antimonio.

En los estados de Oaxaca, Sonora y Coahuila, particularmente en la cuenca de Sabinas se localizan importantes yacimientos de carbón.

En la Cordillera Neovolcánica existen depósitos de manganeso, plomo, plata y zinc. Al sur de esta provincia se encuentran distritos mineros de sulfuros hidrotermales en los estados de México, Guerrero y Michoacán, y diversos criaderos de fluorita, caolín, diatomitas, vidrios, etc. En la Sierra Madre del Sur existen yacimientos de hierro, cobre, oro, manganeso, plomo y zinc.

En Baja California se encuentran oro, plata, hierro, cobre, yeso, manganeso, talco, magnesio y fosforita.

Se han practicado estudios sobre yacimientos de uranio en el Norte, centro y Sur de México, los más conocidos son los de: Chihuahua (Plan de Guadalupe, y Sierra de Peña Blanca), Oaxaca (Telixtlahuaca) y Michoacán (La Piedad).

También existen yacimientos de minerales no metálicos como: yeso, magnesio, arcillas, caolín, salinas y sales sódicas, las cuales se localizan en toda la República Mexicana.

2.2 Geología de la Sonda de Campeche.

Estratigrafía

La columna geológica atravesada en la Sonda de Campeche es la que se muestra en la tabla 2.1.

ERA	CIMA	ESPESOR
Plio-pleistoceno	Fondo marino	650 m
Mioceno	650 m	2150 m
Oligoceno	2800 m	350 m
Eoceno	3150 m	250 m
Paleoceno	3400 m	200 m
Cretácico	3600 m	500 m
Jurásico	4100 m	?

Tabla 2.1

El panorama geológico de esta provincia ha sufrido transformaciones a través del tiempo que han dado lugar al depósito de diferentes tipos de rocas. Tectónicamente se caracteriza por la presencia de fuertes plegamientos compresionales y también por importantes discordancias.

PALEOZOICO.- Durante la era paleozoica emergían de las aguas los petroelementos Macizo de Chiapas y continente de Yucatán. Hay evidencias de que en ese tiempo se desarrollaron importantes plataformas calcáreas.

Las rocas del basamento penetradas por los pozos perforados en la península de Yucatán son metamórficas de edad paleozoica, cubiertas por areniscas y limolitas de Triásico – Jurásico. Este basamento se acusa también en los mapas magnetométricos. Los fenómenos tectónicos subsecuentes ocurridos en esta provincia son, en mucho, el resultado de los movimientos que experimentaron estos elementos.

MESOZOICO.- Las rocas del Mesozoico son muy importantes en nuestro país, porque son las principales productoras de hidrocarburos, sobre todo las del cretácico medio e inferior. Las rocas jurásicas, además de ser productoras, por su alto contenido de materia orgánica, son consideradas las más prolíferas generadoras de hidrocarburos.

A través de la era mesozoica existieron cambios importantes en las condiciones ambientales. Las rocas se formaron en ambientes que van desde aquellas depositadas a lo largo de las litorales continentales, hasta las depositadas en amplias plataformas y en cuencas.

TRIÁSICO.- Aunque en los pozos marinos de Campeche no se han alcanzado rocas de este periodo, los pozos Yucatán perforados sobre la península han penetrado a una serie de areniscas y limolitas rojizas continentales de la formación todos santos correspondientes al Triásico-Jurásico que cubren a rocas metamórficas del basamento.

JURÁSICO.- Durante el Jurásico, en lo que es actualmente la Península de Yucatán, prevalecieron condiciones continentales parecidas a las del Triásico. Los terrígenos eran acarreados hacia las fajas litorales que bordeaban este continente mientras que en las amplias plataformas, en general someras, se depositaban calizas y dolomías en tanto que en las cuencas se acumulaban sedimentos arcillosos. En la Sonda de Campeche solo el pozo Chac ha penetrado estratos de Jurásico superior (Oxfordiano), constituido en la parte superior por lutitas y escasas calizas depositadas en ambiente de cuenca o en plataforma externa profunda, en su porción más inferior se perforaron 50 m de areniscas de ambiente litoral impregnadas de aceite ligero.

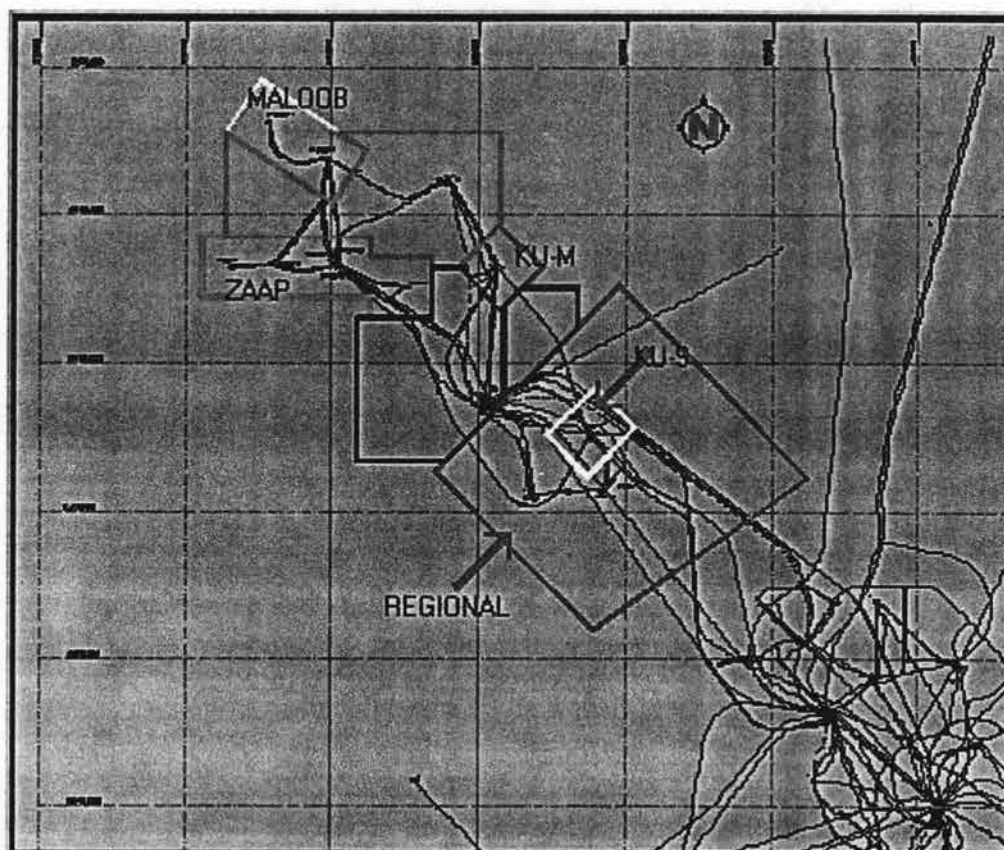
Es probable que al oriente del pozo Chac tengamos la presencia de terrígenos a lo largo de las antiguas costas, los que pueden llegar a constituir importantes rocas almacenadoras de hidrocarburos.

2.3 Metodología de exploración en la zona de proyecto

Para poder determinar las condiciones geológicas del suelo marino se llevó a cabo un estudio geofísico de alta resolución acústica, en la zona de Ku-Maloob-Zaap que se encuentra en la Sonda de Campeche.

Esto con la finalidad de tener un panorama del comportamiento geológico de la zona, ya que regularmente se encuentra afectada por formaciones arrecifales aflorantes y sepultadas así como también fallas y formaciones de gas, que estas podrían afectar a las plataformas durante su instalación así como también durante su operación.

En el croquis 2.1 se muestra la ubicación de las áreas de exploración geofísica y la localización de la geología de la zona.



Croquis 2.1 Representa la localización de la geología de la zona de Ku-Maloob-Zaap

A continuación se describen las actividades que fueron desarrolladas para determinar el sitio más adecuado para la instalación de una plataforma marina o la trayectoria de una línea submarina, en la zona de proyecto.

La figura 2.2, ilustra de manera generalizada el funcionamiento de los equipos sísmico-acústicos utilizados.

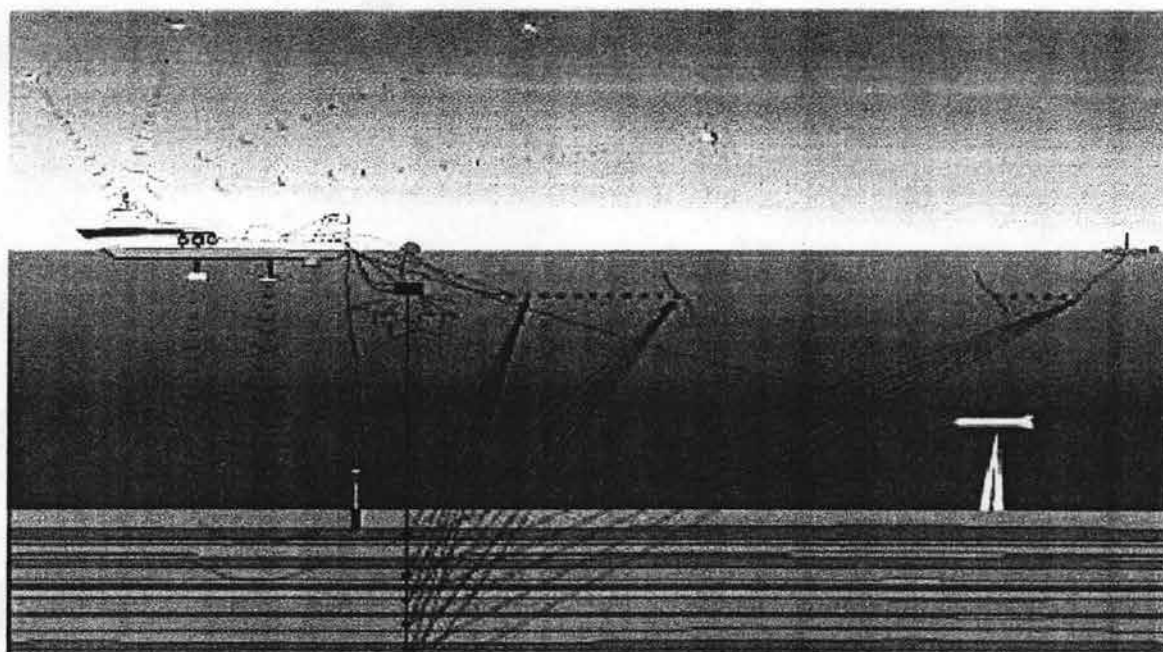


Figura 2.2 Funcionamiento de los equipos geofísicos

Muestreo del lecho Marino

En esta etapa se posiciona el barco en el punto predeterminado, consecuentemente se inician los preparativos para la operación del sistema de muestreo, (Ver figura 2.3) a través de una estructura de acero instalada por la borda del barco, se bajó, mediante el malacate, (ver figura 2.3a) el muestreador de gravedad hasta una altura determinada del fondo marino. Posteriormente, se deja caer, alcanzando penetraciones que variaron de 1.07 a 4.0 metros.

La muestra se recuperó en un tubo de plástico transparente, localizado dentro del barril de muestreo, evitando la salida de la muestra mediante canastillas, Colocadas en la punta de la zapata de hincado, que se cierran una vez que el espécimen es atrapado.

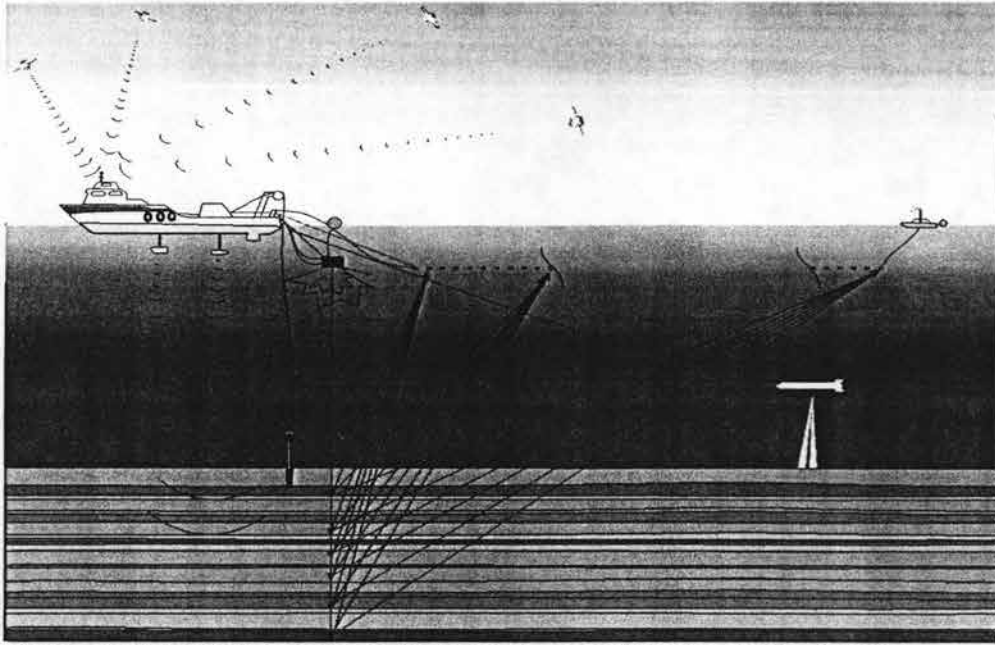


Figura 2.3 Recuperación de la muestra en el lecho marino con el Muestreador de gravedad

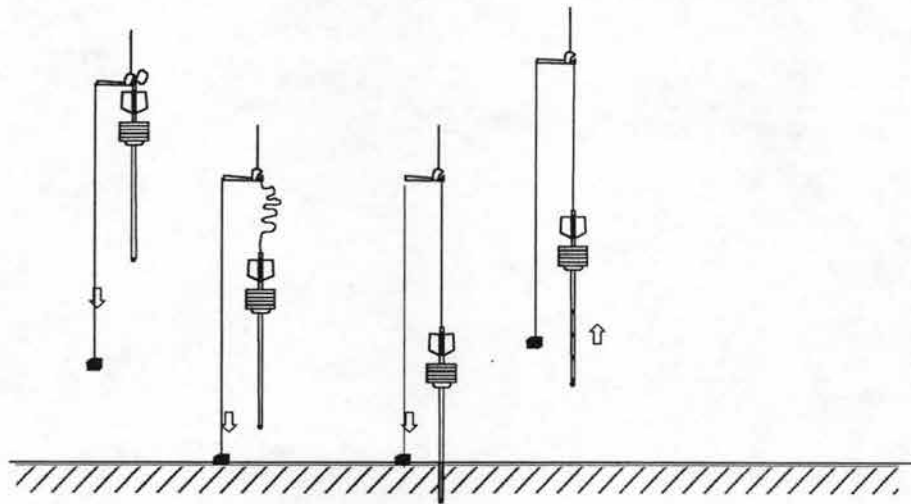
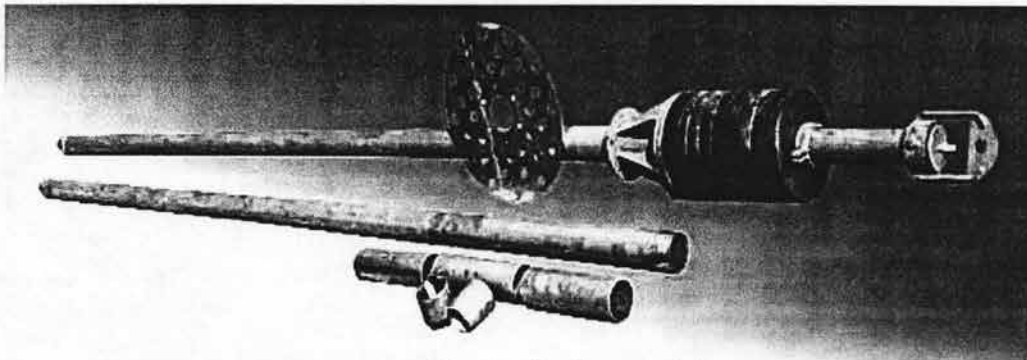


Fig. 2.3.a Esquema donde se muestra el procedimiento y la obtención de la muestra por Gravedad.

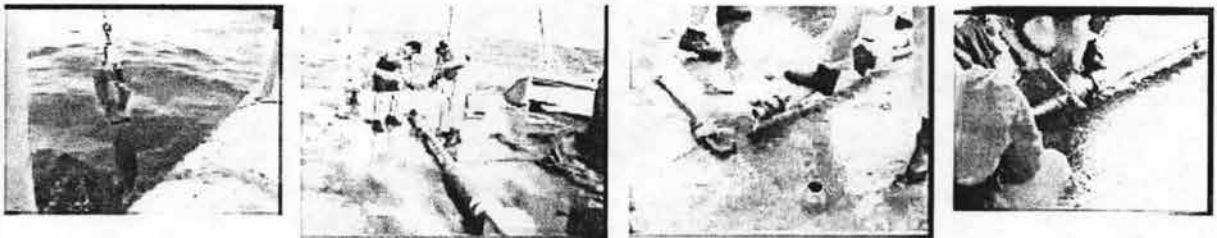


Muestreador de gravedad

Obtenida la muestra, se recupera la unidad de muestreo hasta la cubierta del barco, colocándola en posición horizontal para poder extraer el tubo de plástico. Esta misma operación se repite para cada muestra.

Las muestras obtenidas, se sellaron, identificaron y almacenaron para su envío a tierra y para sus respectivos ensayos de mecánica de suelos.

En la Figura 2.4, se puede apreciar algunas de las operaciones de muestreo ejecutadas en campo, que comprenden desde la obtención de la muestra en el lecho marino, recuperación del muestreador y ensayos abordo así como la realización de pruebas de mecánica de suelos a los especímenes obtenidos.



Recuperación del muestreador de gravedad abordo



Extracción del tubo transparente que contiene la muestra, clasificación y pruebas abordo

Figura 2.4 operación y recuperación de la muestra

2.4 Geología regional del área de Ku Maloob-Zaap

Batimetría

Los valores de tirante de agua en el área explorada varían con una pendiente del orden 0.17 % con tendencia hacia el **NW** variando de 51.2 m al **S** hasta 66.35 m al **N**.

Eventos sobre el lecho marino

Sedimentos no consolidados

En el área explorada, la capa de sedimentos no consolidados esta constituida por suelos arcillosos de color gris verdoso.

El espesor de los sedimentos no consolidados, medidos a partir del lecho marino hasta la primera capa resistente, presenta un comportamiento ligeramente irregular debido a la presencia de zonas con pequeñas formaciones arrecifales sepultadas y erosiones aisladas. El espesor de sedimentos varia en general del orden de 4.30 a 16.80 metros.

Ambiente geológico

De acuerdo a los antecedentes geológicos regionales de la Sonda de Campeche, la unidad de sedimentos no consolidados, corresponde a la época del reciente, holoceno y pleistoceno, del periodo cuaternario, constituida básicamente por suelos arcillosos altamente plásticos.

Asimismo, bajo la unidad de sedimentos no consolidados se localizó un estrato de arena regional, de aproximadamente 10 m de espesor, al cual subyace un estrato de arcilla de espesor indeterminado.

Riesgos Potenciales

Se consideraron como riesgos potenciales, lo que a continuación se describe:

- Diversas zonas de probables formaciones arrecifales calcáreas sepultadas, repartidas en toda el área explorada, las cuales se encuentran en la interfase de los sedimentos no consolidados y primera capa consolidada, a profundidades variables del orden de 4.3 m hasta 14.6 m aproximadamente, de los cuales las más someras se localizan en la parte **NW** de la región explorada.
- Se detectaron 3 fallas geológicas normales, dos hacia el Sur y una al **NW**, del área explorada, las cuales se manifiestan a partir de la base de la unidad de sedimentos no consolidados y probablemente se prolonguen a mayores profundidades. Estas fallas se presentan a partir de los 8.6 m hasta los 11.7 m con saltos de falla que van desde 1.1 m hasta 6.0 m. Por la profundidad a la que se encuentran, bajo el lecho marino.

2.5 Geología de la zona de Ku-s

Batimetría

En el área investigada, los valores de tirante de agua, varían de 58.25 m en el extremo Sur, hasta 62.20 m en el extremo Norte, lo que indica una pendiente hacia el **N-NW** de aprox. 0.13 %. El valor del tirante del agua en la zona es de 60.25 m, 60.05 y 60.75 m, respectivamente.

Sedimentos no consolidados

En la zona se detectó que la capa de sedimentos no consolidados la cual está constituida por suelos arcillo-limosos de color gris verdoso, con ocasionales fragmentos de conchas.

El espesor de los sedimentos no consolidados, medidos a partir del lecho marino hasta la primera capa resistente, presenta un comportamiento irregular debido a la presencia de zonas con formaciones arrecifales sepultadas.

El espesor de sedimentos varía en general del orden de 9.50 a 14.0 metros. En dicha zona el espesor es de aproximadamente 12.0 m, 13.0 m y 11.0 m, respectivamente,

Geología Estructural.

Con el propósito de determinar el comportamiento estructural de las capas del subsuelo marino se analizaron dos horizontes denominados como:

- Estructural somero
- Estructural profundo

Horizonte estructural somero.- Los sedimentos se encuentran aproximadamente entre los 84 y los 102 metros, bajo el lecho marino, con una tendencia hacia el **N-NW**. El horizonte se observa uniforme y sin eventos geológicos relevantes que lo afecten.

Horizonte estructural profundo.- Se analizó el comportamiento geológico estructural a un nivel de dos a tres veces la profundidad de hincado de los pilotes de cimentación, o donde se observaron estructuras geológicas relevantes. Así, las profundidades de este horizonte varían aproximadamente de 245.5 a 283.0 metros, medidos a partir del lecho marino, con una tendencia hacia el **N**. Este horizonte se observó afectado por una falla al extremo **SE** del área explorada.

Ambiente geológico

De acuerdo a los antecedentes geológicos regionales de la Sonda de Campeche, las unidades sedimentarias de los horizontes somero y profundo, corresponden a la época del reciente, Holoceno y Pleistoceno, del periodo cuaternario, caracterizada por estratificaciones intercaladas de arcilla y arena, predominando la existencia de potentes estratos arcillosos.

De acuerdo a los rasgos geológicos mencionados se consideran como riesgos potenciales los que a continuación se describe.

- Una zona aislada con hallazgos relacionados a una probable erosión somera, localizada al Sur el área investigada a una profundidad aproximada de 12 m, bajo el lecho marino
- Al extremo Sureste del área investigada, se localizó una falla geológica normal, que se manifiesta hasta aproximadamente 199 m, bajo el lecho marino.
- Al Suroeste del área explorada, se delimitaron dos zonas aisladas con eventos relacionados a probables acumulamientos profundos de gas, en intervalos de profundidades de 148 a 203 m, bajo el lecho marino.

2.6 Geología de la zona de Ku-m.

Batimetría

En el área investigada, los valores de tirante de agua, varían de 69.50 m en el extremo **SE**, hasta 75.40 en el extremo **NW**, lo que indica una pendiente hacia el **NW** de aprox. 0.20 %. El valor del tirante de agua en los en la zona es de 72.95 m y 72.75 m, respectivamente.

Eventos sobre el lecho marino

En el área se localizaron varios afloramientos aislados de formaciones arrecifales calcáreas, distribuidas dentro del área explorada, los cuales no afectan a la zona.

Sedimentos no consolidados

En el área explorada, la capa de sedimentos no consolidados esta constituida por suelos arcillo-limosos de color gris verdoso, con ocasionales fragmentos de conchas.

El espesor de los sedimentos no consolidados, medidos a partir del lecho marino hasta la primera capa resistente, presenta un comportamiento irregular debido a la presencia de importantes zonas con formaciones arrecifales sepultadas. El espesor de sedimentos varia en general del orden de 6.00 a 11.39 metros; con algunas zonas aisladas donde los espesores son de 0.00 metros. En los sitios de sondeo en esta zona se presenta, el espesor de aproximadamente 4.50 m y 6.0 m, respectivamente.

Geología Estructural

Horizonte estructural somero.- En la zona los sedimentos varían aproximadamente entre los 79.0 y los 90.50 m, bajo el lecho marino, con una tendencia hacia el Norte. El horizonte se observa uniforme y sin eventos geológicos relevantes que lo afecten.

Horizonte estructural profundo.- El comportamiento geológico estructural que se determino a una profundidad de dos a tres veces la profundidad de hincado de los pilotes de cimentación, de donde se observaron estructuras geológicas relevantes. Así, las profundidades de este horizonte varían aproximadamente de 219 a 243 metros, medidos a partir del lecho marino, con una tendencia hacia el Norte. Este horizonte se observó afectado por las anomalías asociadas a la probable acumulación de gas profundo.

Ambiente Geológico

De acuerdo a los antecedentes geológicos regionales de la Sonda de Campeche, las unidades sedimentarias de los horizontes somero y profundo, corresponden a la época del reciente, Holoceno y Pleistoceno, del periodo cuaternario, caracterizada por estratificaciones intercaladas de arcilla y arena, predominando la existencia de potentes estratos arcillosos.

De acuerdo a los rasgos geológicos mencionados se consideran como riesgos potenciales lo que a continuación se describe.

Riesgos potenciales

- Diversas zonas de probables formaciones arrecifales calcáreas sepultadas, las cuales se encuentran entre el lecho marino y la primera capa consolidada. En general los espesores varían de 0.6 m a 7.5 m.
- Algunas zonas aisladas con pequeños afloramientos, sobre el lecho marino, de formaciones arrecifales calcáreas.
- Al extremo Sureste del área investigada, se localizó una zona con rasgos relacionados a probables acumulaciones profundas de gas, situadas a una profundidad del orden de 185 m, bajo el lecho marino.

2.7 Geología de la zona Maloob A y B.

Batimetria

En el área investigada, los valores de tirante de agua, varían de 81.40 m en el extremo **SE**, hasta 93.90 en el extremo **NW**, lo que indica una pendiente hacia el **NW** de aprox. 0.30 %. Los valores del tirante de agua en la localización **MALOOB-A** es de 83.60 m y en **MALOOB-B** es de 91.00 m.

Eventos sobre el lecho marino.

En la zona se encuentran importantes formaciones arrecifales sobresalientes del lecho marino, las cuales invaden aproximadamente el 75% del área investigada, cabe mencionar, que algunas de las formaciones arrecifales aflorantes, localizadas en cercanías de Maloob B, están relacionadas a fallas geológicas, posiblemente activas.

Sedimentos no consolidados

En el área explorada, se encuentra la capa de sedimentos no consolidados la cual esta constituida por suelos arcillo-limosos de color gris verdoso, con ocasionales fragmentos de conchas.

El espesor de los sedimentos no consolidados, medidos a partir del lecho marino hasta la primera capa resistente, presenta un comportamiento sumamente irregular debido a la presencia de extensas zonas con formaciones arrecifales aflorantes y sepultadas, algunas de ellas asociadas con fallas. El espesor de sedimentos varia en general del orden de 0.00 m a 5.0 metros. En los sitios de sondeo PP-MB-1 y PP-MA-1, el espesor es de aproximadamente 2.70 m y 3.30 m.

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Horizontes estructurales

Para observar el de las capas del subsuelo marino se analizaron dos horizontes denominados como:

- Estructural somero
- Estructural profundo

Horizonte estructural somero.- El horizonte se observa uniforme y afectado por dos fallas geológicas localizadas en cercanías de Maloob B.

Horizonte estructural profundo.- El comportamiento geológico estructural representa estructuras geológicas relevantes. En la cual las profundidades de este horizonte varían aproximadamente de 238 a 286 metros, medidos a partir del lecho marino, con

una tendencia hacia el **NW**. Este horizonte se observó afectado por tres fallas geológicas así como por las anomalías asociadas a la probable acumulación de gas profundo y una probable erosión profunda.

Ambiente geológico

De acuerdo a los antecedentes geológicos regionales de la Sonda de Campeche, las unidades sedimentarias de los horizontes somero y profundo, corresponden a la época del reciente, holoceno y pleistoceno, del periodo cuaternario, caracterizada por estratificaciones intercaladas de arcilla y arena, predominando la existencia de potentes estratos arcillosos.

Riesgos Potenciales

De acuerdo a los rasgos geológicos mencionados se consideran como riesgos potenciales lo que a continuación se describe.

- Ocupando aproximadamente el 75 % del área explorada, se detectaron extensas zonas con importantes formaciones arrecifales aflorantes y sepultadas muy cercanas al lecho marino.
- Dos fallas geológicas normales, posiblemente activas, que se manifiestan hasta el lecho marino, localizadas en las inmediaciones del sitio Maloob-B en el extremo Noroeste del área explorada. Los sitios Maloob A y Maloob B, se encuentran lejos de estos hallazgos geológicos.
- Una falla geológica profunda en dirección **NE-SW**, localizada al **SE** de la superficie investigada, la cual se manifiesta hasta profundidades aproximadas de 148 a 206 m, bajo el lecho marino. El sitio Maloob A, se encuentra aprox. a 270 m al **NW** de este hallazgo.
- Zona con eventos relacionados a probables acumulamientos de gas profundo, localizados en un intervalo de profundidades de 180 a 330 y hasta 1000 metros, bajo el lecho marino. Las localizaciones Maloob A y Maloob B, se encuentran lejos de estas anomalías.
- Al Sur de la superficie estudiada, se localizó una pequeña zona aislada con rasgos relacionados a una posible erosión profunda, la cual se sitúa aproximadamente en un intervalo de profundidades de 166 a 175 metros, bajo el lecho marino. Los sitios Maloob A y Maloob B, se encuentran lejos de esta anomalía.
- Sobre el sitio Maloob A, se delimitó un área con rasgos asociados a una posible diferencia local estratigráfica de densidades, en los suelos someros localizados aproximadamente entre 2 y 5 metros, bajo el lecho marino.

2.8 Geología de la zona Zaap A, B, C Y D.

Batimetría

En el área investigada, los valores de tirante de agua, varían de 72.60 m en el extremo **SE**, hasta 93.00 m en el extremo **NW**, lo que indica una pendiente hacia el **NW** de aprox. 0.25 %. Los valores del tirante de agua en la zona se encuentran alrededor de 86.00 m.

Eventos sobre el lecho marino

Se manifestaron extensas zonas con importantes formaciones arrecifales sobresalientes del lecho marino, con elevaciones de hasta 9.0 m, sobre el fondo marino, en el extremo Noroeste del área investigada.

Sedimentos no consolidados

En el área explorada, la capa de sedimentos no consolidados esta constituida por suelos arcillo-limo-arenosos de color gris verdoso.

El espesor de los sedimentos no consolidados, medidos a partir del lecho marino hasta la primera capa resistente, presenta un comportamiento sumamente irregular debido a la presencia de extensas zonas con formaciones arrecifales aflorantes y sepultadas.

El espesor de sedimentos varia en general del orden de 0.00 a 9.0 metros. En los sitios, propuestos por PEP (*PEMEX Exploración y Producción*), 0.00 m, para ambos casos.

Geología Estructural

Con el propósito de determinar el comportamiento estructural de las capas del subsuelo marino se analizaron dos horizontes denominados como:

- Estructural somero
- Estructural profundo

Horizonte estructural somero

El comportamiento geológico estructural se encuentra con sedimentos que se encuentran en el orden de los 79.0 y los 100.0 m, bajo el lecho marino, con una tendencia hacia el Noroeste. El horizonte se observa uniforme y afectado por fallas geológicas localizadas en la parte Oeste del área estudiada.

Horizonte estructural profundo

Aquí se representara el comportamiento geológico estructural a un nivel de dos a tres veces la profundidad de hincado de los pilotes de cimentación, o donde se observaron estructuras geológicas relevantes. Así, las profundidades de este horizonte varían aproximadamente de 447 a 595 metros, medidos a partir del lecho marino, con una tendencia hacia el **NW**. Este horizonte se observó afectado por varias fallas geológicas, mayormente observadas en la parte Oeste de la superficie investigada.

Ambiente geológico

De acuerdo a los antecedentes geológicos regionales de la Sonda de Campeche, las unidades sedimentarias de los horizontes somero y profundo, corresponden a la época del reciente, holoceno y pleistoceno, del periodo cuaternario, caracterizada por estratificaciones intercaladas de arcilla y arena, predominando la existencia de potentes estratos arcillosos.

Riesgos Potenciales

De acuerdo a los rasgos geológicos mencionados se consideran como riesgos potenciales lo que a continuación se describe.

- Ocupando una gran extensión del área explorada, se detectaron extensas zonas con importantes formaciones arrecifales aflorantes y sepultadas muy cercanas al lecho marino.
- Siete fallas geológicas normales, localizadas principalmente al Oeste del área explorada, a profundidades que fluctúan entre 50 y 780 m, bajo el lecho marino. Cabe mencionar que el tramo de la falla, situada aproximadamente a 800 m al **SE** del sitio ZAAP D, se encuentra a profundidades del orden de 10 m, bajo el lecho marino. Los sitios ZAAP D y ZAAP B, se encuentran lejos de estas estructuras geológicas
- Diversas zonas aisladas, distribuidas dentro del área explorada, con eventos relacionados a probables acumulamientos locales de gas profundo, observados en un intervalo de profundidades promedio aproximado de 170 a 300 metros, bajo el lecho marino **N-NW** de uno de estos eventos, localizado en un intervalo de profundidades del orden de 230 a 280 m, bajo el fondo del mar. El sitio ZAAP B, se encuentra lejano de estos eventos.
- Diversas áreas aisladas con ligeros desniveles en el lecho marino, típicas de superficies donde existen grandes cantidades de formaciones arrecifales calcáreas. Los sitios ZAAP-B y ZAAP-D, se encuentran fuera de estos hallazgos. En los dos planos de riesgos anexos, se presentan detalles de estas superficies.

3

ELEMENTOS DE PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA

En la actualidad la Probabilidad y Estadística se aplica en diferentes disciplinas, una de ellas es a la Ingeniería Civil, en la cual el Ingeniero Civil se enfrenta con diferentes fenómenos a interpretar y entender esto puede ser la lluvia, viento, sismo etc. que casi nunca tienen los mismos valores observados aun bajo condiciones aparentemente idénticas.

El método de la ingeniería o científico es el enfoque aplicado para formular y resolver estos problemas. Los pasos del método de la ingeniería son los siguientes:

3.1 El método de la ingeniería y el pensamiento estadístico

1. Desarrollar una descripción clara y concisa del problema
2. Identificar, al menos de manera tentativa, los factores importantes que afectan al problema o que pueden jugar un papel en la solución
3. Proponer un modelo para el problema utilizando los conocimientos científicos de la ingeniería del fenómeno bajo estudio. Consignar todas las limitaciones y/o supuestos del modelo.
4. Realizar los experimentos apropiados y recolectar datos para probar o validar el modelo tentativo o las conclusiones planteadas en los pasos dos y tres.
5. Refinar el modelo con base en los datos observados.
6. Manipular el modelo para contribuir a desarrollar una solución del problema.
7. realizar un experimento apropiado para confirmar que la solución propuesta es efectiva que a la vez eficiente.
8. Sacar conclusiones o hacer recomendaciones con base a la solución del problema.

En figura 3.1 se muestran los pasos del método de la ingeniería. Obsérvese que el método de la ingeniería implica una estrecha interacción entre el problema, los factores que pueden influir en la solución, un modelo del fenómeno y la experimentación para verificar la adecuación del modelo y la solución propuesta del problema. Los pasos 2 al 4 de la figura 1 (encerrados en un recuadro), indicado que pueden requerirse varios ciclos o iteraciones de los mismos para obtener la solución final. Por consiguiente, los ingenieros deben conocer una manera eficiente para planear experimentos, recolectar datos observados con el modelo que han propuesto para el problema bajo estudio.

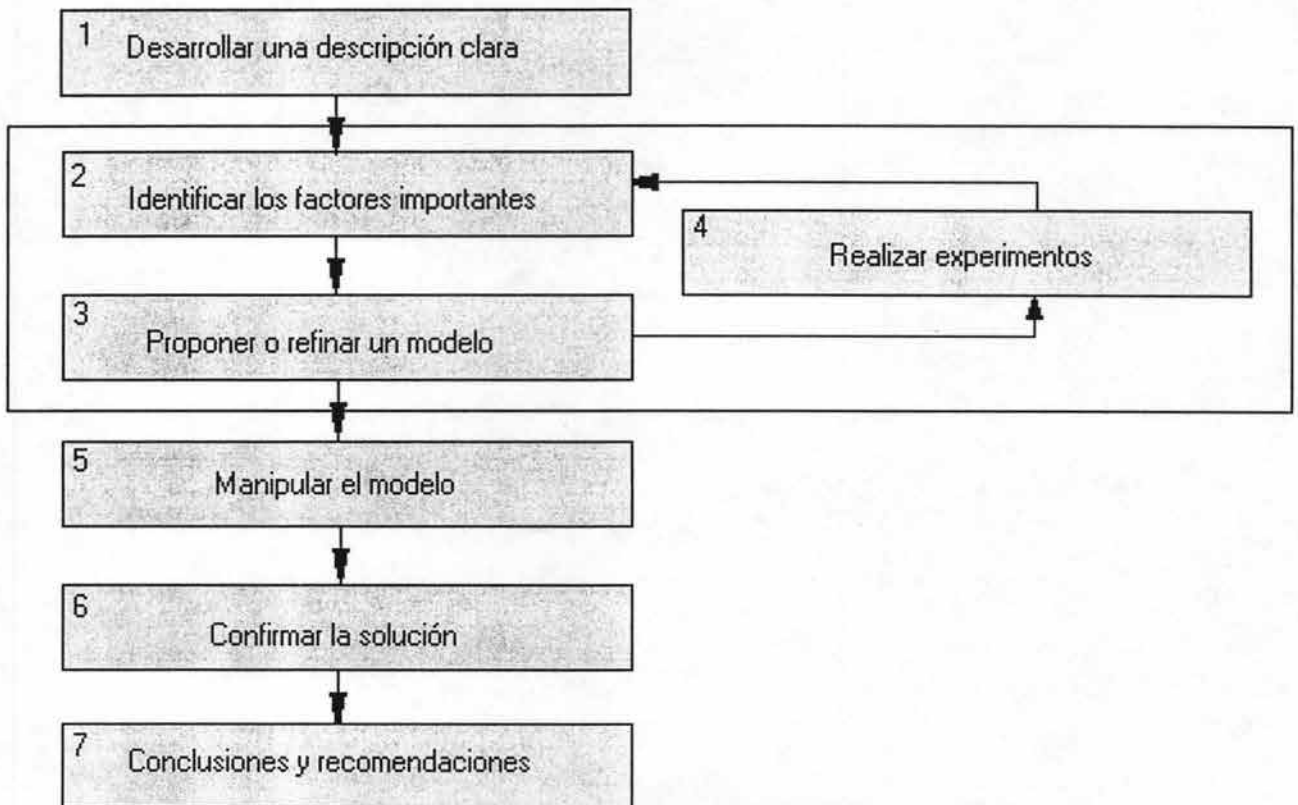


Figura 3.1 El método para resolver problemas

3.2 Probabilidad

La teoría de probabilidad se interesa en experimentos reales o ficticios cuyos resultados ε no pueden predecirse con anticipación. El conjunto S de los resultados posibles se llama universo. Los subconjuntos A de S se llama eventos. Un evento A ocurre si el experimento de un resultado ε que pertenece al subconjunto correspondiente. A los eventos que pueden agruparse en una clase aditiva completa, se les asigna una probabilidad que debe cumplir con los siguientes axiomas:

$$1. - p [A] \geq 0$$

$$2. - p [S] = 1$$

$$3. - p [A \cup B] = p [A] + p [B] \text{ si } [A \cap B] = \emptyset$$

El *axioma 1* afirma que la probabilidad de un evento debe ser un número positivo o cero.

El *axioma 2* establece que la probabilidad de un evento seguro (que forzosamente debe ocurrir) es 1 y

El *axioma 3* permite determinar la probabilidad de cualquier evento, siempre que se conozcan las posibilidades de los eventos elementales.

A) Definición clásica.

Si se realiza el experimento con las mismas condiciones n veces y n_a veces ocurre el evento A , se considera como probabilidad de A al límite de la relación $\frac{n_a}{n}$ cuando n tiene hacia el infinito.

En la práctica, el valor de la relación $\frac{n_a}{n}$ obteniendo para un valor suficientemente elevado de n se considera como una aproximación suficiente de la probabilidad.

b) Definición subjetiva.

Esta definición corresponde a la probabilidad asignada al evento considerado por una persona con cierta experiencia en cuanto a los resultados del experimento.

Esta definición se consideró inicialmente como inaceptable por carecer de rigor, sin embargo su utilidad en ingeniería ha sido ampliamente demostrada, especialmente en el marco de los análisis bayesianos.

En todo problema analizado mediante la teoría de probabilidad es indispensable que esté claramente definido el experimento al que hace referencia y la definición de probabilidad empleada.

c) probabilidad condicional

La frecuencia relativa como se muestra en la ecuación 3.1, de **A** condicionada a la ocurrencia de **B** se define considerando únicamente los casos en los que **B** se ha verificado y viendo en cuántos de ellos ocurre **A**. Esta misma propiedad la vamos a exigir a la probabilidad y se define la probabilidad de un suceso **A** condicionado a otro suceso **B**, con $P(B) > 0$, como:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad \dots\dots\dots 3.1$$

El suceso $A|B$ se llama suceso **A** condicionado a **B**.

Observación: es importante diferenciar entre $P(A \cap B)$ y $P(A|B)$:

- $P(A \cap B)$ indica la probabilidad de que ocurran conjuntamente **A** y **B** y siempre ocurre que:

$$P(A \cap B) \leq P(A)$$

$$P(A \cap B) \leq P(B)$$

El espacio muestral sigue siendo **S**.

- $P(A|B)$ es la probabilidad de que en los casos en los que ya haya ocurrido **B**, ocurra también **A** y puede ser:

$$P(A|B) > P(A) \text{ o bien } P(A|B) = P(A)$$

El espacio muestral es ahora **B**.

3.3 VARIABLES ALEATORIAS

Definición de variable aleatoria.

Una variable aleatoria es una función de los resultados del experimento probabilista considerando. Está función escrita $V(\varepsilon)$ o simplemente V , asocia los resultados del experimento a elementos del cuerpo de los enteros (variables aleatorias discretas (variables aleatorias discretas o continuas) o de los complejos (variables aleatorias complejas)

Variable Continua

Es aquella que puede asumir un número infinito de valores. Tal es el caso, por ejemplo de la resistencia de un cable de acero, de la velocidad de un vehículo, de la estatura o peso de una persona etc.

Variable aleatoria discreta

Estas pueden tomar solamente un número finito o infinito contable de valores.

3.4 Definición de función de distribución de probabilidad y función de probabilidad

Al estudiar variables aleatorias generalmente interesan sus llamadas distribuciones de probabilidad, es decir, los diversos valores de probabilidad, que toman en su rango.

Para expresar los valores de una distribución de probabilidad que toman en su rango.

Para expresar los valores de una distribución de probabilidad se utilizan símbolos tales como:

$$f(x), g(x), h(x), \text{ etc.}$$

Siempre que es posible se debe expresar a la función de probabilidades por medio de ecuaciones; de lo contrario se mostrara mediante una tabla que muestre la correspondencia entre los valores de una variable aleatoria y las posibilidades asociadas.

Por ejemplo $f(x) = 1/6$ para $x = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

Esta expresión de la distribución de probabilidad para los distintos puntos que se pueden obtener cuando se arroja un dado legal.

Por supuesto, no toda función definida para los valores de una variable aleatoria puede servir como distribución de probabilidad, puesto que los valores de las distribuciones de probabilidad son probabilidades y un valor de una variable aleatoria debe ocurrir siempre, se deduce que si $f(x)$ es un valor de una distribución de probabilidad, entonces

$$f(x) \geq 0 \text{ para toda } x$$

$$\sum_y f(x) = 1$$

Ejemplo.- Verifique si las siguientes funciones pueden emplearse como distribuciones de probabilidad.

a) $f(x) = x - 2/2$ Para $x = 1, 2, 3, 4$

b) $h(x) = x^2 / 25$ Para $x = 0, 1, 2, 3, 4$

Solución: a) Esta función no puede emplearse como distribución de probabilidad porque $f(1)$ es negativo., b) Esta función no puede emplearse como una distribución de probabilidad porque la suma de las cinco probabilidades es $6/5$ y no 1

Función de distribución de probabilidades

Hay una función, llamada función de distribución, que es particularmente apropiada para calcular probabilidades y cuyo campo de aplicación son los métodos de simulación. En general la función de distribución acumulativa, F_y de una variable aleatoria discreta, (Y) es una regla que especifica, para cada valor de (Y), la probabilidad de que $Y \leq y$ es como se muestra a continuación:

$$F_y(y) = P(Y \leq y) = P_y(0) + P(1) + \dots + P(y)$$

Funciones de probabilidad conjuntas

Cuando se trata con dos variables aleatorias X y Y , es conveniente trabajar con probabilidades conjuntas. De los conceptos anteriores de los eventos A y B era la probabilidad de la intersección $P(A \cap B)$. Sea A el evento $X = x$ y B el evento $Y = y$. Se define la distribución de probabilidades conjunta $P_{xy}(x, y)$, como una función que proporciona la probabilidad conjunta para cada pareja de valores x e y .

3.5 Estadística.

La estadística es el conjunto de técnicas existentes para el procesamiento de datos provenientes de observaciones o experimentos, con objeto de presentarlos en una forma simple que permita su interpretación (estadística descriptiva) o de reunir los elementos par el desarrollo de un modelo de tipo probabilista que permita establecer conclusiones en cuanto a la probabilidad de diferentes eventos (estadística inferencial).

3.5.1 Estadística descriptiva.

Entre las técnicas de la estadística descriptiva se encuentra la representación gráfica de los datos disponibles mediante tablas, histogramas y otras herramientas que facilitan su interpretación. Los grupos de datos x_1, x_2, \dots, x_n pueden además representarse en forma compacta mediante diversos parámetros como se muestra en la tabla 3.1, con el número de ecuaciones representadas:

MEDIA	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	ecuación 3.2
VARIANZA	$s_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$	ecuación 3.3
DESVIACIÓN ESTANDAR	$s_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	ecuación 3.4
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	$V = \frac{s_x}{\bar{x}}$	ecuación 3.5
MOMENTOS CENTRALES DEL ORDEN SUPERIOR	$m_{x,r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^r$	ecuación 3.6

Tabla 3.1

Si los datos están constituidos por una colección de valores apareados x_i y y_i se llama covarianza de la muestra ecuación 3.7:

$$S_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \dots\dots\dots 3.7$$

La covarianza normalizada se llama coeficiente de correlación ecuación 3.8:

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{S_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{y}}{S_y} \right) \dots\dots\dots 3.8$$

3.5.2 Distribuciones de frecuencia

Una distribución de frecuencia es un resumen de datos en forma compacta. Para construir una distribución de frecuencia, el rango de los datos debe dividirse en intervalos, a los que se acostumbra llamarse intervalos de clase o celdas. De ser posible los intervalos de clase deberán ser de la misma anchura a fin de reforzar la información visual de la distribución de frecuencia. La selección de números de intervalos de clase deberá hacerse con criterio para que pueda desarrollarse una representación razonable. El número de intervalos de clase depende del número de observaciones y del grado de dispersión de los datos. Una distribución de frecuencia que emplea muy pocos intervalos de clase o demasiados no será informativa.

En general, se encuentra que entre 5 y 20 intervalos de clase son satisfactorios en la mayoría de los casos y que el número de intervalos de clase deberá incrementarse con n . Elegir un número de intervalos de clase aproximadamente igual a la raíz cuadrada del número de observaciones.

También resulta conveniente presentar la distribución de frecuencia en forma gráfica, (ver figura 3.2), a esta representación se llama **histograma** para hacer un histograma, se usa el eje horizontal para representar la escala de medición y para trazar los límites de los intervalos de clase, el eje vertical representa la escala de la frecuencia (o de la frecuencia relativa).



Figura 3.2

Si los intervalos de clase tienen el mismo ancho, entonces las alturas de los rectángulos trazados en los histogramas son proporcionales a las frecuencias. Si los intervalos de clase tienen el mismo ancho, entonces las alturas de los rectángulos trazados en los histogramas son proporcionales a las frecuencias.

Si los intervalos de clase son de anchuras diferentes, entonces se acostumbra trazar rectángulos cuyas áreas sean proporcionales a las frecuencias. Sin embargo, la interpretación de los histogramas se facilita cuando los intervalos de clase tienen la misma anchura.

En general, si los datos son simétricos, como en la figura 3.3b, entonces la media y la mediana coinciden. Si además, los datos tienen una sola moda (se dice entonces que los datos son unimodales entonces la media y la mediana coinciden. Si además los datos están sesgados (son asimétricos, con una cola larga a uno de los lados, como en las figuras 3.3 a y 3.3 c entonces la media, la mediana y la moda coinciden. Por lo general se encuentra que la moda < mediana <, si la distribución está sesgada a la derecha, en tanto que moda > mediana > media, si la distribución está sesgada a la izquierda.

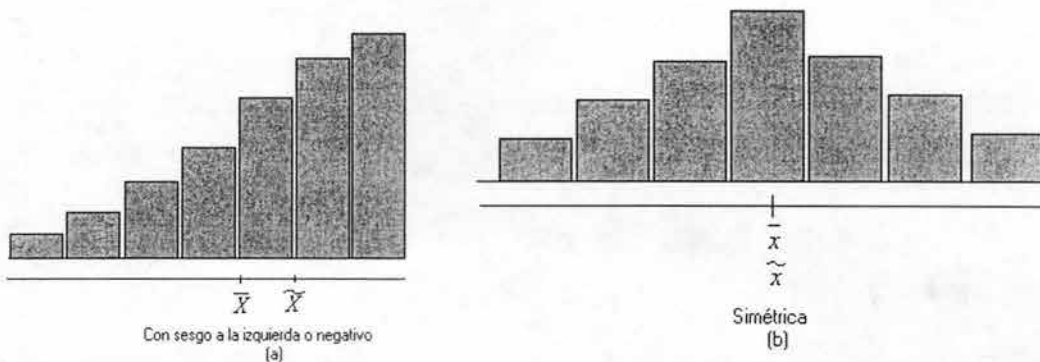




Figura 3.3 Histogramas de distribuciones simétricas y sesgadas

3.6 Medidas de tendencia central

3.6.1 Moda

La moda de un conjunto de números se define como el valor que aparece con mayor frecuencia (positiva).

3.6.2 Mediana

Se define como el valor central, o sea, el valor que está en el medio.

3.6.3 Media aritmética

La media aritmética, también llamada promedio o valor o valor medio o media, es la medida de centralización más común, si los valores de la muestra son x_1, x_2, \dots, x_n entonces la media aritmética \bar{x} de la muestra se define como la suma de los valores de la muestra dividida entre el tamaño n de la muestra esto es como se muestra en la ecuación 3.9:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots 3.9$$

La media muestral es el valor promedio de todas las observaciones del conjunto de datos, por lo general estos datos son una muestra de observaciones que se ha seleccionado de una población de observaciones más grande.

Cuando hay un número finito de observaciones (digamos N) en la población, entonces la media poblacional es como se muestra en la ecuación 3.10:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \dots\dots\dots 3.10$$

3.6.4 RELACIÓN ENTRE LA MEDIA, MODA Y LA MEDIANA

Las distintas medidas de centralización tienen ventajas y desventajas una con respecto a las otras, dependiendo de la forma en que se están distribuidos los datos y el propósito de la información que se obtenga. El único caso en que se puede asegurar que las tres medidas coinciden es cuando la moda existe y es única, y además, los valores de la muestra están distribuidos simétricamente alrededor de un punto, como se muestra en la figura 3.4a, en la figura 3.4b, se muestra que, aún si la distribución es simétrica alrededor de un punto, las medidas de centralización pueden ser distintas. La situación más común, cuando la distribución de valores de la muestra es asimétrica, se muestra en la figura 4c.

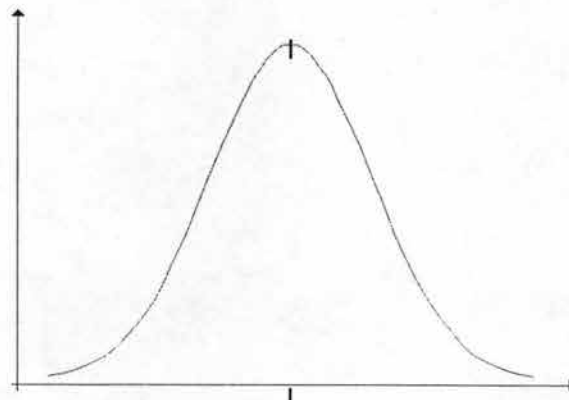


Figura 3.4a Media = Moda = Mediana

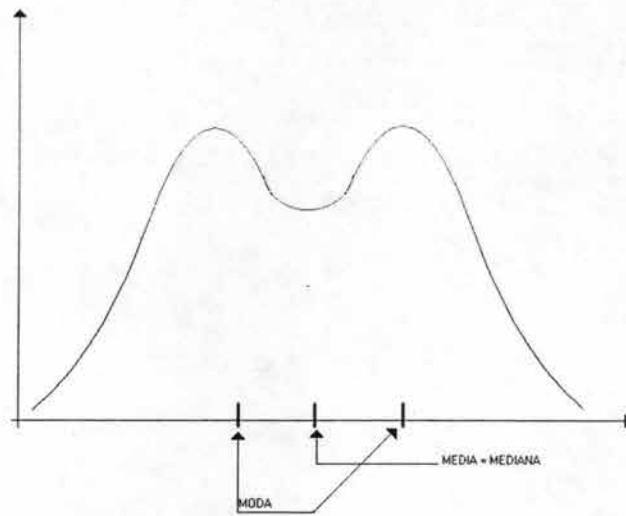


Figura 3.4.b Muestra simétrica bimodal

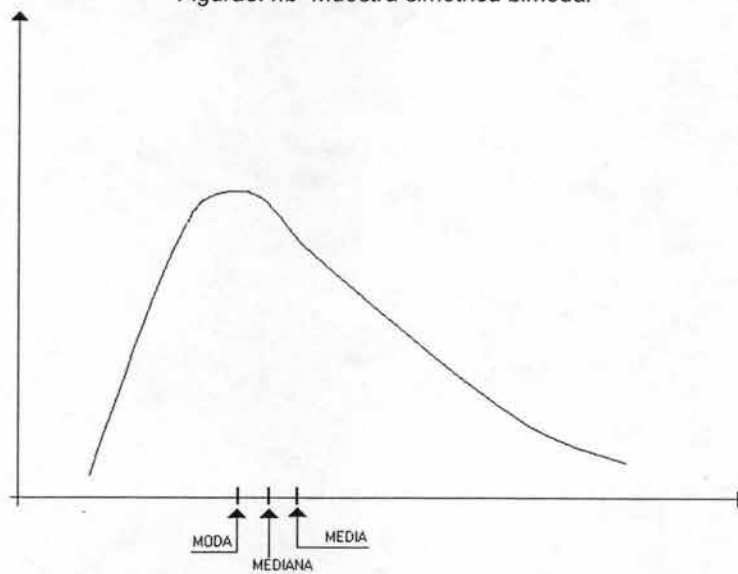


Figura 3.4c. Moda < Mediana < Media

3.7 Medidas de dispersión

Hasta el momento hemos estudiado los valores centrales como se representó en las figuras 3.4b y 3.4c pero también es importante conocer si los valores en general están cerca o alejados de estos valores centrales, es por lo que surge la necesidad de estudiar medidas de dispersión.

3.7.1 Rango

Se define como la diferencia existente entre el valor mayor y el menor de la distribución. Realmente no es una medida muy significativa a la mayoría de los casos, pero indudablemente es muy fácil de calcular.

3.7.2 Desviación mediana

El criterio que guía esta estadística, radica en el uso de diferencias de cada dato respecto a la media muestral m .

Si estas diferencias son muy grandes, entonces estamos ante un caso de gran variabilidad, y si son pequeñas se espera que la variabilidad sea pequeña.

Naturalmente que el criterio que aparece más apropiado es agrupar las discrepancias individuales y tratarlas en conjunto.

Un agrupamiento natural sería una suma de ellas, pero el sólo uso de las diferencias no garantiza que se pueda medir discrepancias porque algunas (prácticamente la mitad) serán menores que la mediana, con diferencias negativas, y el resto mayores que la mediana, con diferencias positivas, y al sumar dichos valores habría compensaciones entre valores negativos y positivos.

Por lo tanto una salida a esta dificultad es considerar el valor absoluto de las diferencias calculadas y promediarlos:

Esto conduce a la definición siguiente:

Dado un conjunto de datos, x_1, x_2, \dots, x_n su desviación mediana **d.m.** está definida por la siguiente ecuación:

$$d.m. = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - m| \dots\dots\dots 3.11$$

Donde m representa la mediana de datos.

Puede verse entonces que, cuanto mayor sea la dispersión existente entre los datos, tanto mayor tenderá a ser el promedio del valor absoluto de las diferencias de los datos, respecto de la media muestral.

3.7.3 Varianza

Dado un conjunto de datos, una forma de medir su variabilidad consiste en calcular las diferencias de cada dato respecto del centro de los datos representando por su promedio. Como las diferencias tienen signos negativos o positivos, según el dato sea menor o mayor que el promedio, la simple suma de las diferencias no sirve por los valores se compensan ver ecuación 3.12.

Tanto así, que la suma de estas diferencias es siempre cero.

Esta propiedad de la suma de diferencias respecto al promedio puede ser demostrada sin grandes dificultades.

Para calcular la estadística denominada “varianza muestral” se elevan al cuadrado las diferencias mencionadas y se les calcula el promedio. De esta forma, se reúnen aditivamente todos los efectos relativos a cada observación.

De manera más formal podemos decir que si x_1, x_2, \dots, x_n son n observaciones, su varianza muestral está dada por:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \dots\dots\dots 3.12$$

3.7.4 Desviación estándar muestral.

La varianza muestral está medida en el cuadrado de las unidades observadas al hacer las mediciones contenidas en la muestra. Para devolverse a una estadística que use las mismas unidades que las observaciones, es necesario calcular su raíz cuadrada ver ecuación 3.13.

Lo anterior conduce a la definición de la estadística denominada “desviación estándar muestral” que no es otra cosa que la raíz cuadrada de la varianza.

Para una muestra de tamaño x_1, \dots, x_n , se tiene que:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \dots\dots\dots 3.13$$

El uso de esta estadística es recomendado en aquellos conjuntos de datos que ofrecen cierto grado de simetría respecto de su centro. En estos casos, habitualmente tiene sentido medir discrepancias de un valor con el centro de los datos usando múltiplos de la desviación estándar.

A modo de ejemplo, se puede decir que un valor está bastante alejado del centro de los datos si su distancia de él supera dos desviaciones estándar.

Apoyándose en la idea anterior, la desviación estándar puede ser usada para determinar valores que se encuentran cerca del centro. Este uso va más allá de la simple descripción, en otros ámbitos de Estadística es usada para tomar decisiones respecto de la población de la que fue extraída la muestra.

3.7.5 Coeficiente de variación

Es un estadístico de dispersión que tiene la ventaja de que no lleva asociada ninguna unidad ver ecuación 3.14, por lo que nos permitirá decir entre dos muestras, cual es la que presenta mayor dispersión:

$$C.V. = \frac{\sigma_v}{x} 100\% \dots\dots\dots 3.14$$

3.8 Distribución Normal

Sin lugar a dudas, el modelo de uso mas generalizado para la distribución de una variable aleatoria es la distribución normal, un resultado fundamental, conocido en el teorema del límite central implica que los histogramas con frecuencia tiene esta forma característica, al menos aproximadamente.

Siempre que se hace la repetición de un experimento aleatorio, la variable aleatoria que es igual al resultado promedio (o total) en las repeticiones tiende a tener una distribución normal, cuando el número de repeticiones es grande.

De Moivre presentó este resultado en 1733 desafortunadamente su trabajo estuvo perdido durante algún tiempo, y Gauss desarrolló de manera independiente la distribución normal casi 100 años después. Aun cuando posteriormente se le dio el crédito De Moivre por la deducción, una distribución normal se conoce como distribución de Gauss o Gaussiana.

Las variables aleatorias con medias y varianzas diferentes pueden modelarse por medio de las funciones de densidad de probabilidad normal, con la elección adecuada del centro y la anchura de la curva como se muestra en la figura 3.15. El valor de $E(x) = \mu$ determina el centro de la función de densidad de probabilidad y el valor de $V(x) = \sigma^2$ determina la anchura en la figura 3.5 se ilustran varias funciones de densidad de probabilidad normal con valores escogidos de μ y σ^2 . Todas tienen la característica curva en forma de campana, pero el centro y la dispersión varían en la siguiente definición se da la fórmula para las funciones de densidad de probabilidad normal.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \text{ para } -\infty < x < \infty \dots\dots\dots 3.15$$

Tiene una distribución normal con parámetros μ , donde $-\infty < \mu < \infty$ y $\sigma > 0$ además,

$$E(X) = \mu \text{ y } V(X) = \sigma^2$$

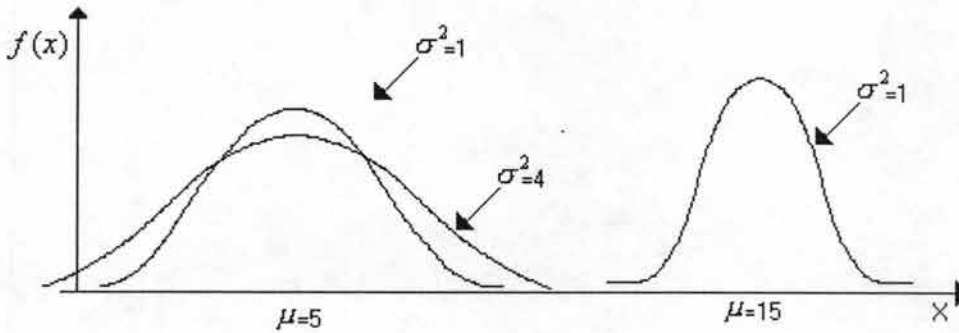


Figura 3.5 Funciones de densidad de probabilidad normal para valores escogidos de los parámetros μ y σ^2

Definición una variable aleatoria normal con $\mu = 0$ y $\sigma^2 = 1$ se le llama variable aleatoria normal estándar. Una variable aleatoria normal estándar se denota como Z.

Si X es una variable aleatoria normal con $V(X) = \sigma^2$ entonces la variable aleatoria es la siguiente ecuación 3.16:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \dots\dots\dots 3.16$$

es una variable aleatoria normal con $E(Z)$ y $V(Z)=1$ es decir, Z es una variable aleatoria normal estándar.

Supóngase que X es una variable aleatoria normal con media μ y varianza

$$\sigma^2 \text{ entonces } P(X \leq x) = P\left(\frac{X - \mu}{\sigma} \leq \frac{x - \mu}{\sigma}\right) = P(Z \leq z)$$

Donde:

Z es una variable aleatoria normal estándar, y

$z = (x - \mu) / \sigma$ Es el valor z que se obtiene al estandarizar x

3.9 Inferencia estadística

El campo de la inferencia estadística se compone de los métodos que se utilizan para tomar decisiones o sacar conclusiones acerca de una población. Estos métodos emplean la información contenida en una muestra de la población para sacar conclusiones ver figura 10 donde se muestra la relación entre una población y una muestra de la población para sacar conclusiones,(ver figura 3.6),donde se muestra la relación entre una población y una muestra.

La inferencia estadística puede dividirse en dos áreas principales: estimación de parámetros y prueba de hipótesis.

Muestreo aleatorio

En la mayoría de los problemas de estadística es necesario usar una muestra de las observaciones de la población de interés para sacar conclusiones acerca de la población.

Población consiste en la totalidad de las observaciones, en cualquier problema particular la población puede ser pequeña, grande pero finita, o infinita. Al número de observaciones que hay en la población se le llama el tamaño de la población.

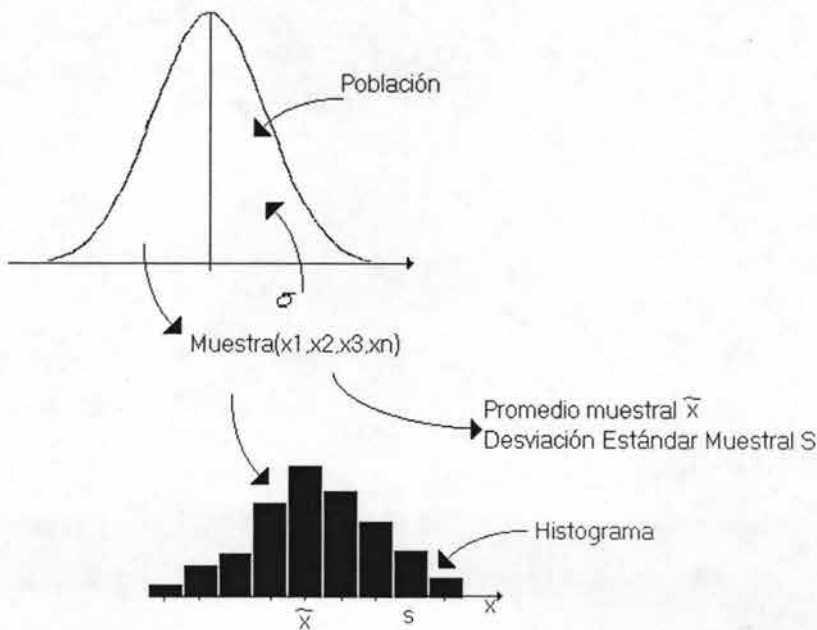


Figura 5 relación entre población y muestra

En primer lugar, la información que se obtiene de una población a partir de una muestra se basa en criterios probabilísticos. Consecuentemente, las muestras se deben seleccionar en tal forma que las reglas de probabilidad sean aplicables.

Para que esto se cumpla, el muestreo debe ser aleatorio. Esto significa que el muestreo debe satisfacer las siguientes condiciones:

- Cada individuo en la población debe tener una probabilidad conocida de ser seleccionado, el caso más simple y más común es cuando dicha probabilidad es la misma para cada uno de los individuos o los elementos de la población.
- La muestra debe ser independientemente; es decir cada selección debe ser independiente de las demás, cuando se realiza un muestreo que satisface estas condiciones, se dice entonces que la muestra obtenida es una muestra aleatoria. En lo que sigue, para abreviar un poco, eliminaremos el adjetivo aleatorio y supondremos que el muestreo realizado y la muestra obtenida siempre son aleatorios.

El muestreo se puede dividir esencialmente en dos tipos en el muestreo con reemplazamiento, como su nombre lo sugiere, cada individuo muestreado se reincorpora a la población antes de tomar el siguiente elemento, luego un mismo elemento puede aparecer más de una vez en la muestra. También se puede ver que en este tipo de muestreo, el tamaño de la población permanece constante. Por otra parte en el muestreo sin reemplazamiento, un individuo muestreado se reincorpora a la población, y así, un mismo elemento no puede aparecer más de una vez en la muestra.

Es necesario hacer esta diferencia entre los dos tipos de muestreo para que se pueda afirmar la condición de independencia, en el muestreo con reemplazamiento, las probabilidades de selección de cada uno de los elementos de la población son las mismas, y por lo tanto, la probabilidad condicional de seleccionar un segundo valor x_2 , dado que el primer valor seleccionado fue x_1 , es igual a la probabilidad no condicional de seleccionar a x_2 , pero el muestreo es sin reemplazamiento, esas probabilidades no son iguales porque x_2 , se está seleccionando de una población modificada a saber la población original menos x_1 .

3.10 Pruebas de hipótesis

Hipótesis estadística

En muchas ocasiones la razón principal para recolectar y analizar un conjunto de datos es la necesidad de tener una cierta ayuda para tomar una decisión. Supóngase que existen dos decisiones posibles A ó B y, aún más, que se sabría claramente cual de dichas decisiones es la mejor si y sólo si se conociese la naturaleza de una sola población, esto es, si conociésemos las distribuciones de probabilidad de una cierta variable aleatoria. Por otra parte, el conocer la naturaleza de la totalidad de una población o la forma precisa de su distribución de probabilidad, es generalmente imposible y consecuentemente debe adquirirse tal información a partir de una muestra y realizar la elección entre las decisiones A y B basándose en la información proporcionada por la muestra.

Para intentar alcanzar una decisión es de utilidad formular hipótesis acerca de las poblaciones involucradas. Tales hipótesis, que pueden ser verdaderas o falsas, se llaman hipótesis estadísticas y en general son suposiciones acerca de la distribución de probabilidad de la población.

En un sentido más general, la inferencia estadística es un tipo especial de formulación de decisiones basado en la probabilidad. En un sentido más restringido, una buena parte de inferencias o decisiones hechas por los estadísticos caen en las dos categorías siguientes:

- a) Estimar los parámetros o algunas otras características de la distribución de probabilidad elegida como modelo.
- b) Probar algunas hipótesis acerca de la distribución de probabilidad. Antes dicha.

Puesto que la variedad de las hipótesis que aparecen en la práctica es muy grande se necesita establecer una definición suficientemente general de lo que constituye una hipótesis estadística.

Definición.- una hipótesis estadística es una suposición acerca de una distribución de probabilidad de una variable aleatoria.

3.10.1 Hipótesis admisibles

Es común en ciertas consideraciones a priori sugieran que todas las hipótesis que puedan concebirse respecto a una situación dada puedan ser admitidas y, aún más, algunas de ellas pueden resultar ridículas. Todas aquellas hipótesis que se consideran posibles se denominan hipótesis admisibles.

Definición.- si una hipótesis especifica los valores de todos los parámetros de una distribución de probabilidad se llama una hipótesis simple, en caso contrario, se dice que la hipótesis está compuesta.

Así, la suposición de que la variable aleatoria x está normalmente distribuida con media 0 y varianza 1 es una hipótesis simple respecto a (x) , ya que esta información permite describir la distribución de probabilidad de la variable aleatoria (x) . Por otra parte la suposición de que (x) está normalmente distribuida con media cero, es una hipótesis compuesta ya que la distribución de probabilidad no está completamente definida si no se conoce la varianza (x) .

3.10.2 Hipótesis simples

Hipótesis bajo prueba e hipótesis alterna.- supóngase que es necesario elegir entre dos decisiones A y B y que se ha decidido que clase de poblaciones harían preferir a la decisión A y cuales a la B. Es posible pensar que el conjunto de todas las hipótesis admisibles puedan agruparse en la forma que sigue:

H_0 : conjunto de todas las hipótesis simples que, de verificarse, harían que A fuese la mejor decisión.

H_1 : conjunto de todas las hipótesis simples que de verificarse, harían que B fuese la mejor decisión.

Se dirá que la hipótesis H_0 (H_1) es verdadera si la población está correctamente descrita por alguna de las hipótesis simples que constituyen el conjunto H_0 (H_1).

Generalmente se dice que H_0 es la hipótesis bajo prueba o la hipótesis bajo probaba y que H_1 es la hipótesis alterna.

Pruebas de significación, región, de rechazo.- A los procedimientos que permiten decidir cuando aceptar o rechazar una hipótesis, o determinar cuando los resultados esperados, se les llama pruebas de hipótesis, pruebas de significación o reglas de decisión.

Definición.- Se llama región crítica de una prueba de hipótesis a aquella parte del espacio de muestras en donde se rechaza a la hipótesis probada.

La región crítica que caracteriza a esta prueba de hipótesis está dada por la desigualdad:

$$|\bar{x} - 0.35| \leq 0.007$$

Tipos de error, principio fundamental, nivel de significación.- Es posible que se tome equivocadamente alguna de las dos decisiones siguientes:

- I. Rechazar la hipótesis H_0 cuando en realidad es verdadera.
- II. Aceptar H_0 cuando en realidad la hipótesis es falsa.

Una prueba estadística está sujeta a errores de los tipos anteriores que se llaman error tipo I y II respectivamente. Esta terminología es absolutamente arbitraria y nos significa que los errores de tipo I sean más importantes que los de tipo II.

Con el objeto de que una prueba de hipótesis sea buena debe diseñarse en forma tal que se minimicen los errores de decisión. Este objeto no se alcanza fácilmente para un tamaño dado de muestra, ya que un intento de disminuir a uno a los tipos de error generalmente es acompañado por un aumento en el restante. Sin embargo, se acostumbra aceptar el siguiente principio que permite determinar reglas de decisión satisfactorias.

Principio fundamental.- entre todas las pruebas que posean la misma magnitud de error de tipo I, elijase aquella que proporcione el error de tipo II mas pequeño.

Se llama nivel de significación de una prueba estadística a la máxima probabilidad de aparición de un error de tipo I que se esta dispuesto a aceptar.

Dicha probabilidad generalmente se representa con la letra α y se especifica antes de extraer ninguna muestra para que los resultados obtenidos no influyan en la elección.

Si por ejemplo, al diseñar una prueba de hipótesis se elige un nivel de significación del 5%, existen aproximadamente 5 posibilidades en 100 de que se rechace la hipótesis cuando debía ser aceptada, esto es, se tiene el 95 % de confianza en tomar la decisión correcta. En tal caso se dice que la hipótesis ha sido aceptada (rechazada) al 5% del nivel de significación lo cual quiere decir que la probabilidad de estar equivocado es aproximadamente igual a 0.05.

Pruebas que involucran a la distribución normal. Para ilustrar las ideas anteriores supóngase que bajo cierta hipótesis la distribución de la características S (media, varianza, etc.) de la muestra sea una normal con media μ y desviación estándar

σ entonces la distribución de la variable $Z = \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)$ es normal estandarizada como se muestra en la figura 6

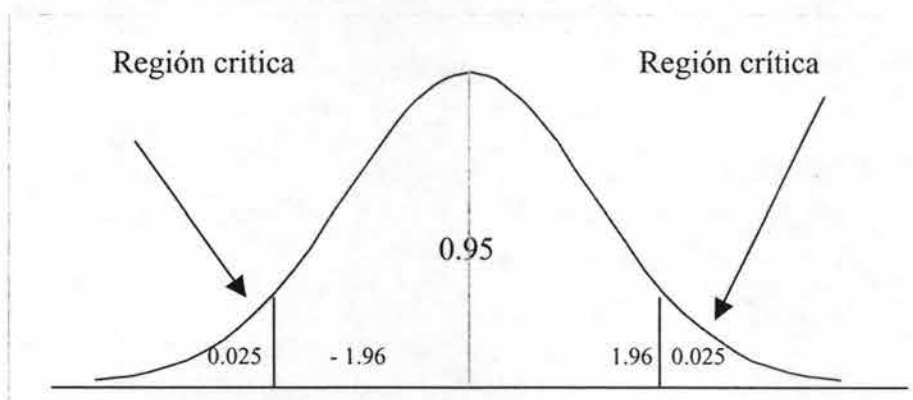


Figura 6

Como se indica en dicha figura se tiene el 95% de confianza en que si la hipótesis es verdadera entonces la relación Z para valor particular de S caerá entre -1.96 y 1.96 .

Sin embargo, al extraer una muestra aleatoria se encuentra que el valor de z correspondiente a S cae fuera del intervalo $(-1.96, 1.96)$, se concluirá que, si en efecto la hipótesis fuese verdadera, tal evento podría ocurrir con una probabilidad de solamente 0.05 se podría entonces decir que el valor de Z difiere significativamente del valor esperado en base a la hipótesis y se pensaría en rechazarla.

Se dice entonces que la hipótesis se rechaza con el nivel de significación del 5% y que el conjunto de valores de Z que caen fuera del intervalo $(-1.96, 1.96)$ es la región crítica o región de rechazo de la hipótesis probada.

De acuerdo con los párrafos anteriores se pueden formular la siguiente regla de decisión:

- a) Rechazar la hipótesis, con un 5% de nivel de significación, si el valor de Z correspondiente a la característica S cae fuera del intervalo $(-1.96, 1.96)$.
- b) Aceptar la hipótesis en cualquier otro caso.

Cabe hacer notar que pueden utilizarse otros niveles de significación distintos del 5%, así por ejemplo, si se desea utilizar un nivel de significación del 1% bastaría reemplazar a 1.96 por 2.58.

En la prueba antes descrita había interés en valores de las características S o su correspondiente Z en ambos lados de la media esto es, en ambos extremos de la distribución por esta razón a estas pruebas se les llama pruebas de dos extremos.

A menudo pueden interesar solamente los valores extremos a un lado de la media como acontece cuando se desea probar si un proceso es mejor que otro. Tales pruebas se llaman pruebas de un extremo y en tal caso la región crítica es una región a un lado de la distribución y cuya área es igual al nivel de significación.

4.0 La prueba de ji cuadrada

Como se ha visto, los resultados obtenidos en una muestra generalmente no coinciden con los resultados esperados en función de la teoría de la probabilidad.

Supóngase que en una muestra particular se observa un conjunto de eventos posibles $E_1, E_2, E_3, E_4, \dots, E_k$ cuyas frecuencias de ocurrencia respectivas $O_1, O_2, O_3, \dots, O_k$ se llamarán frecuencias observadas y que de acuerdo con las reglas de probabilidad debía esperarse que dichos eventos ocurriesen con las frecuencias e_1, e_2, \dots, e_k que se llamarán frecuencias teóricas o esperadas como se muestra en la tabla 3.2.

Eventos	E_1	E_2	E_3	E_k
Frecuencias observadas	O_1	O_2	O_3	O_k
Frecuencias esperadas	e_1	e_2	e_3	e_k

Tabla 3.2

Un problema frecuente consiste en investigar si las frecuencias observadas difieren significativamente de las esperadas. Para el caso en que solo existen dos eventos posibles E_1 y E_2 .

Ajustes a distribuciones teóricas y pruebas de bondad del ajuste.- Cuando mediante algún razonamiento probabilístico o de otra índole se tiene alguna indicación acerca de la distribución de probabilidad de una población a menudo es posible ajustar dicha distribución teórica a la distribución empírica obtenida de una muestra extraída de la población ecuación 3.17.

Así por ejemplo si se tienen razones para creer que un conjunto de datos representa una muestra extraída de una población normal entonces la curva normal que se ajusta a dicha distribución empírica servirá como una aproximación a la curva normal de la población. Puesto que dicho tipo de distribución está determinado por su media y su desviación estándar y como estas cantidades puede estimarse cuidadosamente si la muestra es grande, resulta en este caso que se puede tener confianza en que la curva normal ajustada a la distribución empírica represente mejor a la población que el histograma obtenido de la muestra.

Entonces resulta que para ajustar la distribución de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\bar{x}-\mu}{3.04}\right)^2} \dots\dots\dots 3.17$$

Evidentemente el área bajo la curva es unitaria y consecuentemente deberá multiplicarse por el área total del histograma para lograr el ajuste, sin embargo, se acostumbra utilizar porcentajes de área en lugar del área total.

Entonces resulta que para cada valor x_j corresponde un valor ecuación 3.18:

$$Z_j = \frac{x_j - \bar{x}}{\sigma} \dots\dots\dots 3.18$$

tal que el porcentaje del área bajo la curva y a la izquierda de la recta $x = x_j$ es igual al porcentaje de área a la izquierda de la recta $z = z_j$ y bajo la curva normal estándar ecuación 3.19:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \dots\dots\dots 3.19$$

y los valores de estas áreas se leen directamente en las tablas de la distribución normal estándar.

De esta manera si se desea encontrar el área ΔA_j del intervalo a la izquierda de $z = z_j$ bastará aplicar la expresión.

$$\Delta A_j = A_j - A_{j-1}$$

y la frecuencia esperada e_j en dicho intervalo estará dada por:

$$e_j = n\Delta A_j$$

En donde n es el tamaño de la muestra.

Antes de proceder a comparar las frecuencias esperadas y las observadas columnas 6 y 7 de la tabla 3.3 cabe notar que se agruparon los tres primeros intervalos y los dos últimos. Lo anterior tiene por objeto lograr que las frecuencias esperadas cumplan con la condición $e_j \geq 5$ y $k > 5$ observándose que una vez efectuada dicha agrupación también se cumple que $k > 5$ y consecuentemente puede aplicarse la prueba ji cuadrada

para ello se procede a calcular el valor $\frac{(o_j - e_j)^2}{e_j}$ para cada j según se muestra en la columna de la tabla 3.2

j	Limites de clase x_j	$z_j = \frac{x_j - \bar{x}}{\sigma}$	Área A_z a la izquierda De Z_j	Área ΔA_j del intervalo de la izquierda de z_j $\Delta A_j = A_j - A_{j-1}$	Frecuencia esperada $e_j = n\Delta A_j$ ($n = 60$)	Frecuencia observada o_j	$\frac{(o_j - e_j)^2}{e_j}$
.....

Tabla 3.3

De esta manera se obtiene:

$$\chi^2 = \sum (O_j - e_j)^2 / e_j$$

Según puede verificarse al sumar los valores consignados en la última columna de la tabla anterior.

Observaciones.- antes de estudiar otras aplicaciones de la prueba χ^2 es conveniente hacer notar lo siguiente:

- Según ya se ha mencionado el uso de la prueba χ^2 requiere de las frecuencias esperadas en cualquier intervalo de clase no sea menor que 5 generalmente esta condición puede alcanzarse combinando las frecuencias de intervalos adyacentes. La frecuencia combinada se tratará como perteneciente a un solo intervalo y en consecuencia se reducirán los grados de libertad en que se basa la prueba.
- La prueba solo es aplicable a comparaciones de valores observados y esperados de frecuencias absolutas y por lo tanto no debe usarse para comparar valores observados de una variable con aquellos calculados en base a algún criterio de predicción. Tampoco puede usarse para comparar valores observados y esperados de frecuencias relativas.

4

GEOSTADÍSTICA CONCEPTOS Y APLICACIONES

4.1 Problema que dio origen a la Geoestadística.

La revolución científico - técnica, que desde décadas ha abarcado todo el mundo, se manifiesta en un aumento brusco del ritmo de extracción y utilización de la materia prima mineral, para lo cual los trabajos de búsqueda, exploración y evaluación Geólogo-Económica de yacimientos minerales útiles, constituye una de las tareas más importantes en las Empresas Geólogo-Mineras.

Esta actividad, se desarrolla a través de varias etapas, división que es el resultado de la aplicación de un principio importante en el estudio del subsuelo, el Principio de Aproximaciones Sucesivas, el cual consiste en estudiar primero las regularidades geológicas más generales e importantes del objeto, y sólo después, comenzar una investigación detallada de sus propiedades.

Cada uno de las etapas de búsqueda y la exploración, finaliza con el cálculo de reservas, es decir, el conocimiento lo más aproximado posible de las reservas minerales útiles de un yacimiento, operación de alta responsabilidad, que determina en gran medida el valor industrial de un yacimiento mineral.

Este cálculo, puede ser realizado por métodos clásicos o modernos; en el primero, se utilizan fundamentalmente valores medios o medias ponderadas para la estimación de bloques definidos convenientemente, los cuales son eficientes cuando la información disponible presenta determinada regularidad pero en la práctica hay una gran diversidad de formas en que se presentan los datos que ha llevado a la utilización de técnicas matemáticas y estadísticas para resolver un único problema, **estimar valores desconocidos, a partir de los conocidos**, por lo que su uso ha estado relacionado con problemas de precisión, además de que la información, frecuentemente presenta irregularidades.

En el segundo, se utilizan la modelación matemática y la Geoestadística; en esta última, se usan técnicas de regresión y correlación, siendo resultado de la aplicación de la teoría de funciones aleatorias al reconocimientos y estimación de fenómenos naturales [Journel y Huijbregts,1978], fundamentalmente en el campo minero.

Campo por el que surge, se desarrolla y consolida en los últimos 30 años como ciencia aplicada y que da respuesta a necesidades prácticas y concretas.

Nuestro objetivo será discutir los métodos más eficientes que proporcionen la mayor información de los resultados posibles, es decir los modernos, de los que se pueden citar entre los Geomatemáticos: El inverso de la distancia, mínimo de curvatura, etc. Aún más, buscando el mejor estimador que minimice la varianza del error de estimación surge la Geoestadística por los trabajos de G. Matheron, en la escuela de minas en París.

4.2 Dominios y aplicaciones actuales.

En la actualidad los dominios de aplicación de la Geoestadística son amplios, sin hacer referencia directamente a la minería que es el campo que le dio origen, se pueden mencionar: el petróleo, en la caracterización de reservas, en la simulación condicional de variables petrofísicas, en el uso de la sísmica en las estimaciones. En la pesca, en la estimación de provisiones de peces, de variables condicionantes, profundidad, temperatura del agua. En la geofísica marina, en los problemas de filtrar perturbaciones temporales que mezclan el magnetismo espacial, en las características de su cartografía. La Salud: en la distribución espacial de enfermedades, en la exposición de individuos a diversos ruidos. La ingeniería civil, en la construcción de obras de grandes dimensiones, que exigen del conocimiento de la variabilidad espacial de propiedades del terreno. Las finanzas, en la relación entre el análisis técnico con el análisis económico. Los materiales, en la previsión de propiedades físicas de los materiales. En la cartografía, la hidrogeología, el medio ambiente, los campos forestales, el análisis de imágenes, la elección de la red de muestreo.

4.2.1 Geoestadística

La Geoestadística se define como la aplicación de la Teoría de Funciones Aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales, o simplemente al estudio de las variables numéricas distribuidas e el espacio, siendo una herramienta útil en el estudio de estas variables. Su punto de partida es que tiene una intuición topo- probabilista, los fenómenos distribuidos en el espacio: la mineralización por ejemplo, presenta un carácter mixto, un comportamiento caótico o aleatorio a nivel local, pero a la vez estructural a gran escala, de donde se puede sugerir la idea de interpretar este fenómeno en términos de función aleatoria (FA), es decir, a cada punto x del espacio se le asocia una variable aleatoria (VA) $Z(x)$, para dos puntos diferentes x e y , se tendrán dos Vas $Z(x)$ y $Z(y)$ diferentes pero no independientes, y es precisamente su grado de correlación el encargado de reflejar la continuidad de la mineralización, o de cualquier otro fenómeno en estudio, de modo que su éxito está en la determinación de la función de correlación espacial de los datos. Su estimador, El Kriging tiene como objetivo encontrar el mejor estimador lineal insesgado a partir de la información disponible, y en efecto, el valor estimado obtenido $Z^*(x)$ de un valor real y desconocido $Z(x)$, consiste en

una combinación lineal de pesos asociados a cada localización donde fue muestreado un valor $Z(x_i)$ ($i = 1, \dots, n$) del fenómeno estudiado, observado dos condiciones fundamentales:

1. que el estimador sea insesgado
2. que la varianza $Var[Z^* - Z]$ sea mínima, consiguiéndose de este modo minimizar la varianza de error de estimación a diferencia de otros métodos de interpolación, como por ejemplo el inverso de la distancia, el Kriging utiliza en la estimación las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado, por lo que su uso implica un análisis previo de la información, con el objetivo de definir o extraer de esta información inicial un modelo que represente su continuidad espacial, una vez logrado esto, estamos en condiciones de obtener a través del Kriging el mejor valor posible en cada localización o bloque a estimar, acompañadas de la varianza Kriging como medida del error de la estimación realizada, lo que distingue el Kriging de otros métodos de interpolación.

4.3 Variables aleatorias regionalizadas.

La información inicial para realizar el cálculo de reservas es el resultado del análisis de los testigos de perforación, o muestras de afloramiento, que se obtiene durante los trabajos de exploración, que como una variable aleatoria puede tomar cualquier valor dentro de un rango determinado, todo con una característica fundamental que las distingue, además de su valor, una posición en el espacio.

Es importante aclarar que una variable aleatoria (VA) es una variable que puede tomar ciertos valores de acuerdo a cierta distribución de Probabilidades. Un valor medido es una realización de la VA $Z(x_1)$ definida en el punto x_1 . Al conjunto de todas las mediciones en el área de estudio de la variable regionalizada $Z(X)$ puede considerarse como una realización del conjunto VA $Z(x)$, $x \in$ área de estudio a este conjunto de VA es llamada función Aleatoria y se escribe $Z(x)$ de modo que al extender el concepto de función aleatoria al espacio de una o más dimensiones, aparece la noción de variable aleatoria regionalizada.

4.4 Conceptos de Variable Aleatoria Regionalizada

Es importante aclarar varios conceptos en el estudio de la variable aleatoria regionalizada ya que son los que se aplican a los métodos Geoestadísticos como herramienta fundamental de trabajo.

Estos conceptos son:

Región: se refiere al espacio en el cual existe y se estudia el fenómeno natural.

Localización: Es el punto de una región en la cual se define una variable aleatoria regionalizada.

Soporte Geométrico: Está determinado por el elemento físico sobre el cual se realiza la determinación de la variable aleatoria regionalizada. Esto no es más que la muestra unitaria, sobre la cual estudiaremos el atributo de interés.

Momentos de primer orden: Si la función de distribución de $Z(x_i)$ tiene una media definida, será una función de la localización x_i , $m(x_i) = E\{Z(x_i)\}$

Momentos de segundo orden: Si la varianza (Var) de $Z(x_i)$ existe, entonces se define como el momento de segundo orden y será también una función de la localización x_i

$$\text{var}\{Z(x_i)\} = E\{[Z(x_i) - m(x_i)]^2\}$$

Si la varianza de las variables $Z(x_i)$ y $Z(x_j)$ existe entonces la covarianza (Cov) existe y es función de las localizaciones x_i y x_j .

$$\text{Cov}[Z(x_i), Z(x_j)] = E\{[Z(x_i) - m(x_i)][Z(x_j) - m(x_j)]\}$$

$$\text{si } x_i = x_j, \text{Cov}[Z(x_i), Z(x_j)] = \text{Var}\{Z(x_i)\}$$

La función variograma o función estructural se define como la varianza de la diferencia $Z(x_i) - Z(x_j)$

$$\text{Var}\{Z(x_i) - Z(x_j)\} = 2\gamma(x_i, x_j)$$

Magnitud $\gamma(x_i, x_j) = 1/2 \text{Var}\{Z(x_i) - Z(x_j)\}$ se denomina semivariograma

También se puede definir el correlograma estandarizado la covarianza para los valores $x_i - x_j = h = 0$ como:

$$\rho = \frac{C(h)}{C(0)} \quad -1 \leq \rho \leq 1$$

Donde:

$C(h)$ Es la covarianza a la distancia h

$C(0)$ Es la covarianza en el origen

Existen relaciones entre estas medidas de correlación:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad \text{Con } \gamma(0) = (0)$$

$$\rho(h) = 1 - \frac{\gamma(h)}{C(0)}$$

4.5 Etapas de un estudio Geoestadístico

Las etapas fundamentales de un estudio Geoestadístico son:

1. Conocimiento del problema a resolver
2. Análisis estructural
3. La estimación o simulación
4. El tratamiento de resultados

En la primera etapa, se busca el conocimiento del problema, la estructura geológica en que se desarrolla la mineralización o el fenómeno en estudio, el conocimiento y corrección de la información, su tratamiento estadístico básico.

En la segunda etapa son calculados los variogramas experimentales en distintas direcciones a los que son ajustados posteriormente modelos teóricos, obteniéndose de esta forma las características de variabilidad espacial del fenómeno estudiado.

La tercera es el objetivo básico de la geoestadística, con el cual se puede evaluar al predecir el fenómeno estudiado en todo el dominio, finalmente se realiza de los resultados con su tratamiento adecuado.

De las etapas anteriores merece especial atención, el análisis estructural, por ser el punto de partida de todo estudio Geoestadístico, estudio que tiene como herramienta fundamental al variograma, que representa la herramienta más importante de la Geoestadística, porque aporta información sobre la continuidad de la variable, sobre la presencia de anisotropías, y sobre la existencia de derivas.

4.6 El Análisis Estructural

El Análisis Estructural o estudio variográfico esta compuesto por:

- El cálculo del semivariograma experimental.
- El ajuste a este de un modelo teórico conocido.

Una vez instalados los datos, es necesario que se controlen integralmente a fin de verificar de una parte su exactitud y de otra parte su representatividad, es importante que se esté familiarizado con los datos, discutir todos los elementos necesarios a fin de conocer el problema a resolver.

El calculo del semivariograma experimental es entonces la herramienta geoestadística más importante en la determinación de las características de variabilidad espacial del fenómeno estudiado, es decir, tener conocimiento de cómo la variable cambia de una localización a otra representando la herramienta mas importante de que dispone la

Geoestadística para el análisis del fenómeno mineralizado o de una variable en distribución espacial en estudio.

Teniendo como condiciones: la distribución estadística, la existencia de valores aberrantes o anómalos, la presencia de zonas homogéneas o posibles zonaciones en la distribución de leyes.

Puede ser calculado inicialmente el semivariograma medio o "omnidireccional" proporcionando una idea inicial de la variabilidad espacial de los datos, siendo el más idóneo para representar u obtener una estructura clara y definida. Posteriormente deben ser calculados los semivariogramas en diferentes direcciones, más exactamente, puede ser calculado, en cuatro direcciones separadas 45° , comenzando por 0° (ver figura 4.1a y 4.1b) hasta encontrar la dirección máxima o mínima variabilidad (ver figura 1b).

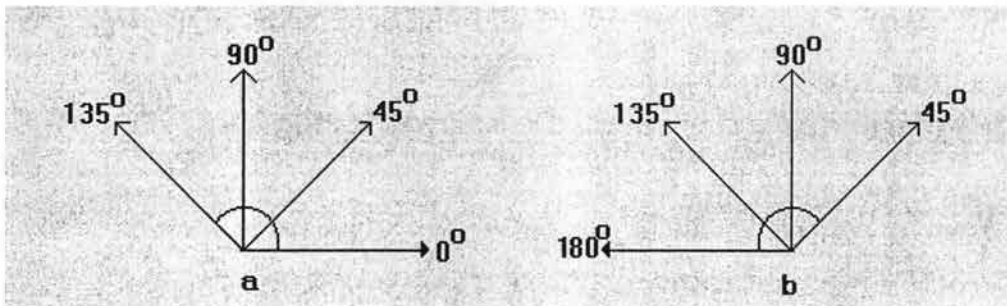


Figura 4.1 Direcciones para el cálculo de los variogramas, a) comenzando en 0° , b) comenzando en 45°

Posteriormente, el semivariograma experimental obtenido no puede ser utilizado en el proceso de estimación, debe ser ajustado a un modelo teórico, esto se debe a que el variograma utilizado en el proceso de estimación o simulación debe satisfacer ciertas condiciones, es decir tiene que ser "definido positivo" o "de tipo positivo", sino puede existir el riesgo de encontrar varianzas negativas que no tienen sentido.

En general el ajuste a modelos teóricos para la determinación de los parámetros del semivariograma se realiza en forma visual. En ocasiones se efectúan ajustes polinomiales por el método de mínimos cuadrados que aunque se encuentra el mejor ajuste, no siempre se verifica la condición de que el variograma obtenido sea siempre de tipo positivo, siendo insatisfactorio, por lo que se recomienda el uso de modelos autorizados. Finalmente debe obtenerse: uno o varios modelos de variogramas con los correspondientes valores de meseta y alcance, el modelo de variograma seleccionado debe representar fielmente los aspectos que se suponen importantes del variograma experimental, que serán usados posteriormente en el proceso de estimación o simulación.

4.7 Conceptos de Estadística Básica Necesarios.

Con el objetivo de conocer la información disponible se ha presentado en el capítulo anterior los conceptos de estadística básica necesarios.

En el caso de gráficos estadísticos es útil usar los gráficos de frecuencia absoluta, relativa, acumulativa. Todos estos elementos permiten decidir las condiciones de estacionaridad vistas anteriormente. Muchos autores coinciden en que los conceptos básicos a tener en cuenta en el análisis de la Estadística Básica son la:

Media, la mediana, los valores máximos, la varianza, la desviación estándar, el coeficiente de variación, la asimetría y la curtosis.

4.8 El semivariograma experimental

Los semivariogramas son estimadores de la varianza poblacional, relacionados con una dirección y una distancia. Básicamente indican cómo varían las dependencias espaciales que existen entre un punto de origen y otro punto que se aleja de éste. En este caso, el punto de origen corresponde a x_0 . Para su determinación, se calcula la variabilidad existente entre todos los pares de puntos que componen la muestra, en función de la distancia y dirección que los separa. En términos matemáticos:

La fórmula señalada permite determinar el variograma empírico. Éste no puede ser utilizado directamente en el sistema de ecuaciones del kriging, dado que no necesariamente describe todas las posibles combinaciones de distancia y dirección (d y θ), por lo que es necesario modelarlo

La función $\gamma(h)$ se denomina semivariograma, el cual puede ser obtenido por la siguiente expresión.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2Np(h)} \sum_{i=1}^{Np(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Donde:

$Np(h)$ Es el número de pares a la distancia h

h Es el incremento

$Z(x_i)$ Son los valores experimentales

x_i Localizaciones donde son medidos los $z(x_i)$

Esta expresión de $\gamma(h)$ representa la herramienta más importante en todo estudio Geoestadístico, su cálculo no consiste en una simple evaluación de su expresión, esta operación está relacionada con los elementos siguientes:

- La dirección en la que será calculado el semivariograma, uno o dos ángulos que definen una dirección en el espacio α y/o β con una tolerancia angular $d\alpha$. El semivariograma calculado usando tolerancia angular de 90° se denomina *semivariograma medio* u *omnidireccional*.

- El incremento o paso en el cálculo del semivariograma h . Y su tolerancia lineal dh el cual se recomienda que sea la mitad del incremento.
- Una distancia que representa la distancia máxima a que pueden estar alejados los segundos puntos del par con respecto a la línea que define la dirección del cálculo.
- La distancia hasta la cual será calculado del semivariograma L , se recomienda que esta distancia sea la mitad de la distancia máxima entre las muestras, aunque dependiendo de la geometría del fenómeno regionalizado en algunos casos es recomendable su cálculo hasta una distancia superior.

Definido los elementos anteriores, se evalúa la expresión del semivariograma para todos los pares de localizaciones separadas a la distancia h que cumplan las siguientes condiciones:

1. La distancia entre las localizaciones x_i y x_{i+h} sea mayor que $h-dh$ y menor que $h+dh$, o lo que es lo mismo el segundo punto del par esté incluido en el espacio definido por $h-dh$ y $h+dh$ encontrándose el primer punto del par en el origen o . figura 4.2.

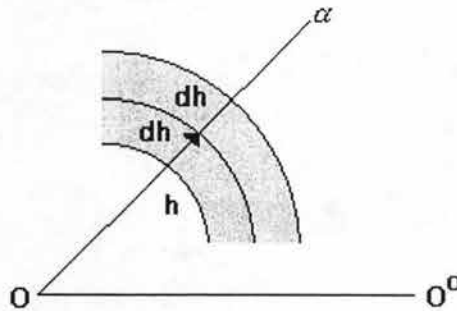


Figura 4.2 Espacio definido por la tolerancia lineal

2. El ángulo formado entre la línea recta que une los dos puntos del par y la dirección 0^0 debe estar incluido entre $\alpha - d\alpha$ y $\alpha + d\alpha$. Figura 4.3.

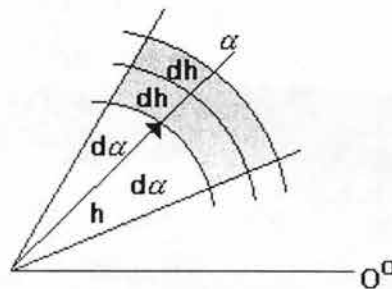


Figura 4.3 Espacio definido por la tolerancia lineal y angular

3. La distancia entre el segundo punto del par y la línea que define la dirección del cálculo del semivariograma no debe superar cierta distancia, denominada ancho de banda. Figura 4.4.

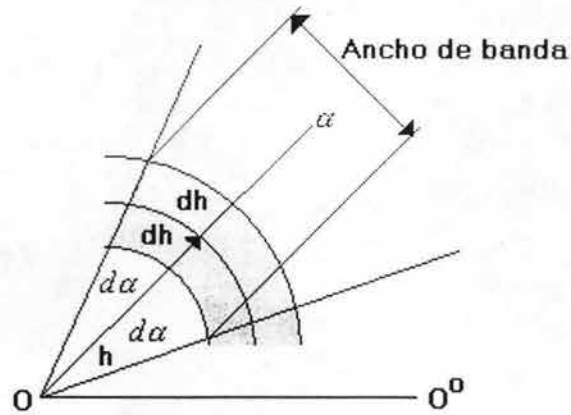
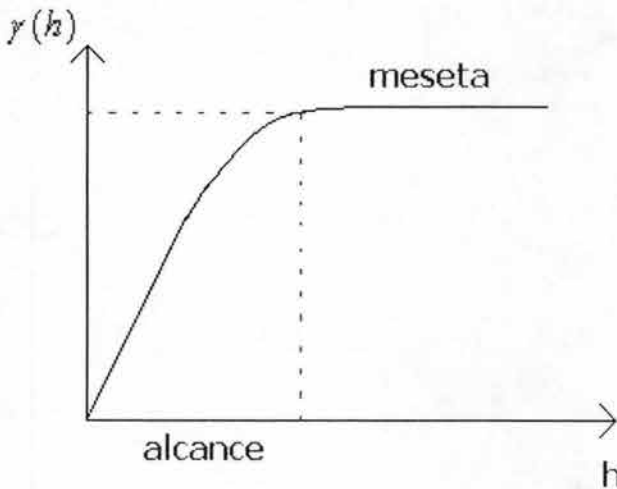


Figura 4.4 Espacio definido por las tolerancias y el ancho de la banda

Finalmente se representan los valores de γ en función de h .
El gráfico de $\gamma(h)$ tiene las siguientes características. Figura 4.5



- Pasa por el origen para $h=0$, $\gamma(h)=0$
- Es en general una función creciente de h .
- En la mayor parte de los casos, crece hasta cierto límite llamado meseta, puede en otros casos crecer indefinidamente.

Figura 4.5 forma típica del variograma

Puede tener diferentes comportamientos en el origen como son, según Armstrong y Carignan y se muestran en la figura 5.6

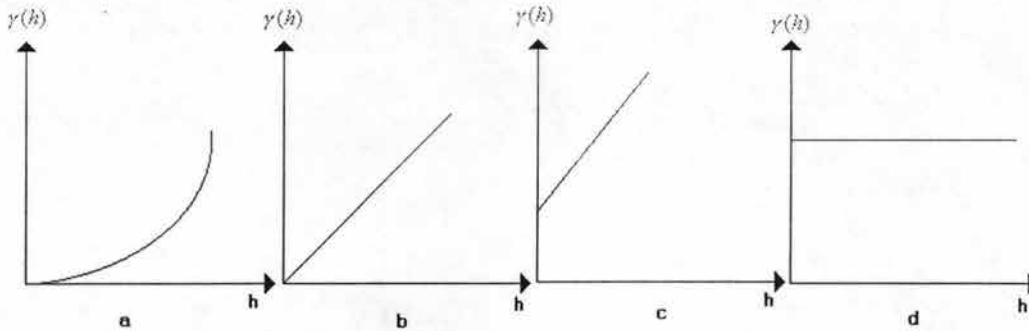


Figura 5.6 Comportamiento del variograma en el origen, a) parabólico, b) Lineal, c) Efecto pepita, discontinuo puro. d)

- a) Parabólico: Caracteriza una variable muy regular, siendo continua y diferenciable.
- b) Lineal: Caracteriza a una variable continua, pero no diferenciable, es decir menos regular
- c) Discontinuidad en el origen: “Efecto Pepita”, es el caso que $\gamma(h)$ no tiende a cero cuando h tiende a cero. Representa una variable muy irregular.
- d) Discontinuo puro: llamado también ruido blanco representa el caso de mayor discontinuidad, siendo el caso límite de ausencia de estructura, donde los valores de dos puntos cualesquiera no tienen correlación alguna.

4.9 Construcción del semivariograma experimental

A continuación se presentan 8 pasos para la construcción del semivariograma.

Sea $Z(x)$ una función aleatoria con n variables aleatorias regionalizadas $Z(x_i)$ donde $x = \{x, y\}$ es la localización y $Z(x_i)$ es el valor medido correspondiente. Dados una dirección a través de un ángulo de α en la cual se desea calcular el semivariograma, $d\alpha$ una tolerancia angular, dh una tolerancia lineal y el ancho de banda.

Se proponen los siguientes pasos:

- 1) Calcular la cantidad de pares posibles por $N_p = N(N-1)/2$
- 2) Para cada par, calcular la distancia entre las localizaciones correspondientes por:

$$d_i = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \quad i = 1, \dots, N_p.$$

Almacenado para cada i:

- P1: Número del primer punto del par
- P2: Número del segundo punto del par
- d: Valor de la distancia
- Angulo α que fija la dirección de la recta que pasa por los puntos del par en dos dimensiones.

- 3) ordenar ascendentemente por la distancia del grupo de datos anteriores.
- 4) Calcular la amplitud máxima del semivariograma L como $D_{\max}/2$, donde D_{\max} es la distancia a que está separadas el par de las localizaciones más lejanos, la máxima distancia calculada en el paso (2), o lo que es lo mismo el último valor después del ordenamiento del paso anterior.
- 5) Fijar una distancia h inicial, para los múltiplos de esta distancia, será calculada $\gamma(h)$ por la expresión (1), se recomienda que esta distancia sea la décima parte de L.
- 6) Calcular la expresión (1) para todos los pares almacenados en el paso (2) que cumplan con las condiciones siguientes:
 - a) Que la distancia d, sea mayor que h-dh y menor que h+dh, es decir $h-dh \leq d \leq h+dh$. Si esta condición se cumple examinar la condición b, de lo contrario continuar con la distancia siguiente

- b) Que el ángulo α' formado entre las líneas que parten del primer punto del par en la dirección positiva, es decir, en contra de las manecillas del reloj, sea mayor que $\alpha - d\alpha$ y menor que, es decir $\alpha' \leq d\alpha + d\alpha$. Si esta condición se cumple examinar la condición c, de lo contrario continuar con la distancia siguiente
- c) Que la distancia entre el segundo punto del par y la línea que pasa por el primer punto en la dirección α no supere el ancho de banda.

Observaciones

- Note que como los datos almacenados en el paso (2) están ordenados ascendentemente por la distancia, este paso se interrumpe como la distancia siguiente sea mayor que $h + dh$, y aquí precisamente comienza la próxima iteración.
 - Al interrumpir este paso calcular (1) con los que cumplieron las condiciones a, b y c, obtenemos el valor de $\gamma(h)$ correspondiente al incremento h actual.
- 7) Incrementar la distancia h en su propio valor, es decir h será el próximo múltiplo de h inicial.

Si el nuevo valor de h no supera el valor de L . Regresar al paso (6) de lo contrario continuar el siguiente paso.

- 8) Al finalizar el paso (7) debemos tener para cada valor transitado por h un valor de $\gamma(h)$ calculado, los cuales será representados en un gráfico $X - Y$ donde la abscisa representa los valores de h y la ordenada los valores de $\gamma(h)$. Obteniendo así el semivariograma empírico.

4.10 Problemas más comunes encontrados en el cálculo de los semivariogramas

Algunos de los problemas más comunes son los siguientes:

El valor idóneo del incremento h : una inadecuada selección de h puede proporcionar un semivariograma errático, aunque no se puede dar un criterio exacto o aproximado sobre cual el mejor valor de h , es recomendable recalcular $\gamma(h)$ para distintos valores de h , hasta encontrar una forma suavizada del mismo.

Distribuciones con valores extremos: la existencia de los valores extremos, altos o bajos, en una distribución, puede conducir a la obtención de un variograma fuertemente errático, en este caso la solución puede ser ocasionados por errores, en otros casos pueden encontrarse en zonas geográficamente distintas, y pueden ser tratados de manera separada.

La existencia de poblaciones mixtas: existen datos que pueden mostrar diferentes poblaciones, los cuales pueden estar estadísticamente diferenciados, en muchos casos las poblaciones están geográficamente diferenciadas, donde se recomienda tratar las zonas separadamente, en otros casos las dos poblaciones se pueden representar mezcladas geográficamente en este caso puede ser una solución un cambio de escala, con lo que se puede lograr reducir la diferencia de los valores extremos.

A continuación se presentan otras razones por los que los semivariogramas son erráticos siendo en este caso más específico:

1. No hay suficientes muestras.
2. Las muestras no son representativas del fenómeno.
3. Las clasificaciones de las muestras no son válidas.
4. El área estudiada es no homogénea.
5. Pequeños o largos conjuntos de datos son necesarios.
6. Pequeñas o largas distancias de deben ser calculadas.
7. Más o menos distancias deben ser calculadas.
8. Pequeñas tolerancias son necesarias.
9. Las muestras pueden tener localizaciones incorrectas.
10. Los valores muestreados pueden ser erróneos.

4.11 Modelado de semivariogramas.

El modelado de semivariogramas consiste en dos etapas fundamentales, una vez construido el semivariograma experimental o empírico es necesario ajustar a este un modelo teórico, con el objetivo de determinar los parámetros descriptivos de los semivariogramas que posteriormente serán usados en la estimación.

Parámetros del semivariograma

Los parámetros del semivariograma caracterizan tres elementos importantes en la variabilidad de un atributo que son: la discontinuidad en el origen (Efecto Pepita), el valor máximo de variabilidad (Meseta), y el área de influencia de la correlación (Alcance) figura 4.6.

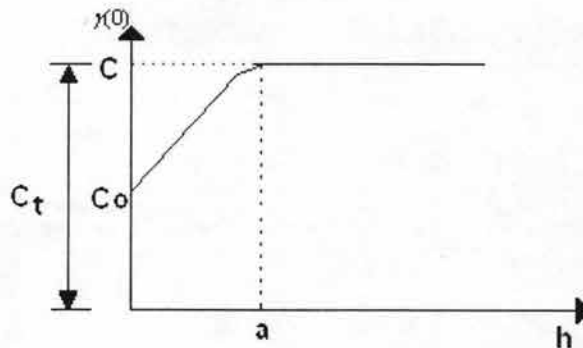


Figura 4.6 Parámetros del semivariograma

El efecto Pepita (nugget): El semivariograma por definición es nulo en el origen, pero en la práctica las funciones obtenidas pueden presentar discontinuidad en el origen, a esta discontinuidad se le llama efecto pepita, en inglés (Nugget effect) y puede ser obtenido trazando una línea recta entre los primeros puntos del semivariograma empírico y extender este hasta que se intercepte con el eje Y. Si esta intersección ocurre por debajo de cero, el valor asumido por este efecto es cero, pues valores negativos de $\gamma(0)$ no tiene significado y no es común. El efecto pepita se representa como C_0 .

La meseta (*Sill*): Es el valor de $\gamma(h)$ para el cual el aumento de h su valor permanece constante, se representa como $(C_T = C + C_0)$ y se denomina meseta. Puede obtenerse trazando una línea paralela a la abscisa y que se ajuste a los puntos de mayor valor del semivariograma, y su valor se puede leer en la intersección de esta línea con la ordenada.

El Alcance (*Range*): La distancia h para la cual las variables $Z(x)$ y $Z(x+h)$ son independientes, se denomina Alcance y se presenta por (a) , es decir las distancias para la cual la variable no está más correlacionada, o lo que es lo mismo, la distancia para la cual el semivariograma alcanza su meseta.

4.12 Modelos teóricos de variogramas.

Los modelos teóricos de variogramas admisibles mas utilizados en la práctica actualmente se presentan en (Journel, A, G. And Huijbregts, C. J., 1978) las dos características importantes en el modelado de variogramas que son según los autores antes mencionados son los siguientes.

1. Su comportamiento en el origen, el cual puede ser lineal, parabólico y con efecto pepita.
2. la presencia o ausencia de meseta , los modelos teóricos pueden ser clasificados en:

Modelos con meseta.

Con comportamiento lineal en el origen

- a) Esférico.
- b) Exponencial.

Con comportamiento parabólico en el origen.

- c) Gaussiano.

Modelos sin meseta

- d) Modelado con exponente.
- e) Logarítmico.

4.13 Aplicación de la Geoestadística a la zona de Ku-Maloob-Zaap

Metodología:

A Continuación se describe la forma de como se interpreto y desarrollo el análisis Geoestadístico esto con la finalidad de observar la variabilidad de los resultados en las campañas geotécnicas realizadas en la zona de Ku- Maloob-Zaap.

- Como primer paso se clasificó adecuadamente toda la información recopilada para revisar las posibles irregularidades que guarden los perfiles de las propiedades índice y mecánicas.
- Como segundo paso realizar el análisis estructural para evaluar la variabilidad espacial que guarden las diferentes propiedades de los materiales encontrados en el medio.
- El resultado de este análisis es la generación de modelos de variación aleatoria en el espacio, las cuales servirán para estimar y eventualmente simular el comportamiento aleatorio de las propiedades en estudio.
- Con los datos recopilados son calculados los variogramas, para posteriormente ajustar a un modelo teórico.
- De todo lo anterior se observa que con la construcción de los semivariogramas se observa como se están comportando los datos, es decir la continuidad de las variables y lo más importante sobre la anisotropía y la existencia de derivas.

TABLA DE REFERENCIAS

A continuación se presenta en la tabla 4.1, la ubicación de los sondeos geotécnicos con coordenadas U.T.M. y la distancia que existe entre ellos.

ZONA	COORDENADAS DE SONDEOS		Distancia Km.
	X	Y	
KU-52	583599	2161207	0
ZAAP -A	578944	2163094	5.02
ZAAP- B	582226	2161840	1.51
ZAAP- C	580147	2163242	4.01
ZAAP-PP-ZB-1A	582345.14	2162493.55	1.80
ZAAP-PP-ZD-1	576595.55	2163042.97	7.24
KU- B1	584014	2166169	4.98
KU- 407-B1	584014	2166169	4.98
KU-407	583824	2165800	4.60
KU-57	586782	2161192	3.18
KU-43	587211	2157740	5.01
KU-482	582029	2163249	2.58
KU-47	588810	2157727	6.27
KU-402	580805	2166044	5.59
KU-229	581993	2158431	3.21
KU-27	588396	2158424	5.55
KU-PB-22	585377	2158565	3.18
KU-PA-A1	585350	2158595	3.14
KU-HA-KM-1	585749.41	2163292.28	3.00
Ku-pb-km-1	585668.79	2163271.45	2.92
KU HA-KS-1	588744.63	2157467.21	6.36
KU-PP-KS-1	588749.66	2157735.85	6.21
MALOOB-PP-MB-1	577803.2	2168149.68	9.04
MALOOB-PP-MA-1A	579768.6	2166866.29	6.83
Ku- 22	585377	2158565	3.18
KU-72	583201	2161894	0.79
KU-89	590303	2155940	8.53
KU-101	578814	2152406	10.02
KU-477	582400	2168815	7.70
KU-487	585593	2163277	2.87
KU-I	588900	2155650	7.68
KU-PB-KS-1	588632.57	2157513.84	6.24

Tabla 4.1

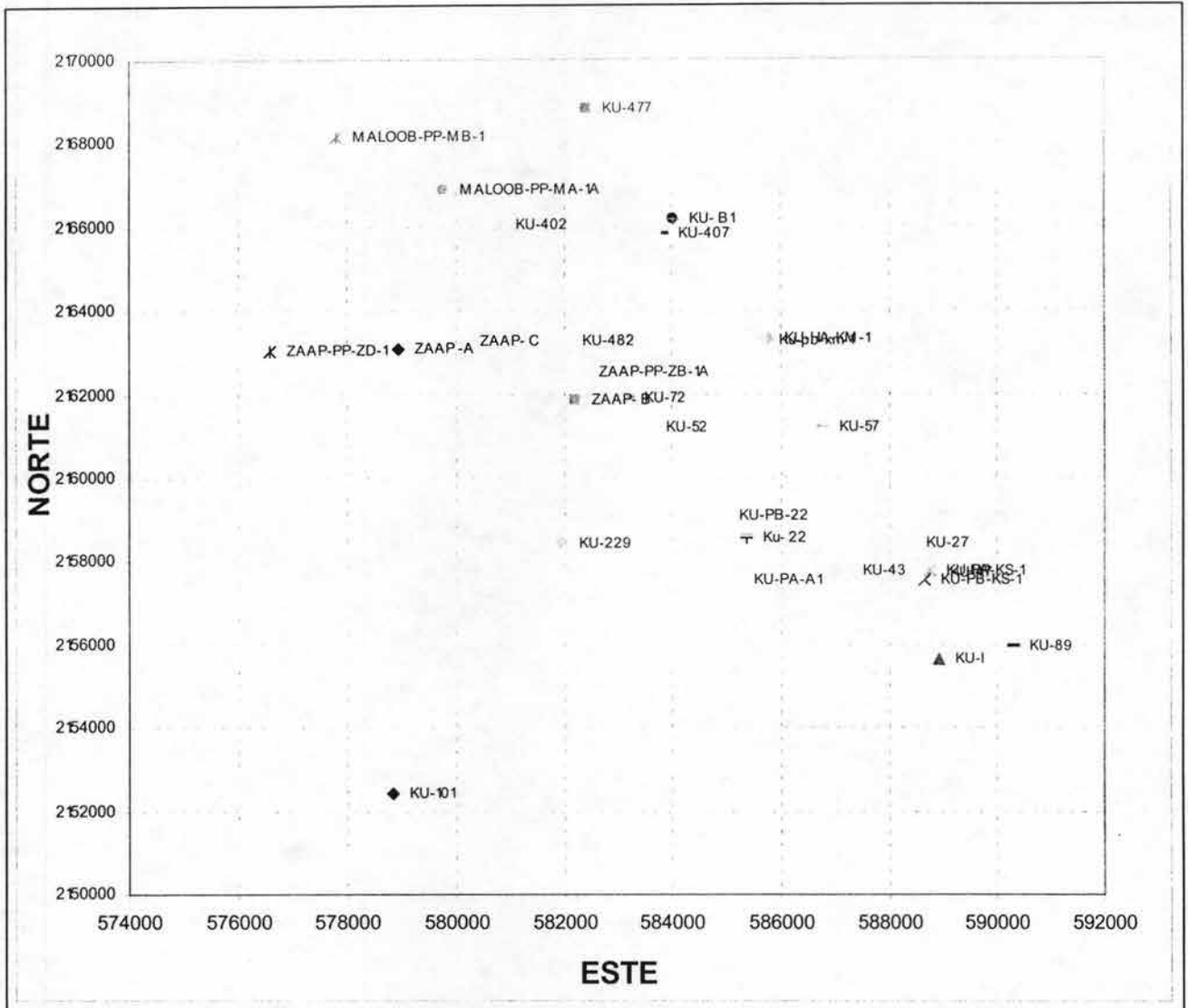
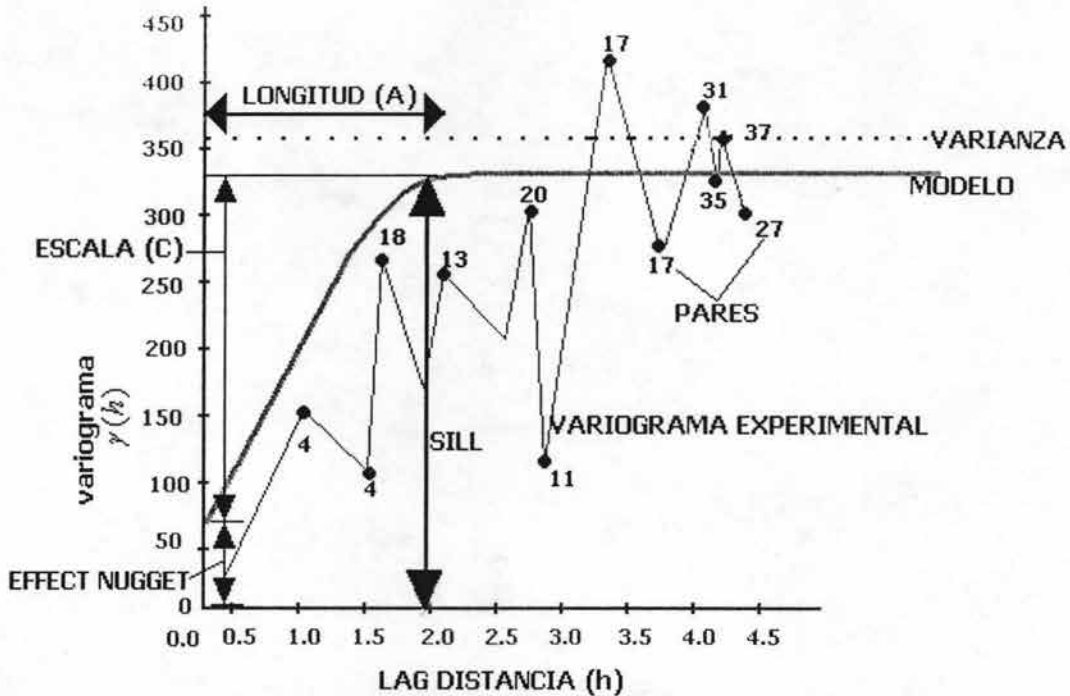


Figura 4.7 Ubicación en planta de los sondeos geotécnicos

Considerando que se tienen 32 sondeos geotécnicos distribuidos en una área de 320 km². Se analizarán las propiedades del suelo marino, de acuerdo a su distancia.

En la figura 4.7, se presentan los sondeos realizados en la zona de proyecto lo que nos da una idea de cómo se encuentran distantes unos de otros es decir hay áreas en las que se no se encuentran estudios geotécnicos cercanos que pueden de alguna manera minimizar la varianza de error. Con dichos sondeos se procedió a calcular la variabilidad.

Antes de continuar con los resultados, a continuación se muestra los parámetros del variograma.



Effect Nugget.- Determina la variación espacial, que ocurre a la distancia más cercana

Escala.- Es la escala vertical para el componente estructurado del variograma, cada componente de un modelo del variograma tiene su propia escala.

Longitud.- Es el rango horizontal del variograma, Algunos modelos del variograma no tienen un parámetro de longitud.

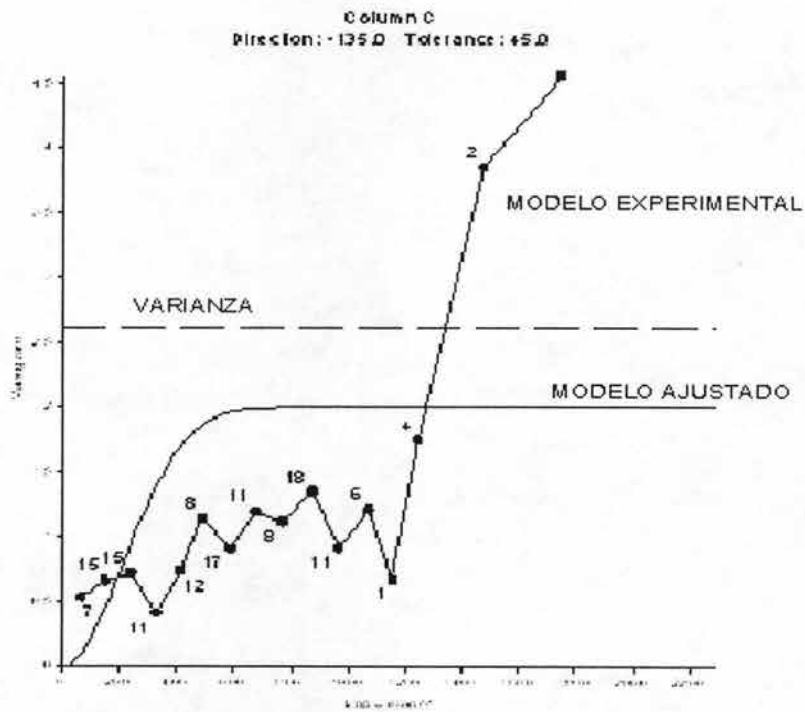
Varianza.- Es la media de la desviación cuadrada de cada valor medio, la varianza se indica en la línea punteada en el diagrama mostrado.

Pares.- representa los pares que se encuentran en un grupo, separados en una distancia específica, el número adyacente a los símbolos cuadrados indica el número de pares que se encuentra dentro de cada distancia.

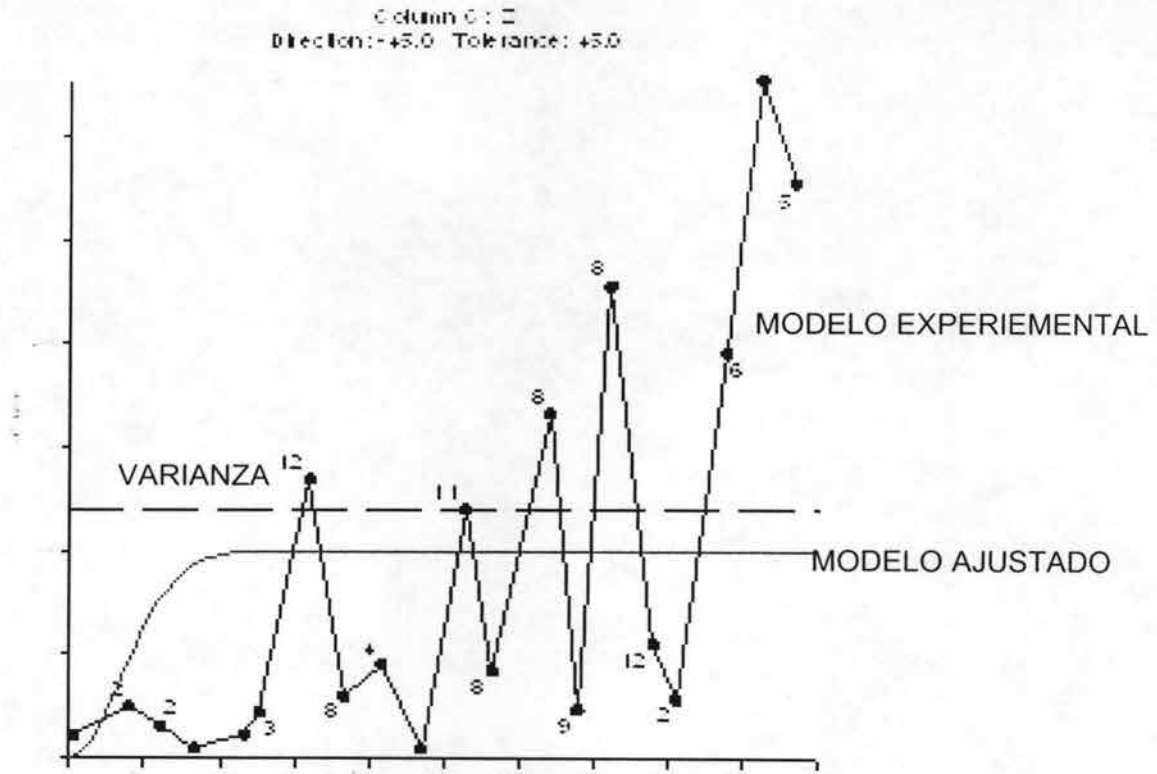
Modelo.- Muestra la forma del modelo del variograma.

Modelo experimental o variograma experimental.- Muestra los grupos de pares del variograma y la distancia de separación contra el variograma estimado.

Lo presentado anteriormente nos puede dar idea y de alguna manera a poder interpretar los resultados obtenidos durante la construcción de los variogramas, de tal forma que los variogramas que se presentan a continuación fueron calculados para determinar la variabilidad de los estratos en sentido horizontal y se presentan en la gráfica 4.1 y gráfica 4.2.



Gráfica 4.1 Variograma calculado para el primer estrato



Gráfica 4.2 Variograma calculado para el segundo estrato

Se puede observar a que con la escasa información no se pueden ajustar los valores es decir tendría que tener la forma de la figura 4.8, en la que muestra el variograma experimental y además también se observa el modelo ajustado ya que teóricamente se encuentra una buena correlación en los datos.

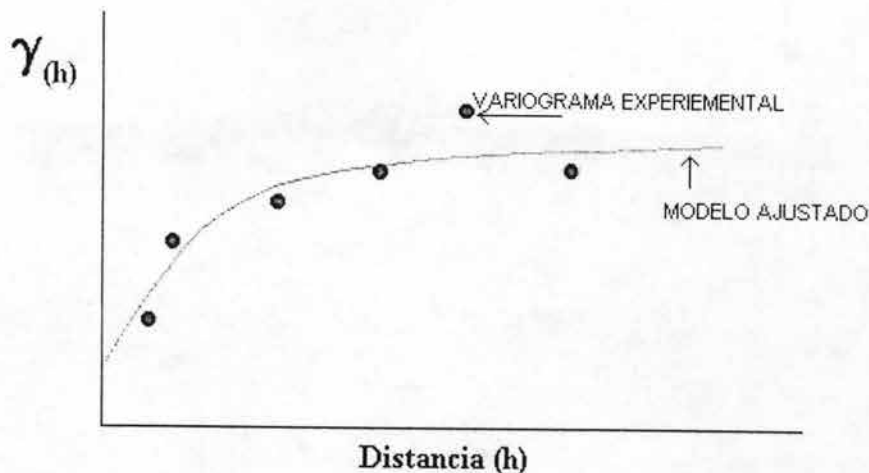


Figura 4.8 Modelo de la forma en la que se deben comportar los datos

En la gráfica 4.1 y 4.2 se presentan los resultados que se obtuvieron y se puede observar que son resultados muy erráticos lo cual nos muestra que no se encontró correlación espacial, debido a las características geológicas de la zona.

Que es claro que al encontrarse con uniformidades como son la formación de los arrecifes e inclusive fallas no es posible tener una buena interpretación de los resultados.

Otra de las deficiencias es tener poca información para este caso solo se cuenta con 32 sondeos, en este caso, tal vez esto no es uno de los factores que implican la mala interpretación de los resultados sino que se encuentran a una distancia considerable por lo que hay lugares en la que no hay sondeos cercanos unos con otros.

El siguiente paso fue analizar las propiedades en sentido horizontal y también el Variograma se calculo de igual forma, para el esfuerzo cortante en los primeros 5 metros de profundidad, dando también como resultado una forma errática en la construcción del Variograma.

La alternativa que se describe a continuación es encontrar resultados más satisfactorios.

Lo siguiente fue apoyarse en la geofísica la cual consiste en buscar zonas en las que sea más confiable colocar sondeos virtuales, en zonas en las que no se encuentren afectadas por arrecifes marinos o algún riesgo geológico, y así poder dar una alternativa de estudiar por zonas, y así poder colocar sondeos virtuales cerca de los estudios geotécnicos realizados.

Como prueba de este procedimiento se apoya en el estudio geofísico que tiene como nombre KU-PB-KS1, con coordenadas U.T.M. $x = 588632.57$ y $y = 2157513.84$, la distancia en la que se colocaron los sondeos virtuales es @ 20 m.

Primeramente se colocaron los sondeos virtuales en 4 direcciones (**NW-SE**) (**SE-NE**) ver plano 5.1.

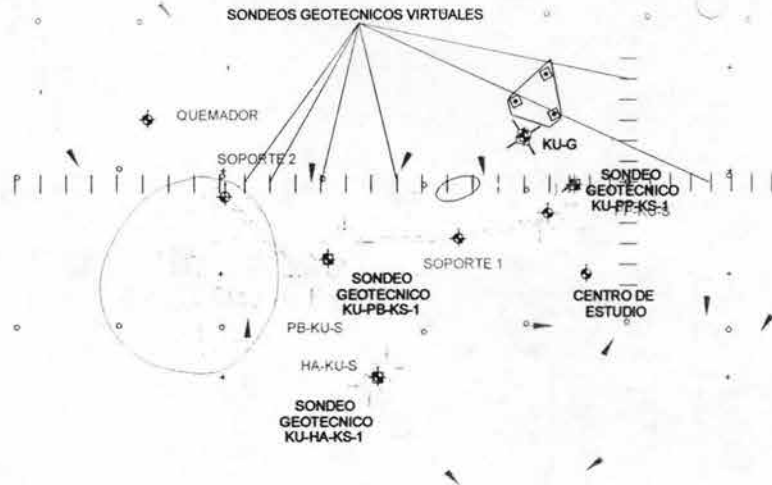
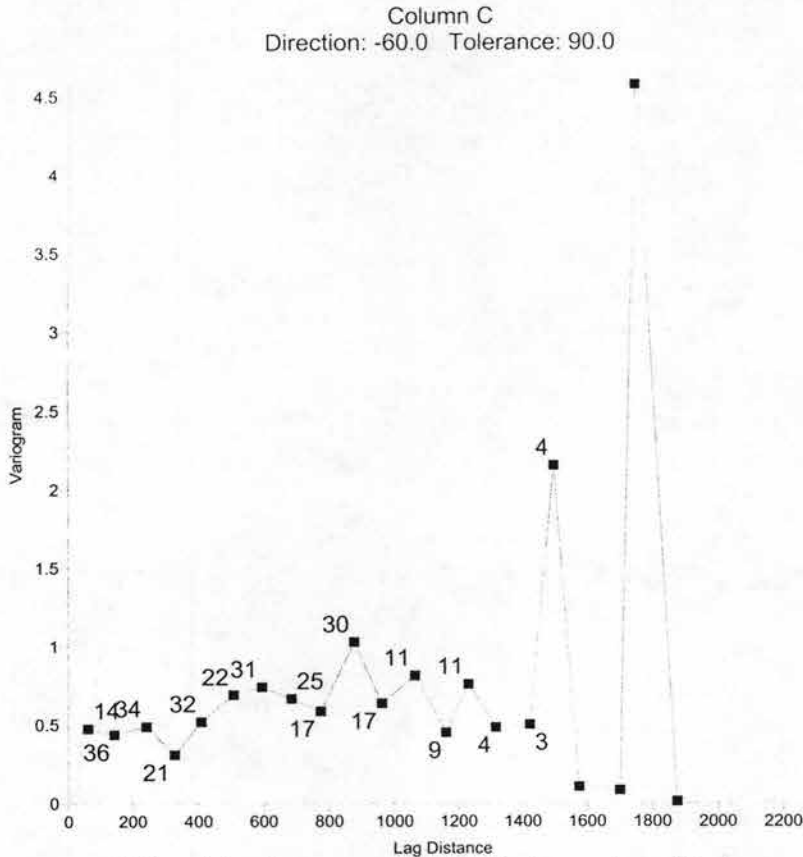


Figura 5.1 colocación de sondeos virtuales

Teniendo ya recuperada la información que es un total de 96 estudios geotécnicos **VIRTUALES**, se inició un cálculo del primer variograma en dirección (NW- SE).

La construcción del variograma descrito anteriormente y como se muestra en la Gráfica 4.3, la forma en la que muestra los resultados es por que están distribuidos en sólo dos líneas es decir se exploraron dos perfiles ortogonales.

Esto hace que aún cuando se obtengan semivariogramas representativos, no es posible lograr estimaciones porque en las zonas que queden sin datos dentro de la vecindad de búsqueda en el Krigeaje no se podría estimar porque no habría datos, es decir, a los espacios que quedan al Norte, Sur, Este y Oeste.



Gráfica 4.4 variograma que representa los sondeos virtuales

El variograma se debe comportar teóricamente como se mostró en la figura 4.8, ya que el variograma depende de la distancia y la dirección en las que se desea evaluar la variabilidad. Si al analizar variogramas ajustados en dos direcciones perpendiculares entre sí se observan diferencias significativas, se dice que existe anisotropía.

El variograma es un estimador de la varianza poblacional. Para que se cumpla esta afirmación, la población debe tener algún grado de estacionaridad, que en términos generales implica que debe tener una cierta regularidad en su distribución. La estacionaridad en sí no puede ser evaluada, pero se estima que si la muestra está normalmente distribuida se verifica este supuesto.

Como se pudo observar no se logró, el objetivo de la investigación, las gráficas que se presentaron son solo un ejemplo de cómo se comportaron las demás, que sería que en este caso, solo se tomaron las más representativas para tener un panorama de cómo esta la zona de proyecto.

5

PROPIEDADES DEL SUELO DE LA ZONA KU-MALOOB-ZAAP

En el presente capítulo se analizan las propiedades del suelo marino encontradas durante las exploraciones, posteriormente se hará un arreglo de tal forma que se pueda observar la variación de las propiedades índice y mecánicas esto se obtendrá con interpolaciones y curvas de influencia de las propiedades del suelo marino.

Posteriormente se describe de forma breve como obtienen las propiedades físico y mecánicas.

5.1 Contenido de agua.

El contenido de agua de los suelos seleccionados se determina cortando y extrayendo un espécimen apropiado de la muestra y colocándolo en un recipiente de peso conocido con un contenido de agua numerado. El recipiente y el espécimen se pesan inmediatamente, se introducen en un horno ventilado que se mantiene a una temperatura de 105^o C a 110^o C (no se deberían usar las temperaturas superiores a éstas ya que podrían alterar las propiedades de los minerales de la arcilla y se dejan secar durante 24 horas, los suelos que contengan yeso y/o proporciones relativamente elevadas de material orgánico se deberán secar a 60^o o en un desecador a temperatura ambiente. Entonces se pesan el espécimen seco y el recipiente y se calcula el contenido de agua de la siguiente manera.

$$w = \frac{M_w - M_d}{M_d} * 100$$

Contenido de agua (%)

Donde:

M_w = representa el peso húmedo.

M_d = el peso seco

5.2 Peso Volumétrico.

El peso unitario de las pruebas de los suelos seleccionadas se determina cortando y extrayendo una muestra de suelo y recortándola en una superficie plana. Se coloca entonces un anillo de densidad sobre la superficie recortada de la muestra asegurando que el borde cortante afilado penetra en el espécimen del suelo. Se empuja entonces el anillo de densidad verticalmente en el suelo, evitando movimientos laterales y se separa el anillo del suelo circundante con la ayuda de una cuchilla de paleta. Se quita cualquier exceso del material de los laterales del anillo de densidad. Se extrae entonces la muestra del anillo a un recipiente previamente pesado y numerado y se vuelve a pesar.

Se introducen entonces el recipiente y la muestra en un horno durante 24 horas a una temperatura de 105⁰ a 110⁰ C (nota cualquier suelo que contenga una proporción elevada de material orgánico se debería introducir en un horno a 60⁰ C), seguido del pesado del espécimen seco y la lata. Las densidades se calculan entonces de la siguiente manera.

Volumen del anillo

$$V = \frac{(\pi D^2)}{4000} * L$$

Donde:

L = representa la longitud de la muestra (mm)

D = representa el diámetro de la muestra (mm)

Peso volumétrico natural

$$P_b = \frac{M_w}{V}$$

Peso volumétrico Seco

$$P_d = \frac{100 * P_b}{100 + w}$$

Donde:

M_w = representa el peso húmedo (g)

w = representa el contenido de agua (%)

5.3 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg comprenden las pruebas de límite líquido y límite plástico y se utilizan para determinar la gama de contenidos de agua en los que una arcilla demuestra plasticidad, lo que denomina el índice de plasticidad.

El límite líquido se determina con el método del aparato de Casagrande. Se divide un espécimen de suelo, de aproximadamente 300 g. En dos partes de unos 200 g. y 100 g. La parte más grande se coloca en una placa de vidrio, se le añade agua destilada y se mezcla bien para formar una masa espesa homogénea. Se coloca una porción en la copa Casagrande sin atrapar aire y se nivela la superficie paralelamente a la base. Se sujeta la herramienta de Ranurar de manera normal a la superficie de la copa y se divide el suelo en dos porciones iguales arrastrando la herramienta desde la articulación de la copa hasta la parte frontal con un movimiento continuo. Se gira entonces la manivela a una velocidad de 2 revoluciones por segundo hasta que las dos partes del suelo entran en un contacto a lo largo de una distancia de 13 mm. Si la muestra sobre pasa los 50 golpes, se determina entonces el contenido de agua de una muestra de este espécimen de prueba.

Entonces se repite el proceso al menos tres veces mas utilizando la misma muestra del suelo a la que se ha añadido más incrementos de agua destilada, procediéndose de una condición mas seca a una más húmeda del suelo. La cantidad de agua que se añade es tal que cuando se determinan los cuatro o más contenidos de agua, se distribuyen de manera equitativa durante la gama de 50 a 10 golpes. El límite líquido se determina cuando el contenido de agua da como resultado un cierre de la separación de 25 golpes.

El límite plástico se determina en el espécimen más pequeño utilizado en la prueba de límite líquido, con el suelo parcialmente seco en la placa de vidrio hasta que se plastifica los suficientemente para formar una bola. Se moldea la bola con los dedos y se estira entre las palmas de las manos hasta que el suelo ha secado lo suficiente para que aparezcan ligeras grietas en una superficie. Se divide entonces la muestra en dos submuestras de aproximadamente 20-25g cada una y cada submuestra.

Se divide consiguientemente en cuatro partes más o menos iguales. Se moldea entonces el suelo con los dedos para uniformizar la distribución de humedad y se forma con el suelo con los dedos para uniformizar la distribución de humedad y se forma con el suelo un rollo de aproximadamente 3 mm longitudinal y transversalmente. Se determina el límite plástico cuando el contenido de agua causa el corte a los 3 mm.

5.4 Torcómetro

Esta prueba se realiza en suelos cohesivos ver foto 5.1 con resistencias al corte no drenada de hasta 250 kpa (25.5 kg/cm^2) los resultados de las medidas de la resistencia al corte obtenidos con un torcómetro se deben usar tan solo con una guía de la resistencia de los suelos, ya que la prueba es inexacta en suelos de mas de 75 Kpa (0.76 kg/cm^2) y esta sujeta a inexactitudes en suelos cohesivos con bolsas de arena o conchas. Se recomienda usar una serie de pruebas con el torcómetro en una muestra no alterada.

El torcómetro se utiliza para medir la resistencia al corte sin drenar en una superficie plana de una muestra de suelo cohesivo (nota: extremos de un espécimen del núcleo, no los laterales) y la prueba mide la resistencia del suelo contra un resorte calibrado utilizando una aspa introducida en el suelo se realiza la prueba seleccionando una zona de muestra del núcleo no alterada y cortando una superficie paralela a los extremos del núcleo. Se selecciona un tamaño de aspa según las resistencias probables del suelo, utilizando un diámetro de aspa pequeño para suelos de gran resistencia y un diámetro de aspa grande para suelos de poca resistencia. Se acopla el cabezal de la aspa al cuerpo del instrumento, se fija e cero la esfera del calibrador, se coloca la aspa sobre una superficie plana del suelo sin alterar y se introduce en el suelo hasta que la aspa penetra el espécimen totalmente (es decir, la parte posterior del cabezal de la aspa esta a paño con la superficie del suelo).



Foto 5.1 Prueba de torcómetro

Sujetado la muestra del suelo para evitar la rotación, se aplica un torque al cabezal del instrumento hasta que ocurre un corte. Se quita el torcómetro del espécimen y se registra la lectura de la esfera del calibrador. La resistencia al corte del espécimen se determina con los cuadros de conversión apropiados al tamaño del aspa utilizado.

5.5 Veleta miniatura motorizada

Esta prueba se realiza en suelos cohesivos de muy blandos a firmes con resistencias al corte no drenada de hasta 90 Kpa (0.91 kg/cm^2), la prueba es apta para suelos cohesivos que son demasiado blandos o demasiado sensibles para la preparación de los especímenes sin alterar de buena calidad para utilizarlos en pruebas triaxiales de resistencia al corte UU.

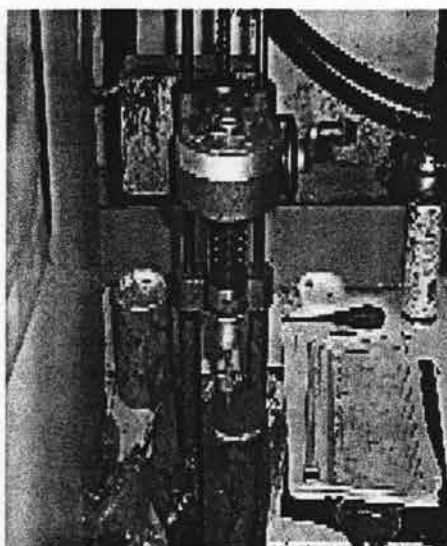


Foto 5.2 Prueba de Veleta.

La veleta de laboratorio es una medida de la resistencia al corte del suelo (esfuerzo total) según se determina al aplicar un torque a la prueba de corte de veleta y por lo general se realiza en el fondo de tubos shelby abiertos, (ver foto 5.2)

Asegurando que la muestra no se ha alterado. En la prueba se selecciona el resorte de tensión que sea más apropiado para la resistencia al corte del suelo que se calcula y se le acopla el tamaño de aspa apropiado. Antes de comenzar la prueba, se fija en cero la aguja indicadora del resorte y la escala graduada en el cabezal de torsión y se introduce la aspa en la muestra hasta el punto en que cambia el diámetro de eje de la aspa. Se registran las lecturas iniciales de la escala interior y exterior al tiempo que se asegura que las agujas indicadoras están en contacto con el brazo rotatorio. Se activa el motor eléctrico para que rote a 10 grados/min (torque aplicado) y se realizan observaciones de la aguja indicadora para controlar el punto de pérdida de contacto con el brazo rotatorio (se ha cortado el suelo).

Se apaga entonces el motor y se registra el tamaño de aspa, el número de resorte, el factor resorte/aspa, las lecturas iniciales interior y exterior de la esfera, la lectura interior final y los grados de corte.

La resistencia al corte para un suelo cohesivo utilizando una veleta de laboratorio depende del resorte utilizado, el tamaño de la paleta y la calibración del resorte y se calcula de la siguiente manera:

Resistencia al corte (Kpa) = torque/k

Donde:

$$k = \pi D^2 \left(\frac{H}{2} + \frac{D}{6} \right)$$

Veleta pequeño (12.7 mm) = 4 290 mm³

Veleta grande (25.4 mm) = 24 321 mm³

5.6 Triaxial no consolidada no drenada

Esta prueba se determina la resistencia no drenada de un espécimen de suelo cohesivo cuando se sujeta a una compresión confinada constante y a una carga axial de tensión controlada, sin cambio en el volumen, es decir no se permite el drenaje ver foto 5.3. El espécimen del suelo se toma o bien directamente de la muestra recuperada, con extremos preparados para este fin o bien se recorta a un diámetro de molde predeterminado. Al colocar el espécimen en la base del extremo interior se fija en una membrana de látex de caucho (espesor máx. 1% de diámetro), y una placa superior y se instala la tapa de la cámara. Se aplica la presión a la cámara y se comprime axialmente el espécimen con un cociente de deformación del 1 al 2 % por minuto.

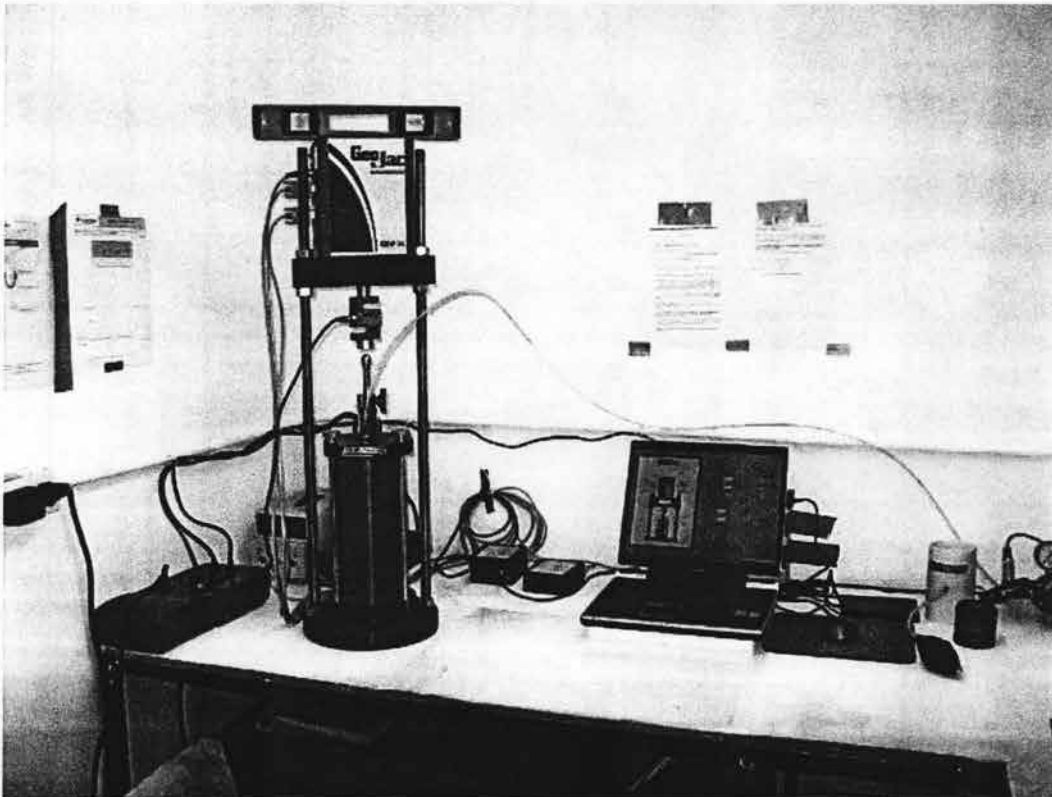


Foto 5.3 Prueba triaxial UU

Se registran las medidas de carga y deformación axiales a intervalos regulares y la compresión continuará hasta un 20% de tensión axial ó se obtiene una falla clara, indicada por una reducción en esfuerzo desviador. La diferencia entre los esfuerzos máximos y mínimos y la tensión asociada se determinan suponiendo que el espécimen se deforma como un cilindro derecho, utilizándose la curva de tensión de esfuerzos resultante para evaluar el esfuerzo máximo.

La resistencia al corte no drenada se identifica como la mitad del diferencial máximo entre los esfuerzos máximos y mínimos o el valor a una tensión axial del 20% si no tuviera un lugar máximo.

Se puede repetir la prueba en un espécimen totalmente reconstruido para evaluar la sensibilidad del material. Para esta prueba, se amasa totalmente la muestra y se constituye en una matriz moldeada antes de introducirlo en la placa de extremo interior de la cámara y cubrirlo con la membrana de látex de caucho. El procedimiento de prueba es el mismo que para el espécimen sin alterar. En la prueba triaxial se determina el peso volumétrico y el contenido de agua del espécimen mediante el pesado antes y después de la prueba.

5.7 Condiciones generales del suelo en la zona de KU-MALOOB-ZAAP

A continuación se presenta un resumen de los estratos dentro de la zona de proyecto, uno de ellos es el siguiente resumen en la zona Zaap.

ESTRATO	PROFUNDIDAD (m)		DESCRIPCION ZAAP
	De	a	
I	0	4.45	Arcilla de alta plasticidad, de consistencia muy blanda a media, color gris verdoso; con algunos fragmentos de concha.
II	4.45	8.05	Arena arcillosa y arena limosa, suelta, carbonatada, color gris y gris verdoso; con algunos fragmentos de concha.
III	8.05	51.35	Arcilla arenosa, de consistencia media a muy firme, color gris verdoso.
IV	51.35	54.4	Arcilla arenosa de consistencia firme, color gris verdoso; con algunos fragmentos de concha.
V	54.4	63.55	Arcilla de alta plasticidad, de consistencia muy firme, color gris verdoso.
VI	63.55	66.65	Limo arcilloso, compacto, carbonatado, color gris.
VII	66.65	103.1	Arcilla de alta plasticidad, de consistencia firme a muy firme, color gris verdoso; con algunos fragmentos de concha.
VIII	103.1	106.2	Limo arcilloso, compacto, carbonatado, color gris verdoso.
IX	106.2	129.8	Arcilla de alta plasticidad, de consistencia muy firme, color gris verdoso; con algunos fragmentos de concha.

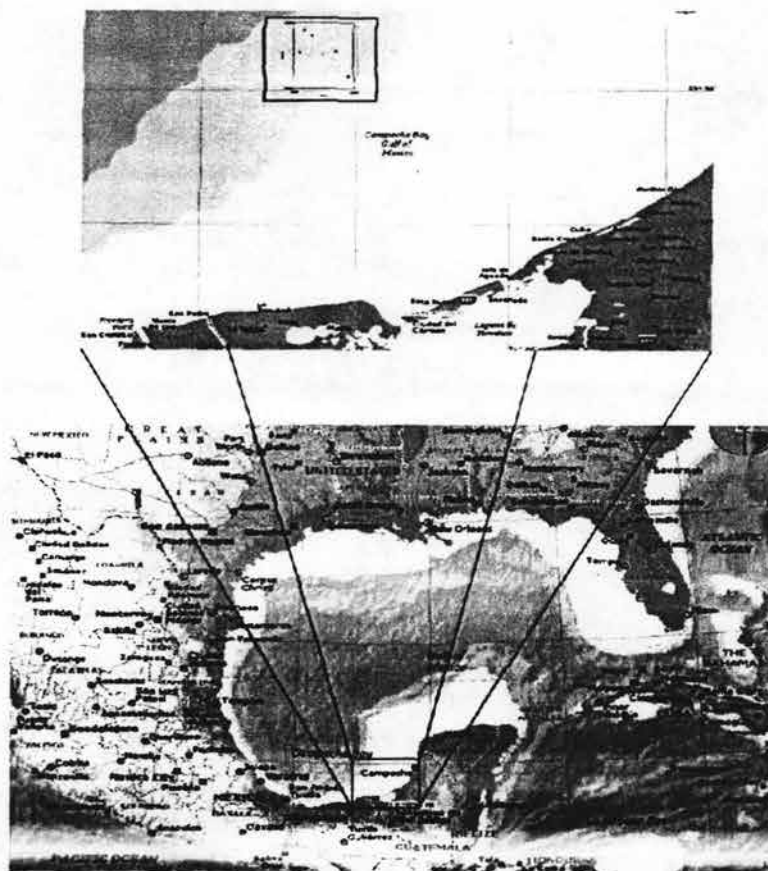
Un resumen de los estratos principales de suelo encontrados en el sitio Maloob se tabula a continuación

ESTRATO	PROFUNDIDAD		DESCRIPCION MALOOB
	DE	A	
I	0	2.5	Arcilla limosa, muy blanda, volviéndose muy arenosa en la parte inferior del estrato (CH).
II	2.5	4.1	Arena de fina a gruesa, arcillosa, ligeramente gravosa, compacta, localmente cementado débil (SC).
III	4.1	7.3	Arcilla muy limosa, ligeramente arenosa, media (CL).
IV	7.3	10	Arena de fina a gruesa, ligeramente arcillosa, de medio compacta a muy compacta (SC-SP).
V	10	13	Arcilla muy limosa, de media a firme.
VI	13	63.5	Arcilla de limosa a muy limosa, de media a muy firme (CL).
VII	63.5	66	Arena de fina a gruesa, arcillosa, ligeramente gravosa, de suelta a medio compacta, muy arcillosa en la parte superior.
VIII	66	73	Limo arcilloso de suelto a medio compacto, intercalado con arcilla muy limosa (CL-CH).localmente cementado de débil a fuerte.
IX	73	120.25	Arcilla de limosa a muy limosa , de firme a dura

Un resumen de los estratos principales de suelo encontrados en el sitio Ku se tabula a continuación

ESTRATO	PROFUNDIDAD (m).		DESCRIPCION KU
	De	A	
I	0	8.68	Arcilla muy blanda gris.
II	8.68	12.8	Arcilla limosa carbonatada blanda, gris claro.
III	12.8	15.84	Arena fina limosa medio densa, gris.
IV	15.84	19.5	Arcilla gris poco firme.
V	19.5	65.22	Arcilla firme a muy firme, gris.
VI	65.22	68.27	Arena fina a media, medio densa, gris, con gravas.
VII	68.27	115.82	Arcilla muy firme a dura color gris.

UBICACIÓN DEL PROYECTO ZONA KU-MALOOB-ZAAP



5.8 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

Dada las condiciones de la zona de Ku-Maloob-Zaap y como una manera de obtener un panorama amplio de cómo cambian las propiedades de un sondeo a otro. La estratigrafía se analizará de tal forma que se pueda observar la variación de las propiedades índice y mecánicas (ver gráficas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4), de todo el perfil tomando como muestra un estrato al inicio del sondeo, al centro y al final de este.

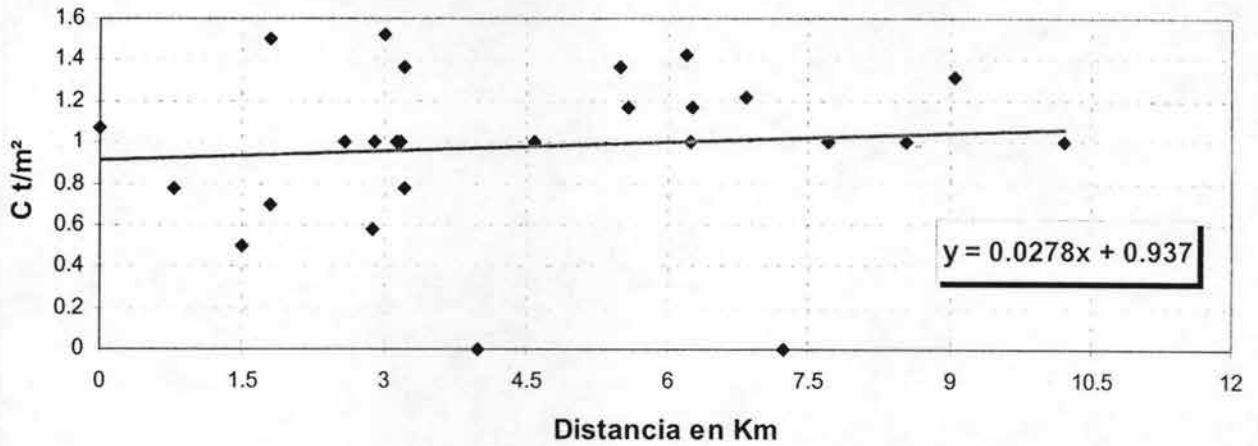
Para esto, se tomo como referencia un sondeo al centro del área (Ku-52), y todos los adyacentes a ese sondeo en un radio de 10 Km. Graficándose las propiedades de todos los sondeos contenidos en el área (ver tabla 5.1), en cuestión con su distancia al punto de referencia.

Zona	Espesor en (m)	Distancia en Km.	Esfuerzo t/m ²	L.L.	L.P.	W %
ku 72	5	0.79	0.78	86	28	91
ku 52	5	0	1.074	100	27	89
Zaap-pp-zb1	5	1.8	1.5	40	18	52
ZAAP B	5	1.51	0.5	90	29	106
Zaap-pp-zb-1	5	1.8	0.7	38	13	33
Ku- 22	5	3.22	1.36	91	27	80
Ku-229	5	3.21	0.78	102	33	86
Zaap c	5	4.01	0	arena	arena	21
Ku-57	5	3.18	1	94	23	91
Ku-482	5	2.58	1	53	18	67
Ku-ha-km1	5	3	1.52	87	29	85
Ku-477	5	2.87	0.58	90	22	87
Ku-pb-km1	5	2.9	1	90	27	93
Ku-pa-a1	5	3.14	1	96	33	79
Ku-pb-ks1	5	6.24	1	88	18	86
Ku-27	5	5.5	1.36	89	32	79
Ku- 407	5	4.6	1	85	30	87
Ku- 47	5	6.27	1.17	95	26	80
KU-402	5	5.59	1.17	46	19	52
ma-pp-ma1	5	6.83	1.22	55	19	0
ku.pp-ks1	5	6.21	1.42	89	29	76
Ku-89	5	8.53	1	92	27	85
Ku-477	5	7.7	1	31	15	38
Ku-101	5	10.2	1	85	21	98
ma-pp-mb-1	5	9.04	1.32	26	9	35
Zaap-pp-zd1	5	7.24	0	arena	arena	0

Tabla 5.1

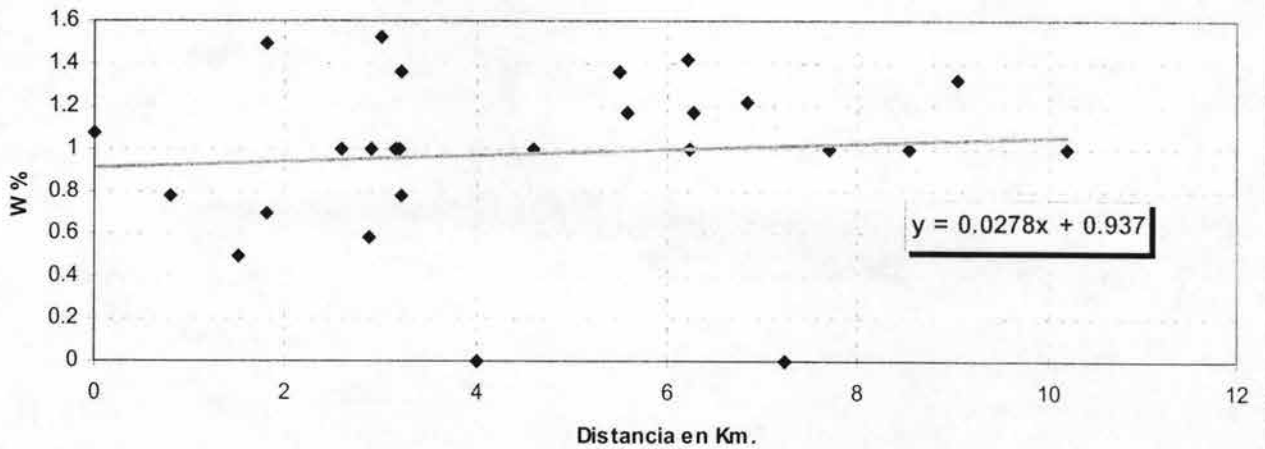
Variación a 5 m de profundidad, (estratos superficiales).

variacion horizontal del esfuerzo cortante a 5 m de profundidad.



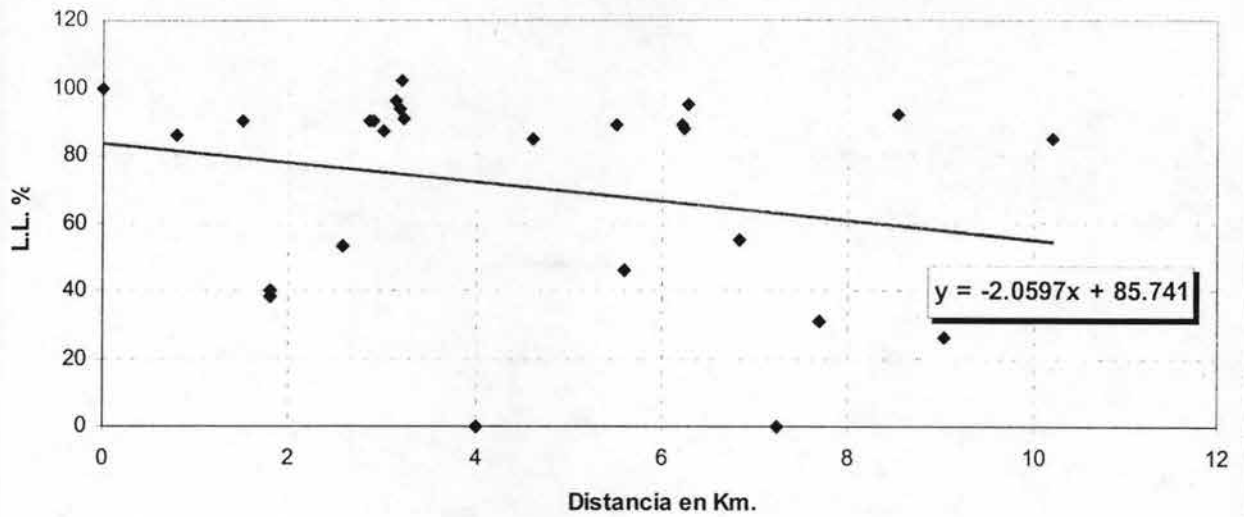
Gráfica 5.1 representa la variación esfuerzo cortante a 5 m de profundidad

variación horizontal del contenido de humedad a 5 m de profundidad



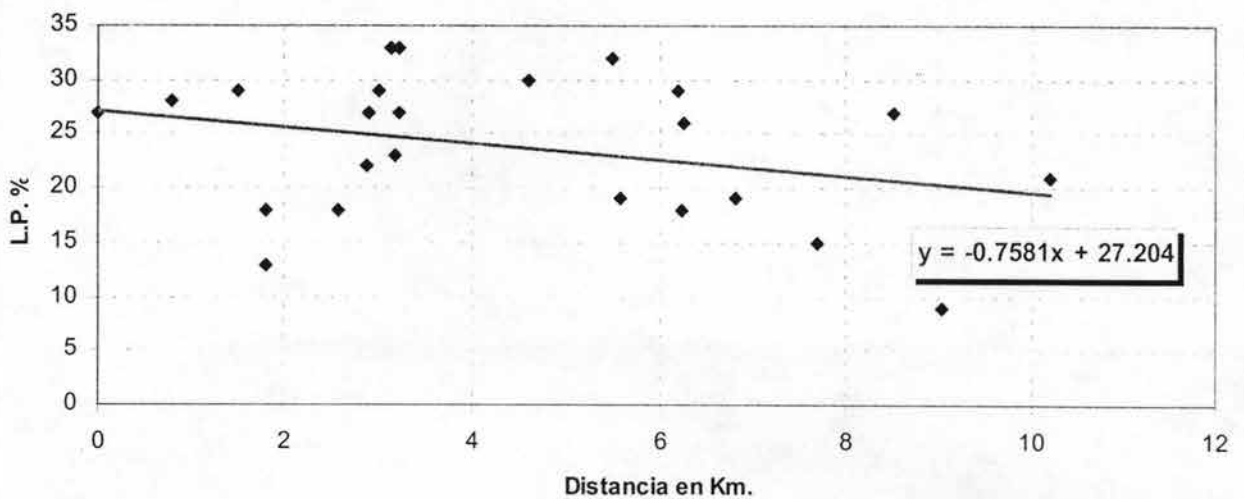
Gráfica 5.2 representa la variación del contenido de agua a 5 m de profundidad

variación horizontal del L.L. a 5 m de profundidad.



Gráfica 5.3 representa la variación del Límite Líquido a 5 m de profundidad

variación horizontal del L.P. a 5 m de profundidad



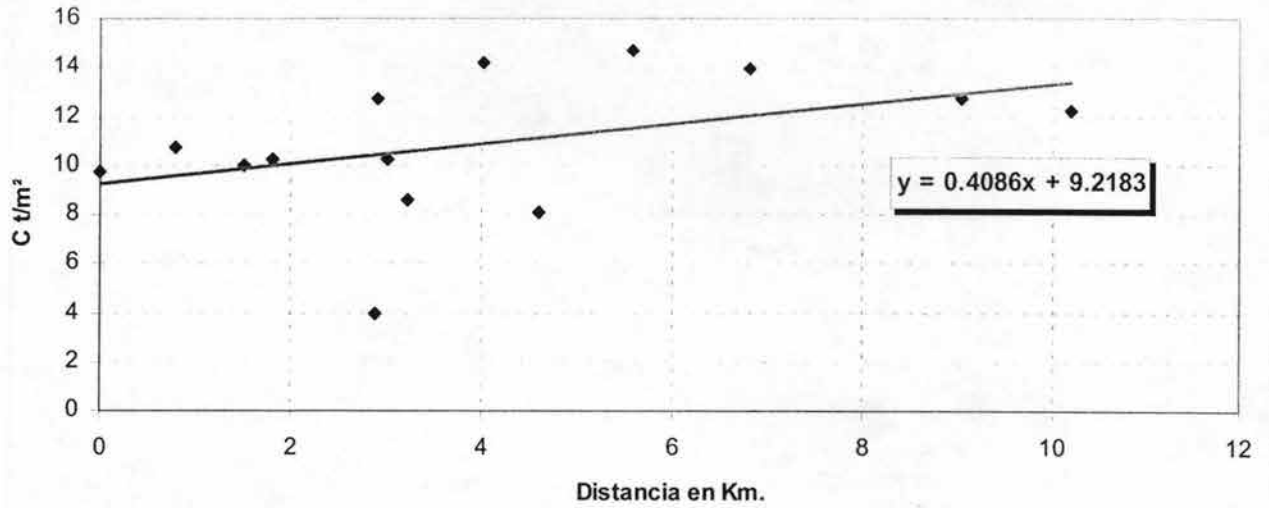
Gráfica 5.4 representa la variación del Límite Plástico a 5 m de profundidad

Variación a 50 m de profundidad, (estratos centrales).

Zona	Espesor en (m)	Distancia en Km.	Esfuerzo t/m ²	p.v. t/m ³	L.L.	L.P.	W %
Ku 72	50	0.79	10.74	0.72	77	29	44
Ku 52	50	0	9.77	0.72	77	24	45
Zaap-pp-zb1	50	1.8	0	0.75		arena	28
Zaap B	50	1.51	10	0.73	73	25	51
Zaap-pp-zb	50	1.8	10.19	0.75	24	6	28
Ku- 22	50	3.22	0	0.8		arena	34
Ku-229	50	3.21	8.6	0.76	60	27	41
Zaap c	50	4.01	14.2	0.72	56	23	33
Ku-57	50	3.18	0	0.83		arena	32
Ku-482	50	2.58	0	0.96		arena	31
Ku-ha-km1	50	3	10.19	0.68	60	22	46
Ku-477	50	2.87	4	0.78	59	19	34
Ku-pb-km1	50	2.9	12.74	0.68	82	22	51
Ku-pa-a1	50	3.14	0	0.87		arena	33
Ku-pb-ks1	50	6.24	0	0.68		arena	17
Ku-27	50	5.5	0	0.96		arena	33
Ku- 407	50	4.6	8.1	0.73	66	24	44
Ku- 47	50	6.27	0	0.86		arena	23
Ku-402	50	5.59	14.64	0.68	59	23	34
ma-pp-ma1	50	6.83	13.97	0.78	60	16	38
ku.pp-ks1	50	6.21	0	0.78		arena	29
Ku-89	50	8.53	0	0.86		arena	19
Ku-477	50	7.7	0	0.73		arena	49
Ku-101	50	10.2	12.2	0.67	82	20	50
ma-pp-mb-1	50	9.04	12.74	0.78	89	25	59
Zaap-pp-zd1	50	7.24	0	0.78		arena	37

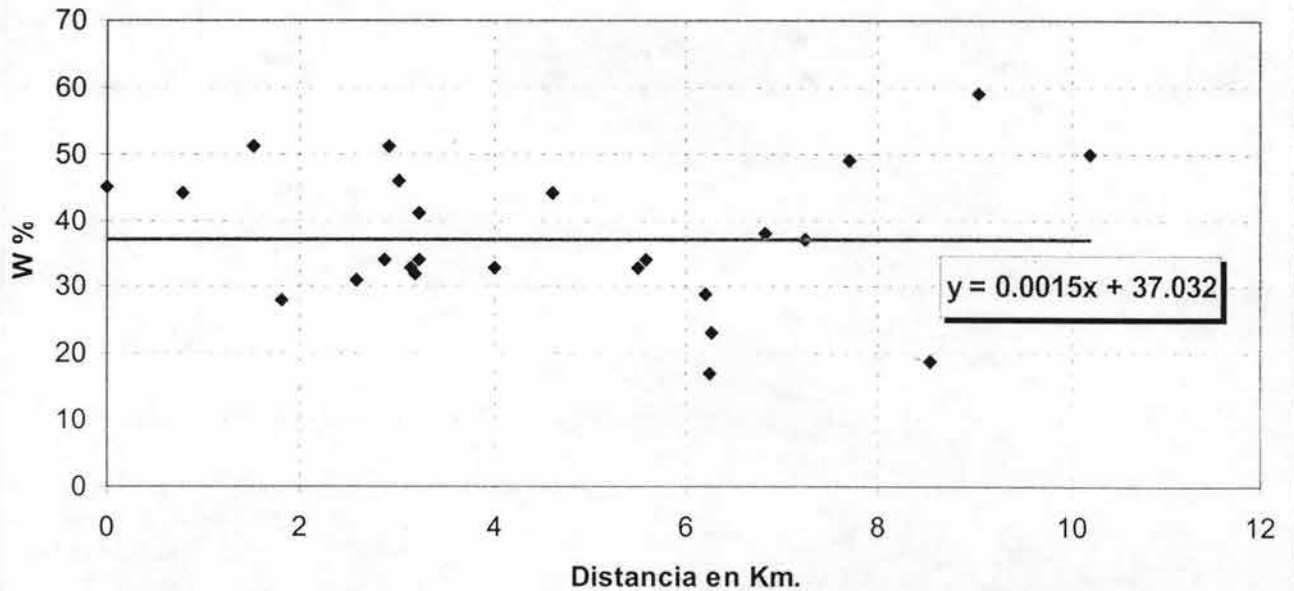
Tabla5.2

Variación horizontal del esfuerzo cortante a 50 m de profundidad



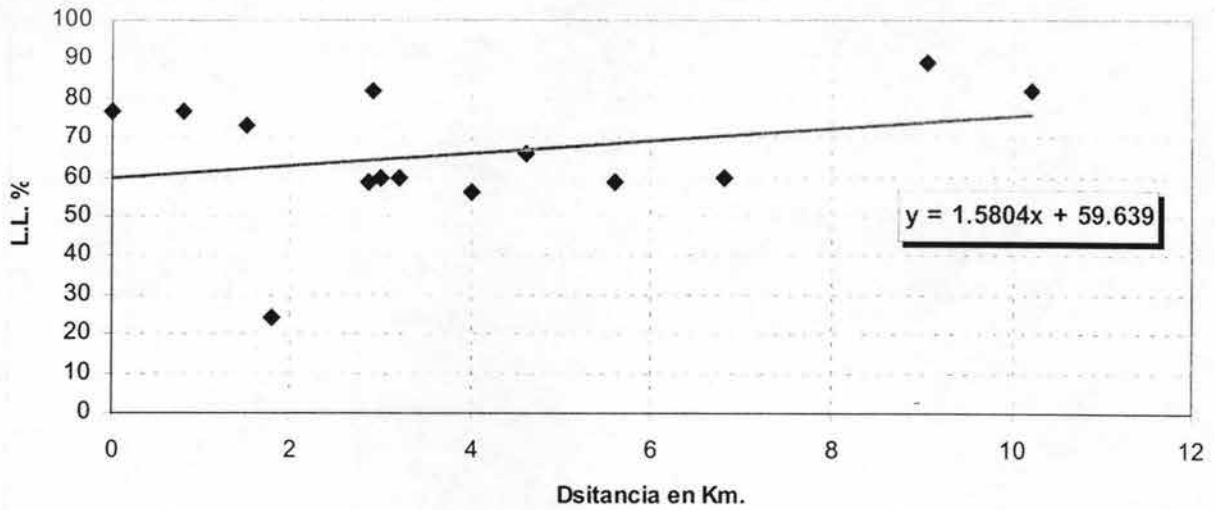
Gráfica 5.5 representa la variación del esfuerzo cortante 50 m de profundidad

Variación del contenido de humedad W %



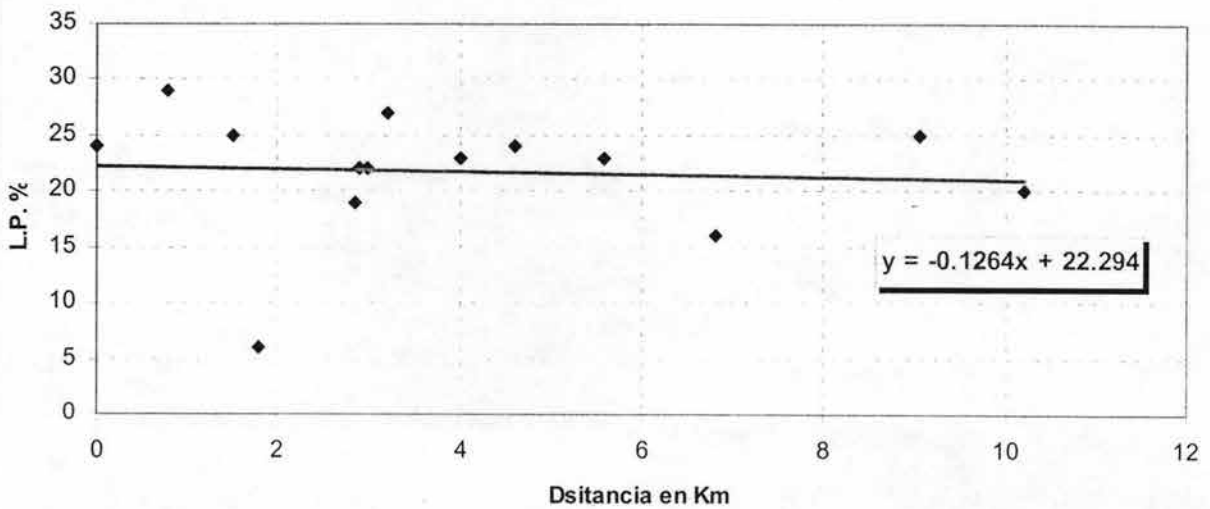
Gráfica 5.6 representa la variación del contenido de humedad a 50 m de profundidad

Variación horizontal del L.L. a 50 m de profundidad



Gráfica 5.7 representa la variación del Límite Líquido a 50 m de profundidad

Variación del L.P. a 50 m de profundidad



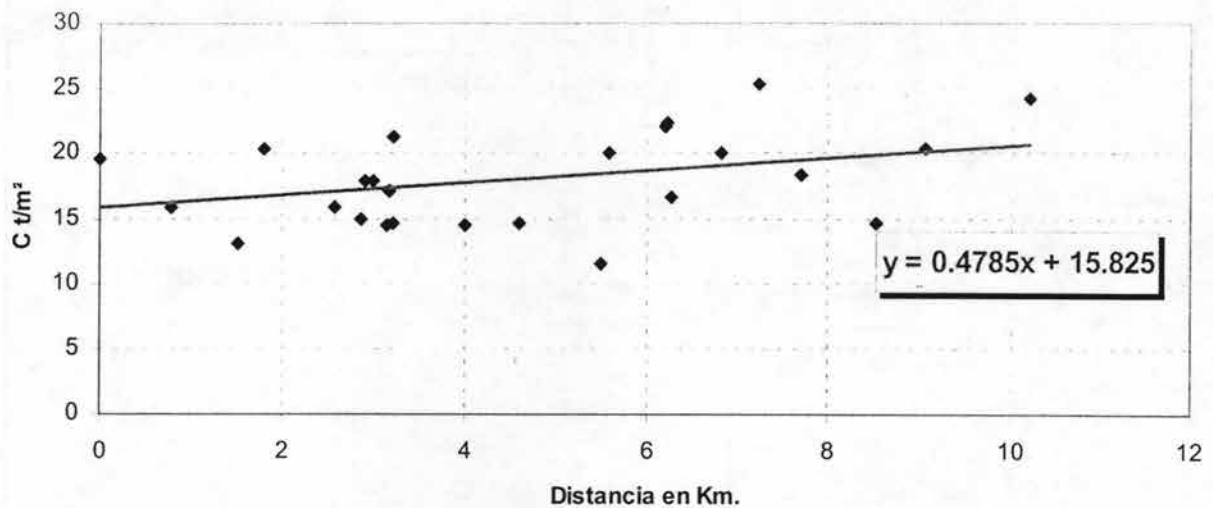
Gráfica 5.8 representa la variación del Límite plástico a 50 m de profundidad

Variación a 100 m de profundidad, (estratos últimos).

zona	espesor en (m)	distancia en Km.	Esfuerzo t/m ²	p.v. t/m ³	L.L.	L.P.	w%
Ku 72	100	0.79	15.91	0.78	75	23	53
Ku 52	100	0	19.52	0.62	116	40	32
Zaap-pp-zb1	100	1.8	20.39	0.78	78	19	35
Zaap B	100	1.51	13	0.64	93	27	41
Zaap-pp-zb	100	1.8	20.39	0.78	75	22	41
Ku- 22	100	3.22	14.64	0.62	109	22	52
Ku-229	100	3.21	21.28	0.7	94	23	43
Zaap c	100	4.01	14.5	0.72	74	22	26
Ku-57	100	3.18	17.08	0.68	78	23	42
Ku-482	100	2.58	15.91	0.73	48	20	39
Ku-ha-km1	100	3	17.84	0.85	65	20	40
Ku-477	100	2.87	15	0.7	78	23	43
Ku-pb-km1	100	2.9	17.84	0.78	106	25	65
Ku-pa-a1	100	3.14	14.5	0.82	100	40	35
Ku-pb-ks1	100	6.24	22.43	0.78	92	33	45
Ku-27	100	5.5	11.52	0.68	89	26	43
Ku- 407	100	4.6	14.64	0.73	73	26	41
Ku- 47	100	6.27	16.6	0.68	107	42	62
Ku-402	100	5.59	20	0.78	61	22	33
ma-pp-ma1	100	6.83	20	0.85	79	20	40
ku.pp-ks1	100	6.21	22	0.78	103	31	53
Ku-89	100	8.53	14.6	0.7	76	23	41
Ku-477	100	7.7	18.35	0.7	78	29	44
Ku-101	100	10.2	24.21	0.83	85	20	39
ma-pp-mb-1	100	9.04	20.34	0.98	42	13	33
Zaap-pp-zd1	100	7.24	25.4	0.85	19	62	38

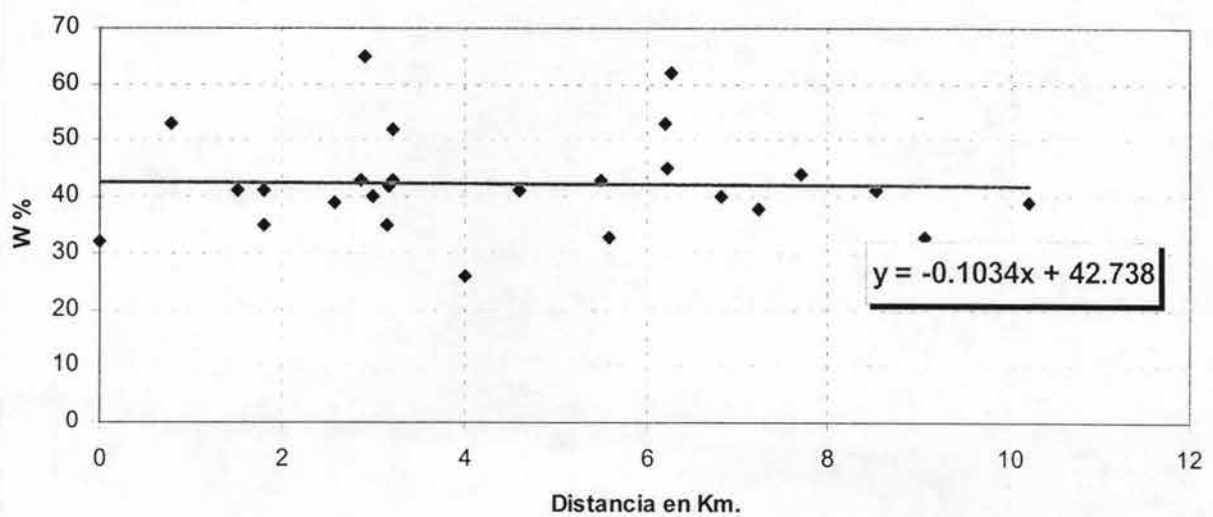
Tabla 5.3

Variación del esfuerzo cortante a 100 m de profundidad



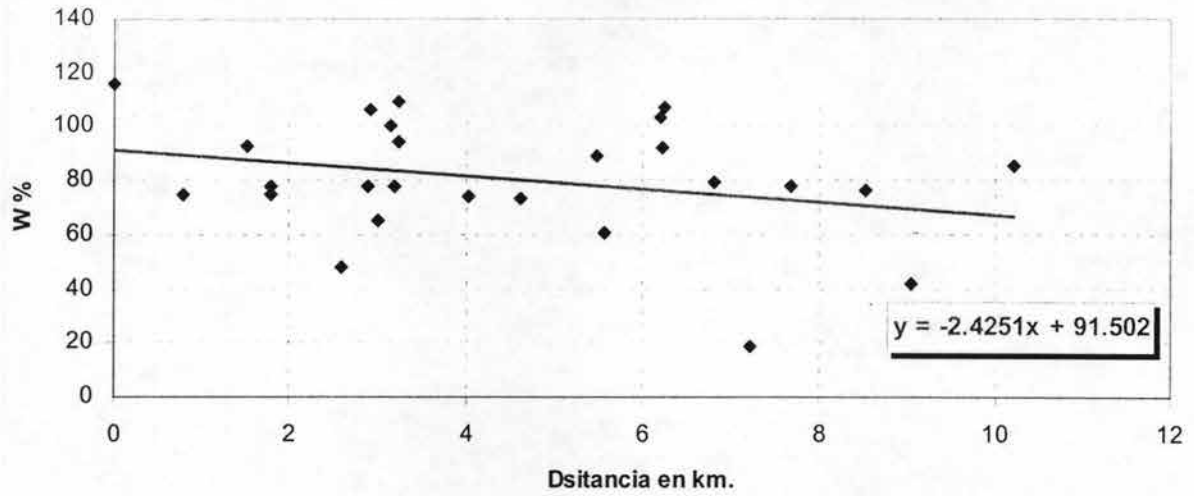
Gráfica 5.9 representa la variación del Esfuerzo Cortante a 100 m de profundidad

Variación del contenido de humedad a 100 m de profundidad



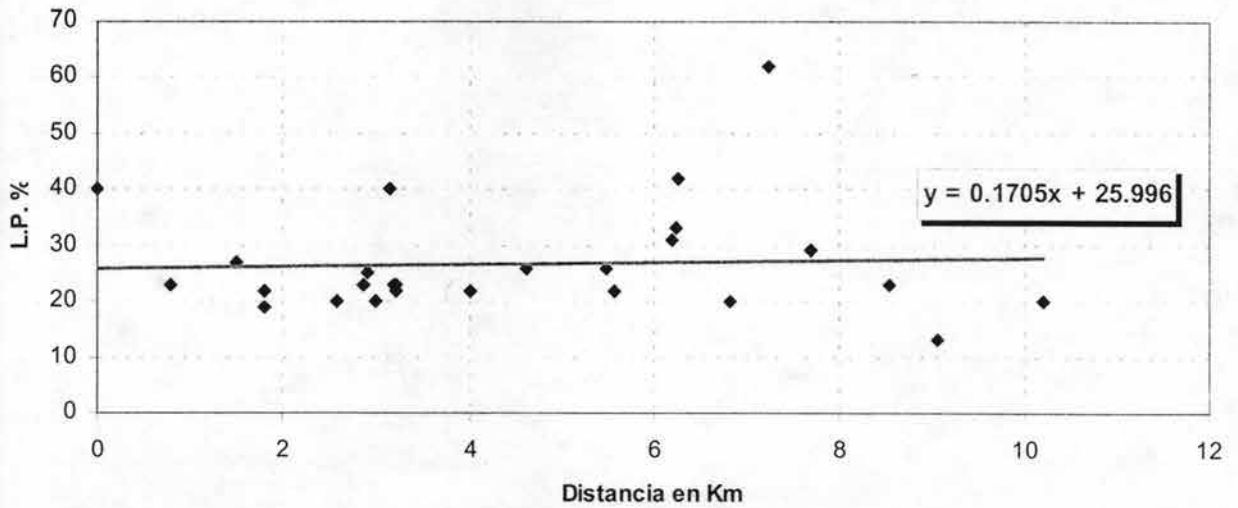
Gráfica 5.10 representa la variación del contenido de humedad a 100 m de profundidad

Variación del Límite Líquido a 100 m de profundidad.



Gráfica 5.11 representa la variación del contenido de humedad a 100 m de profundidad

Variación del límite plástico a 100 m de profundidad



Gráfica 5.12 representa la variación del Límite Plástico a 100 m de profundidad.

En las gráficas que se presentaron anteriormente se pudo observar la variación de las propiedades índice y mecánicas en los sondeos geotécnicos, de tal forma que también se muestra en cada gráfica su ecuación que representa a la población de las mismas.

Las gráficas indicadas a continuación, se hicieron para mostrar de forma más clara la variación en planta y asimismo sus respectivas curvas de influencia.

Estas gráficas se hicieron con la ayuda del Software Surfer V.7. y con un método de interpolación llamado Radial Basis Function que es un método de interpolación que se ajusta mas a los resultados de las propiedades analizadas.

Este trabajo se deja abierto para analizar mas a fondo la variación de las propiedades índice y mecánicas, y de acuerdo a ello se presenta como forma de ayuda los pasos para la utilización del software y posteriormente las graficas descritas anteriormente.

Se indica paso a paso el procedimiento para alimentar programa Surfer V.7 para facilitar el procedimiento de construcción de las curvas de influencia.

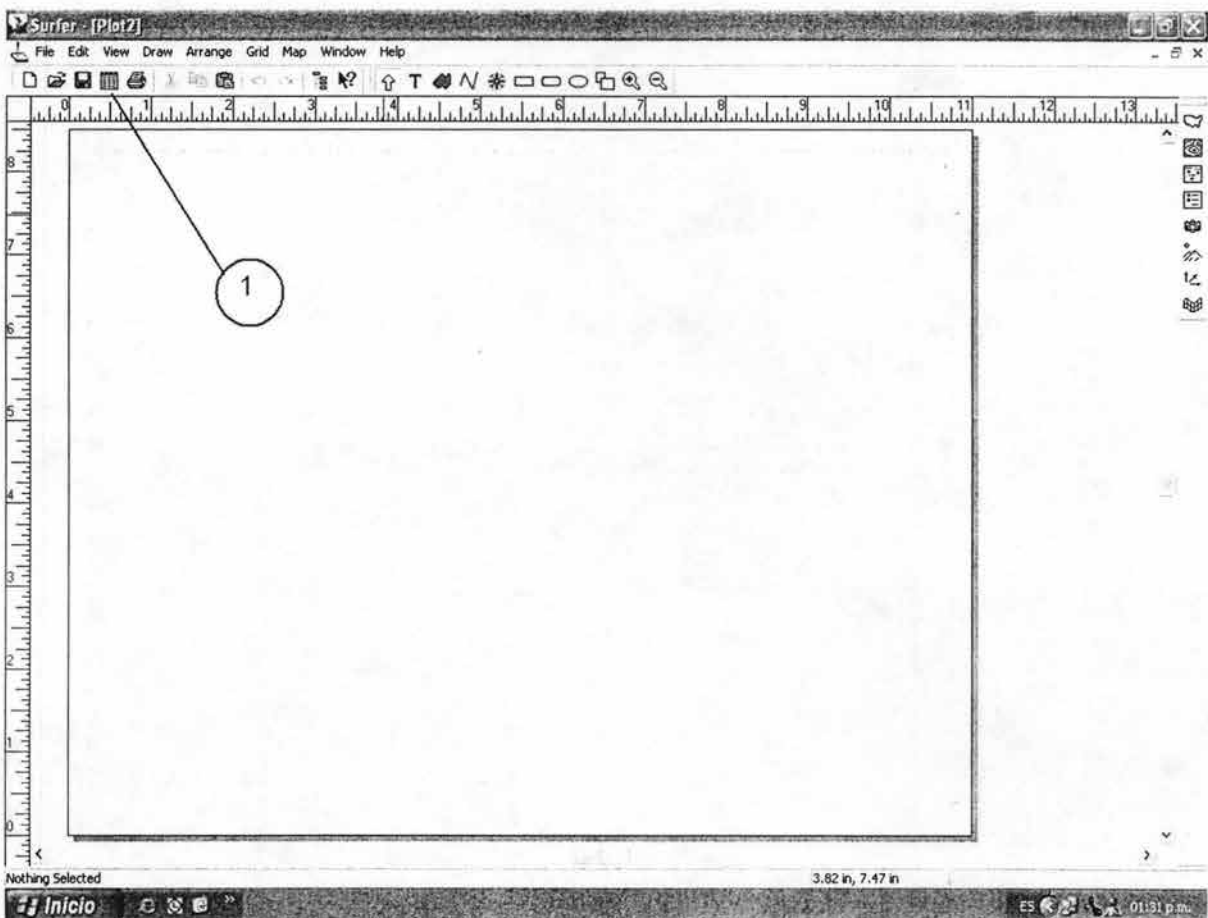


Figura 5.2

Como se muestra de forma esquemáticamente al abrir el Surfer V.7, en la barra de herramientas (1), de localiza el item llamado Worksheet ver (figura 5.2), se introducen los datos a analizar, recordando que el programa trabaja de forma tridimensional.

The screenshot shows the Surfer V.7 application window with a spreadsheet. The spreadsheet has columns labeled B, C, D, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U. The data is as follows:

	B	C	D	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	x	y	Esfuerzo t/m2											
2	583201	2161894	0.78											
3	583599	2161207	1.074											
4	582345.14	2162493.6	1.5											
5	582226	2161840	0.5											
6	576595.55	2163043.0	0.7											
7	585377	2158565	1.36											
8	581993	2158431	0.78											
9	586782	2161192	1											
10	582029	2163249	1											
11	585749.41	2163292.3	1.52											
12	582400	2168815	0.58											
13	585668.79	2163271.5	1											
14	585350	2158595	1											
15	588632.57	2157513.8	1											
16	588396	2158424	1.36											
17	583824	2165800	1											
18	588810	2157727	1.17											
19	580805	2168044	1.17											
20	579768.6	2168866.3	1.22											
21	588749.66	2157735.9	1.42											
22	590303	2155940	1											
23	582400	2168815	1											
24	578814	2152406	1											
25	577803.2	2168149.7	1.32											
26														
27														
28														
29														
30														
31														
32														
33														
34														
35														

Figura 5.3

Una vez ingresado los datos e la hoja de Worksheet como se muestra en la figura 5.3, se guarda en formato .xls, es decir en una hoja de Excel.

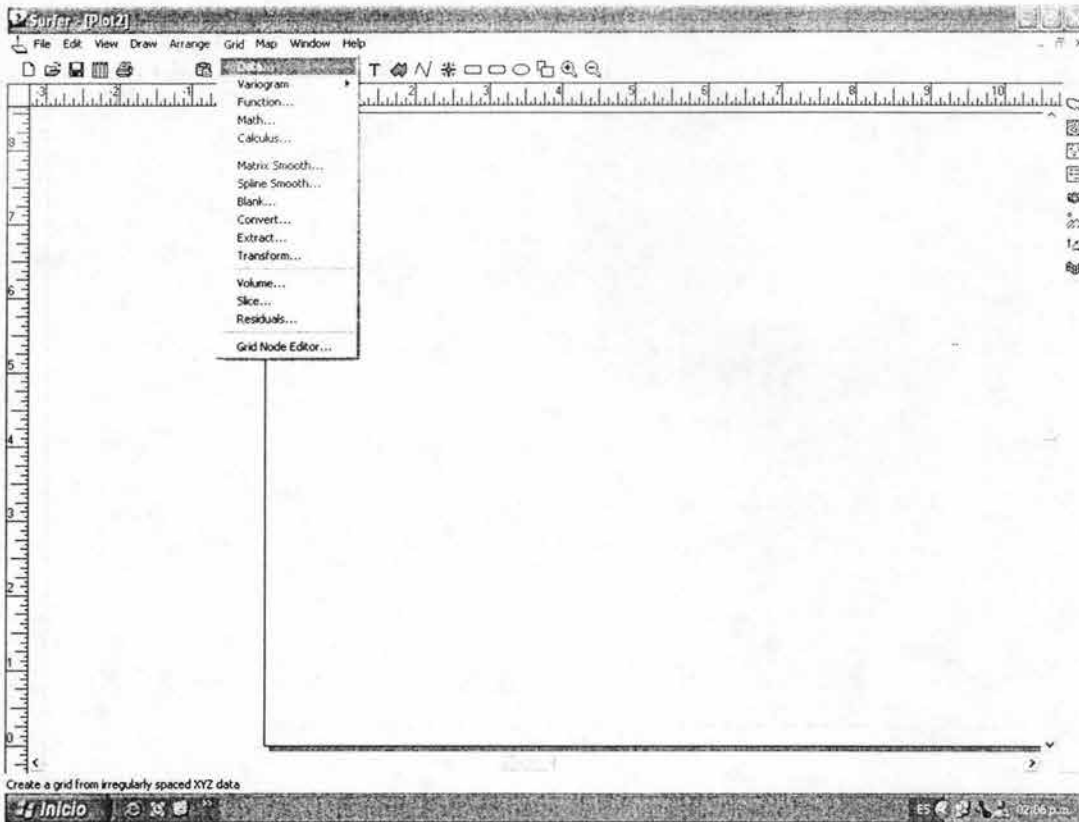



Figura 5.4

Una vez guardado la hoja de Excel, se abre una hoja llamada plot  que se encuentra en la barra de herramientas, ya abierta esta opción se tiene que hacer una malla (grid) localizada en la barra de herramientas se despliega y en la opción data, se busca el archivo guardado en Excel. Figura 5.5.

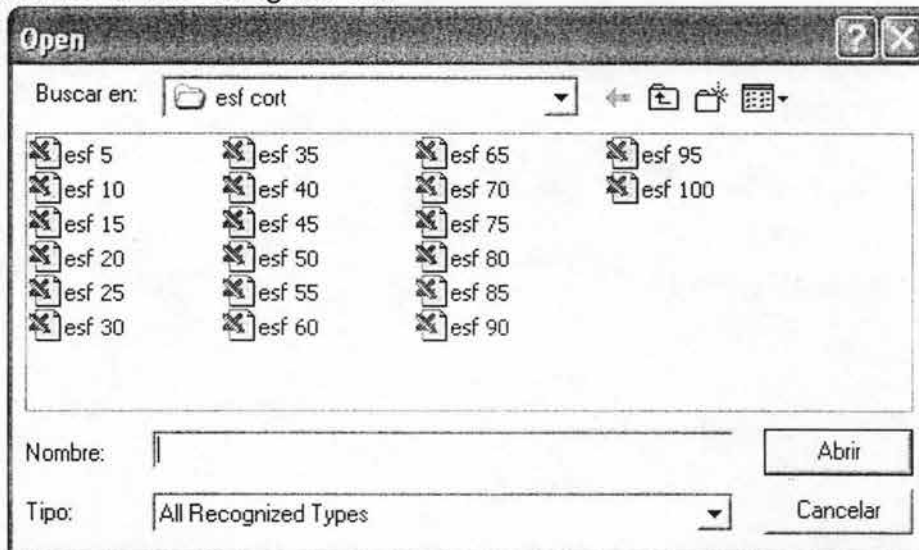


Figura 5.5

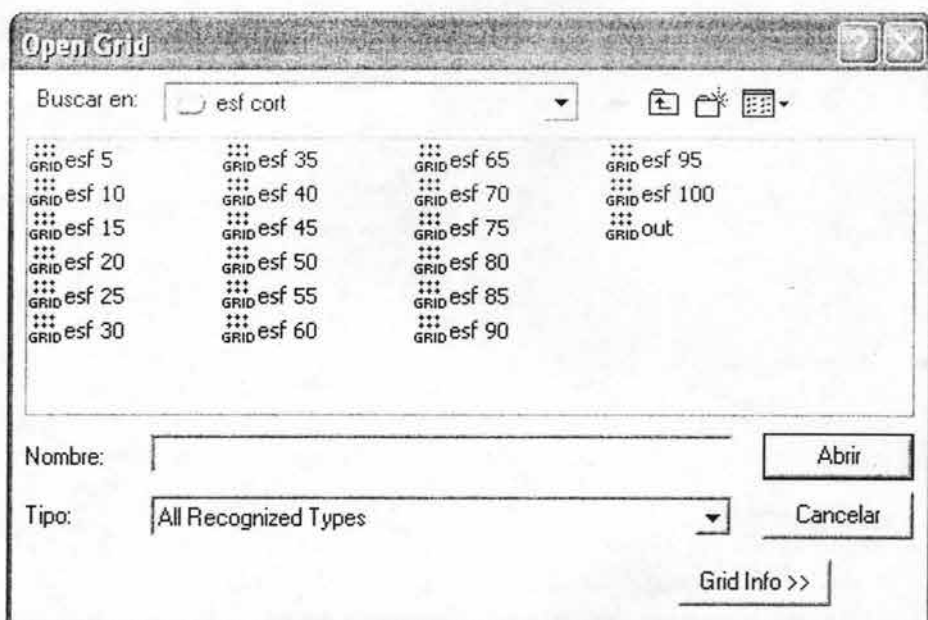


Figura 5.6

En esta ventana se selecciona el archivo creado en Excel, que como se puede observar ya lo creo en un grid. Figura 5.6

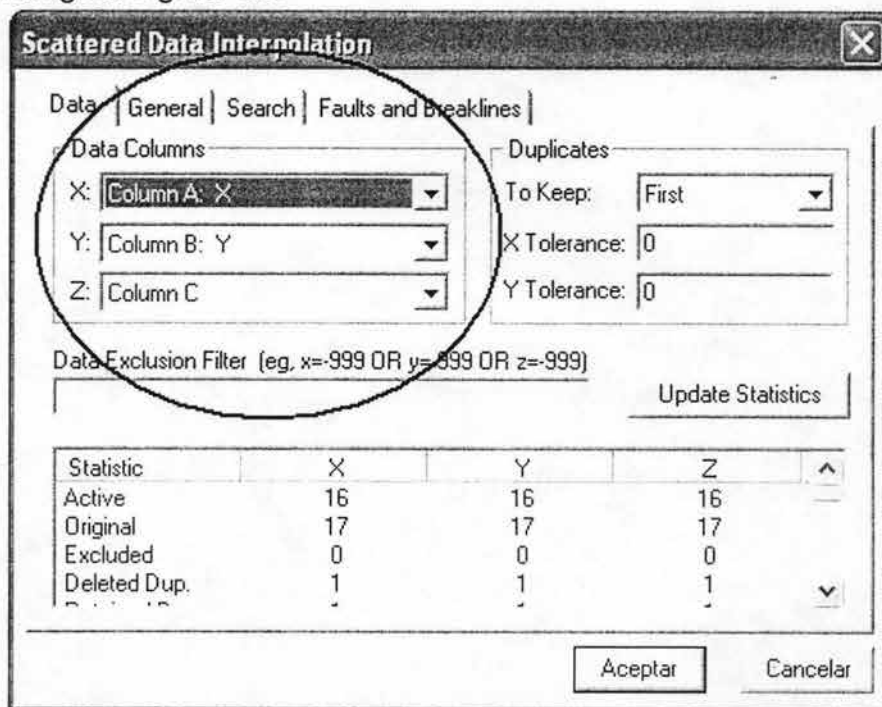


Figura 5.7

Al seleccionar la malla creada se va a desplegar una ventana en la cual encontraremos los datos de las columnas. Figura 5.7.

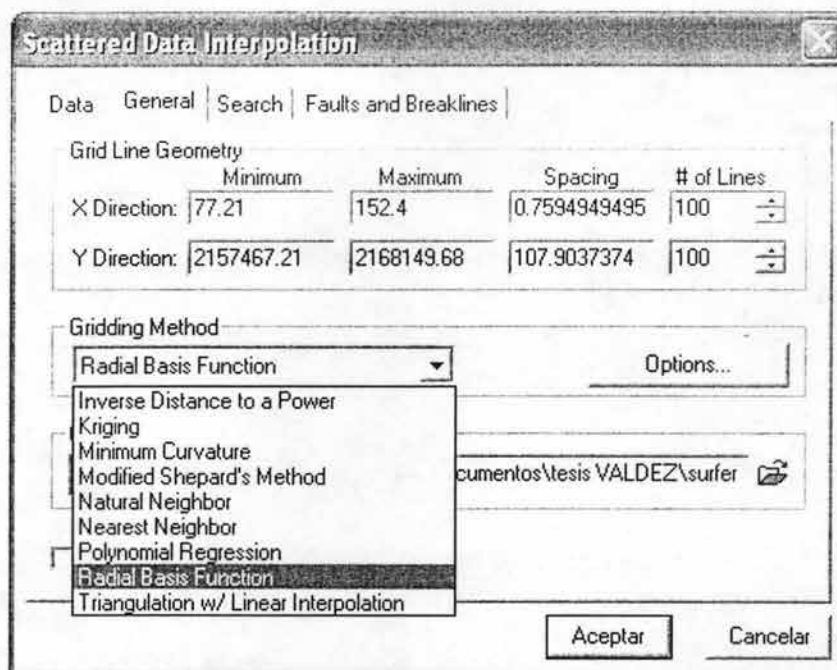


Figura 5.8

Una vez seleccionado las columnas a interpolara se elige el método de interpolación que en este caso es el Radial Basis Function. Figura 5.8

Una vez seleccionado el método, el programa comienza a calcular, y posteriormente se selecciona en la barra de herramientas el item countour map (ver figura 5.9).

Y procederá a dibujar la gráficas de curvas de influencia.

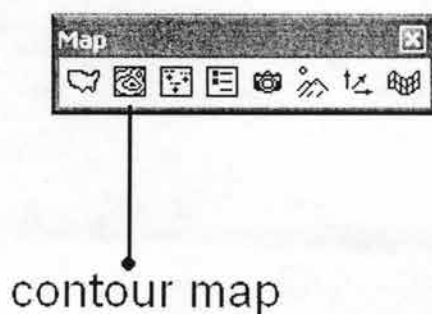
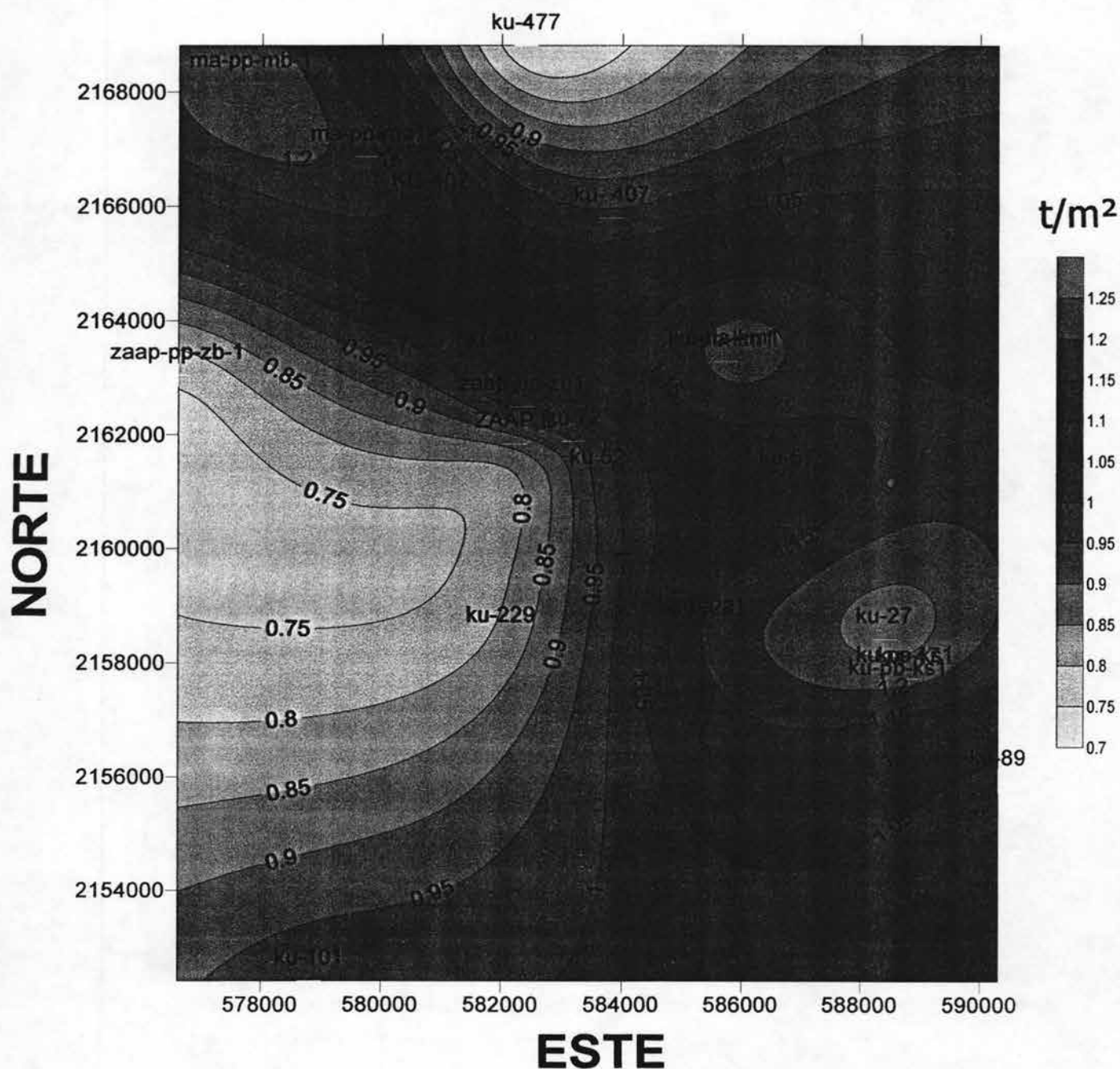


Figura5.9

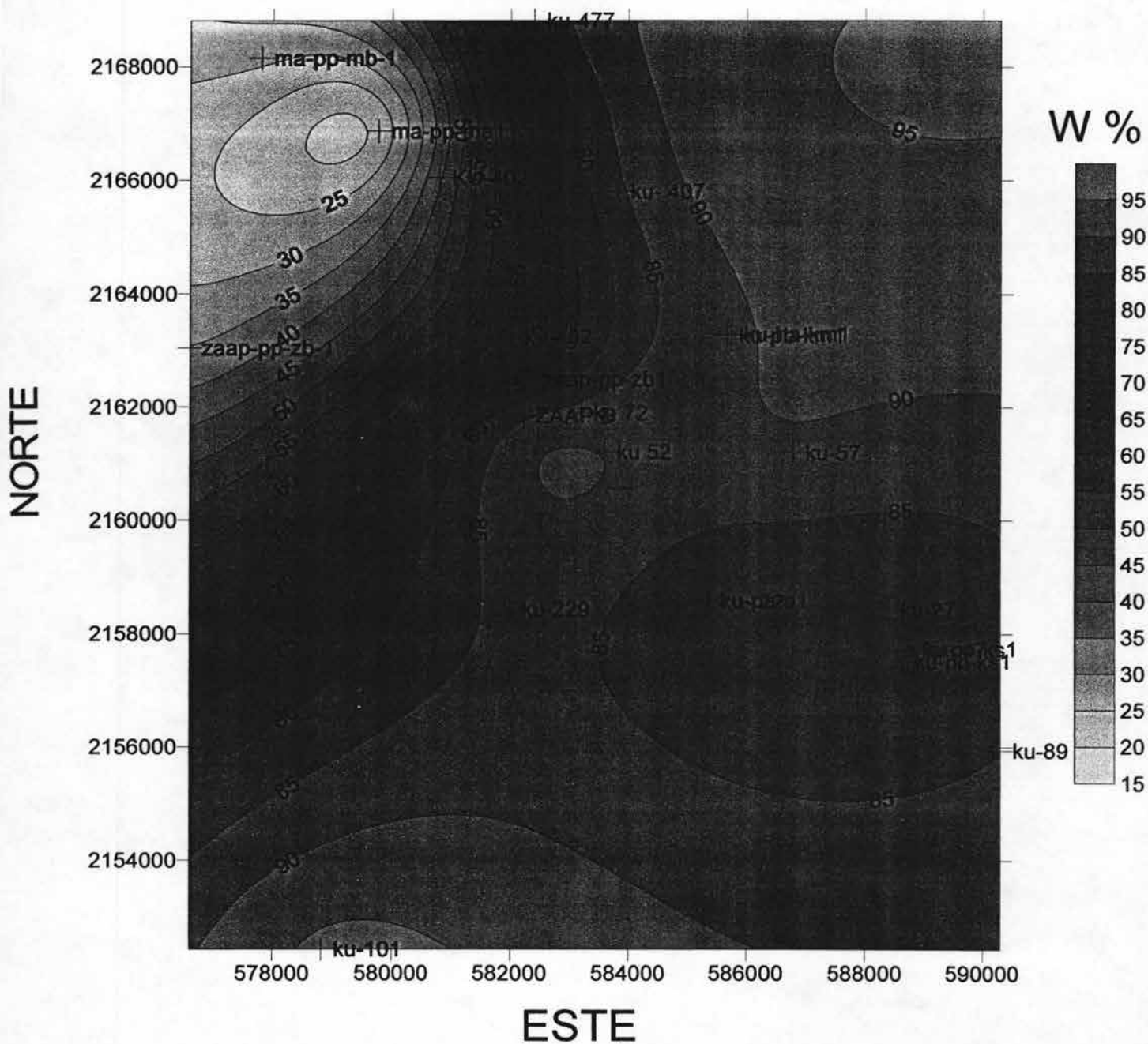
Gráficas de variación de las propiedades del suelo marino a 5 m de profundidad

Para interpretar las graficas se describe de forma breve la grafica 5.13 en la cual se observa que hay zonas en que va decreciendo el esfuerzo cortante, por lo tanto se muestra que del sondeo Ku-52 tiene una resistencia de 0.95 t/m² y va decreciendo hacia el norte donde se encuentra localizado el sondeo Zaap-pp zb-1 que tiene una resistencia de 0.76 t/m².

Esto se presenta a 5 m de profundidad.

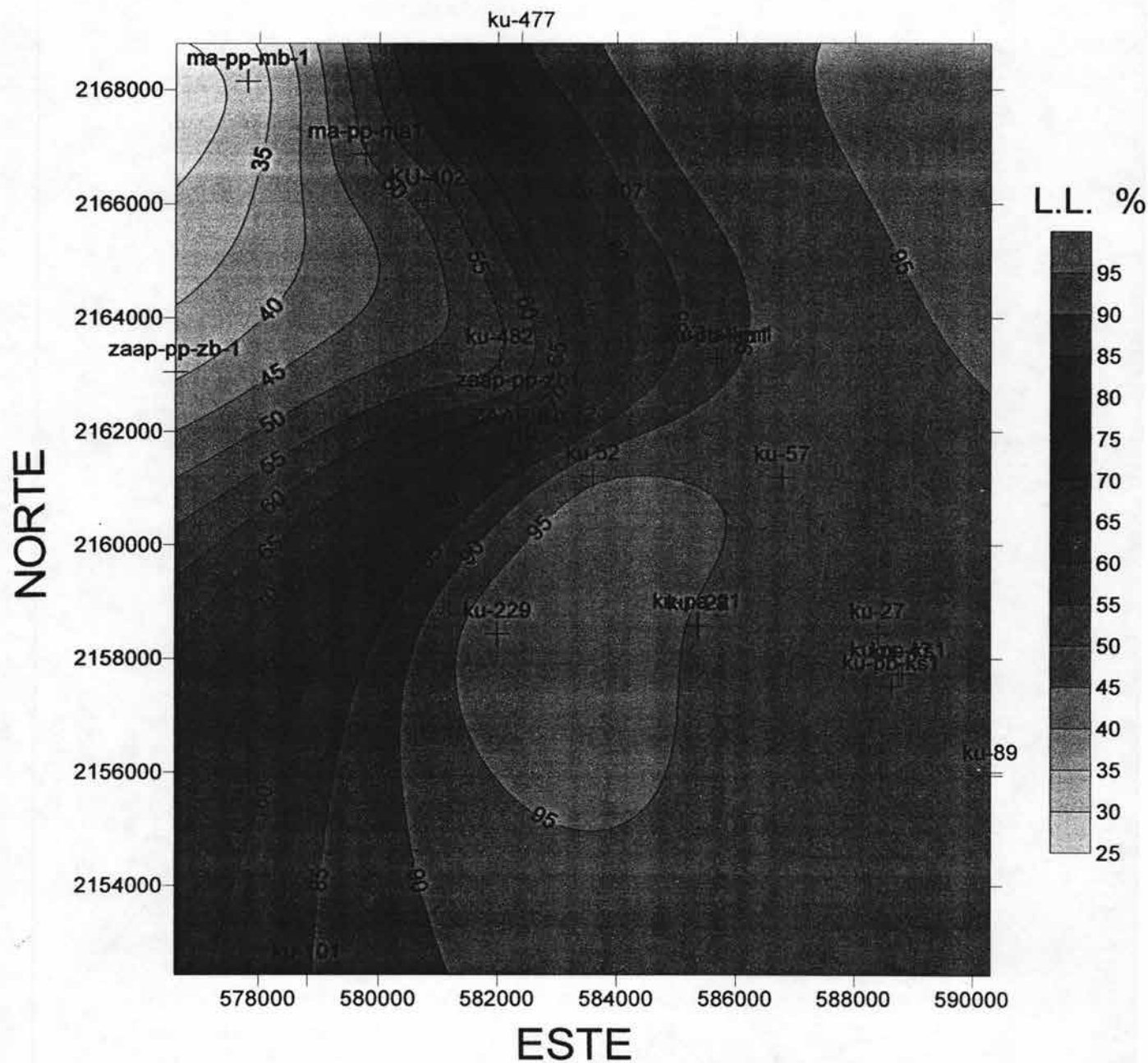


Gráfica 5.13 Variación del esfuerzo cortante a 5 m de profundidad



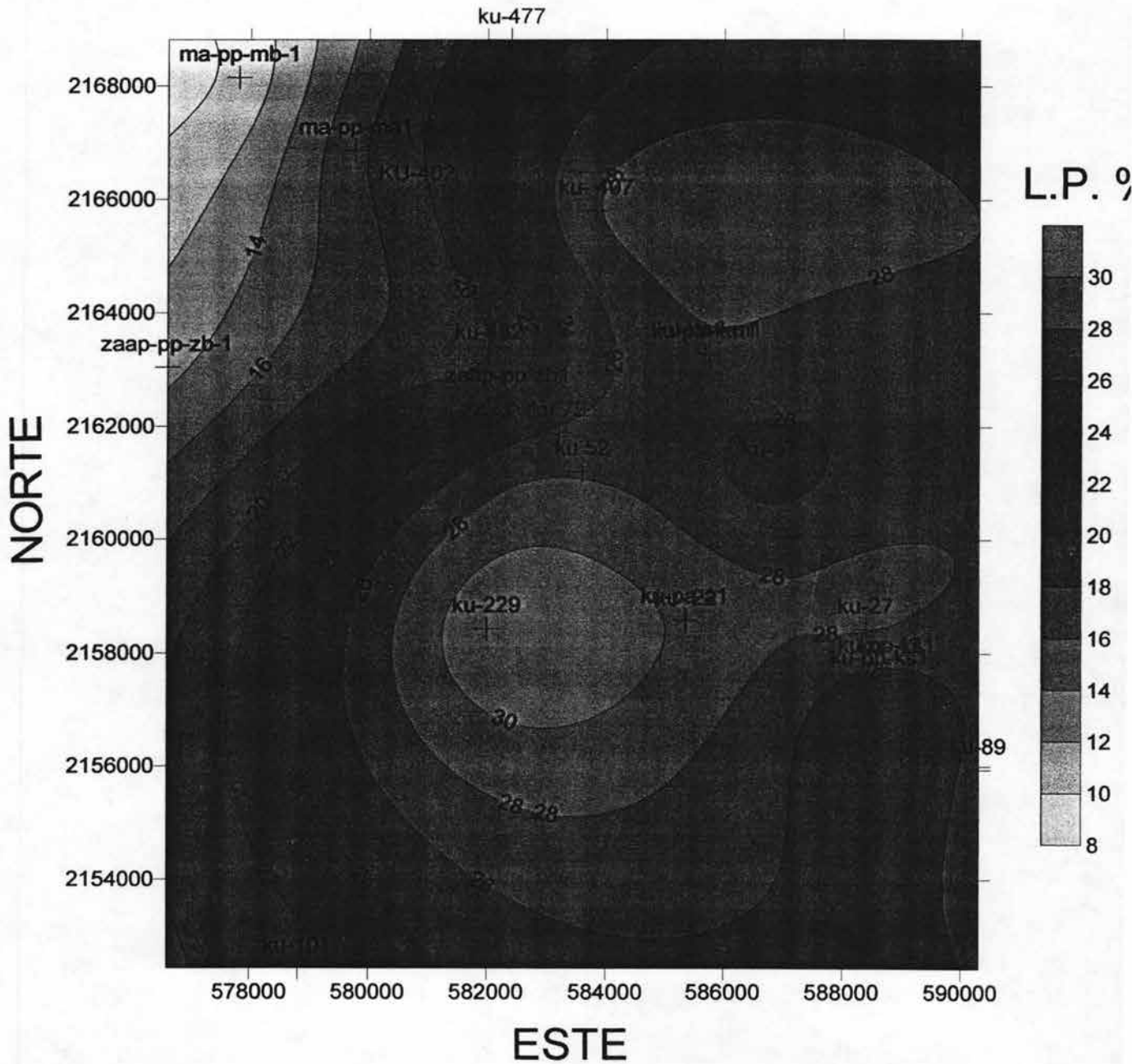
Gráfica 5.14 Variación del contenido de humedad a 5 metros de profundidad.

Variación del límite líquido.



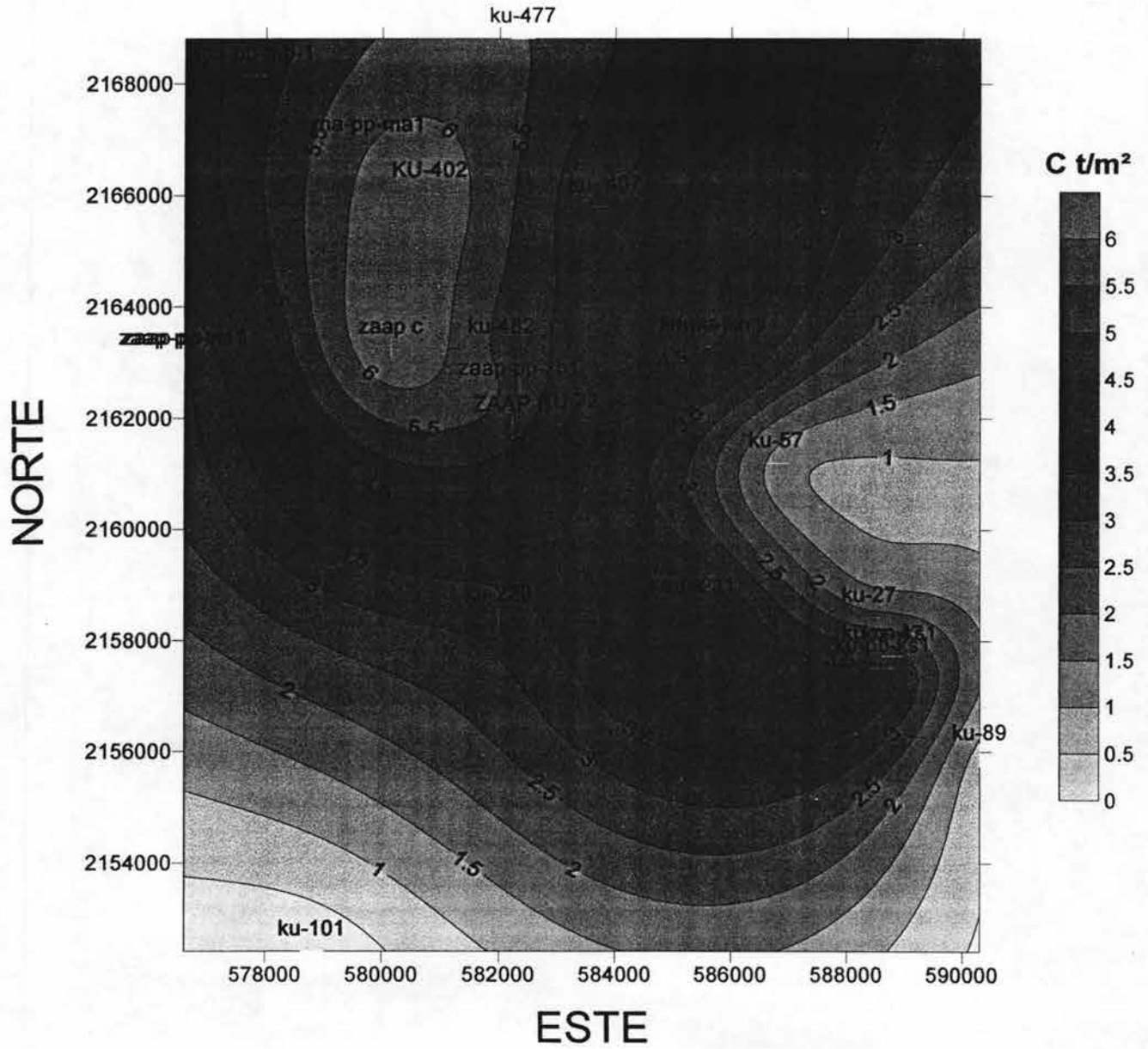
Gráfica 5.15 Variación del límite líquido a 5 m de profundidad

Variación del límite plástico

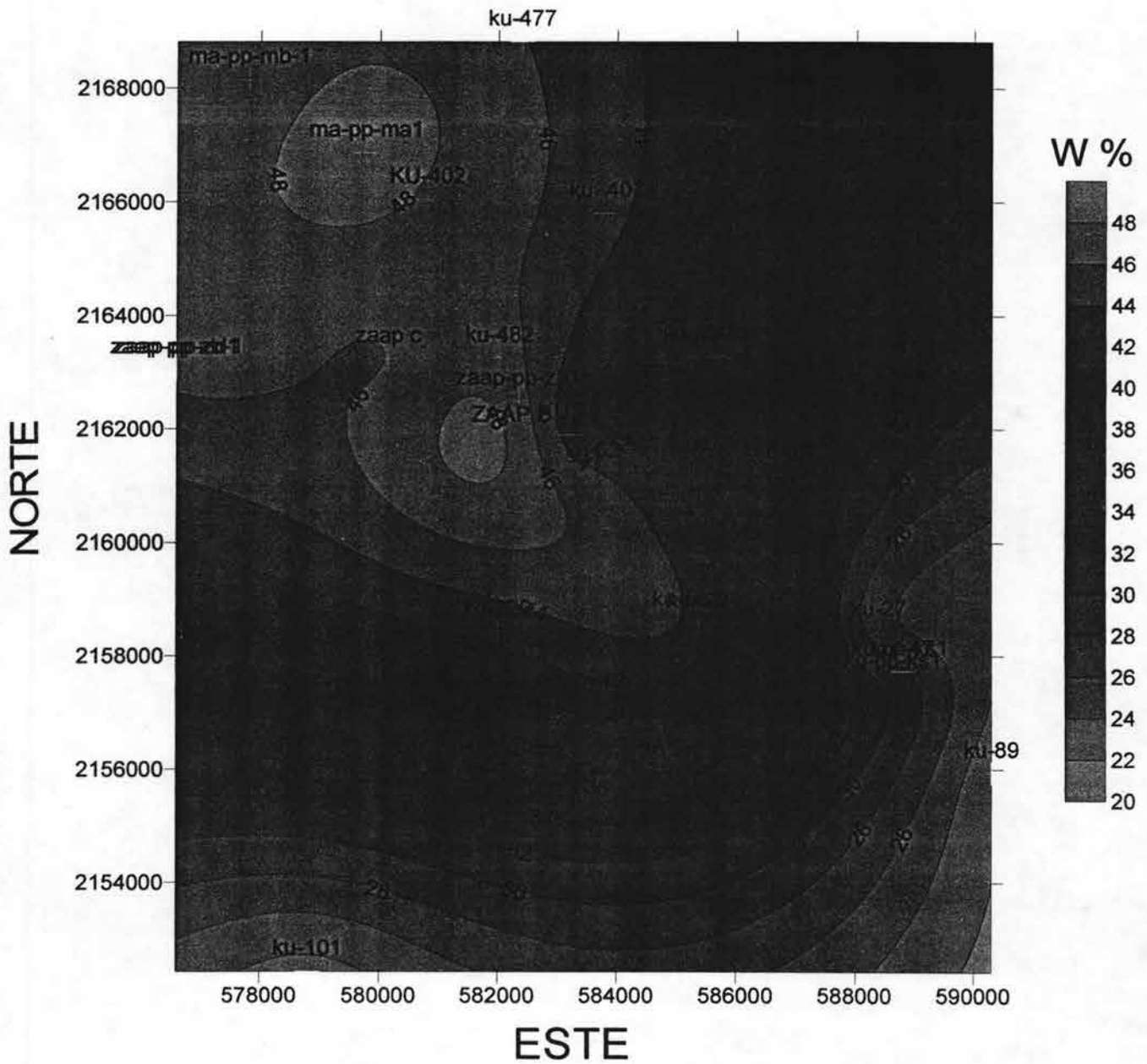


Gráfica 5.16 Variación del límite plástico a 5 m. de profundidad

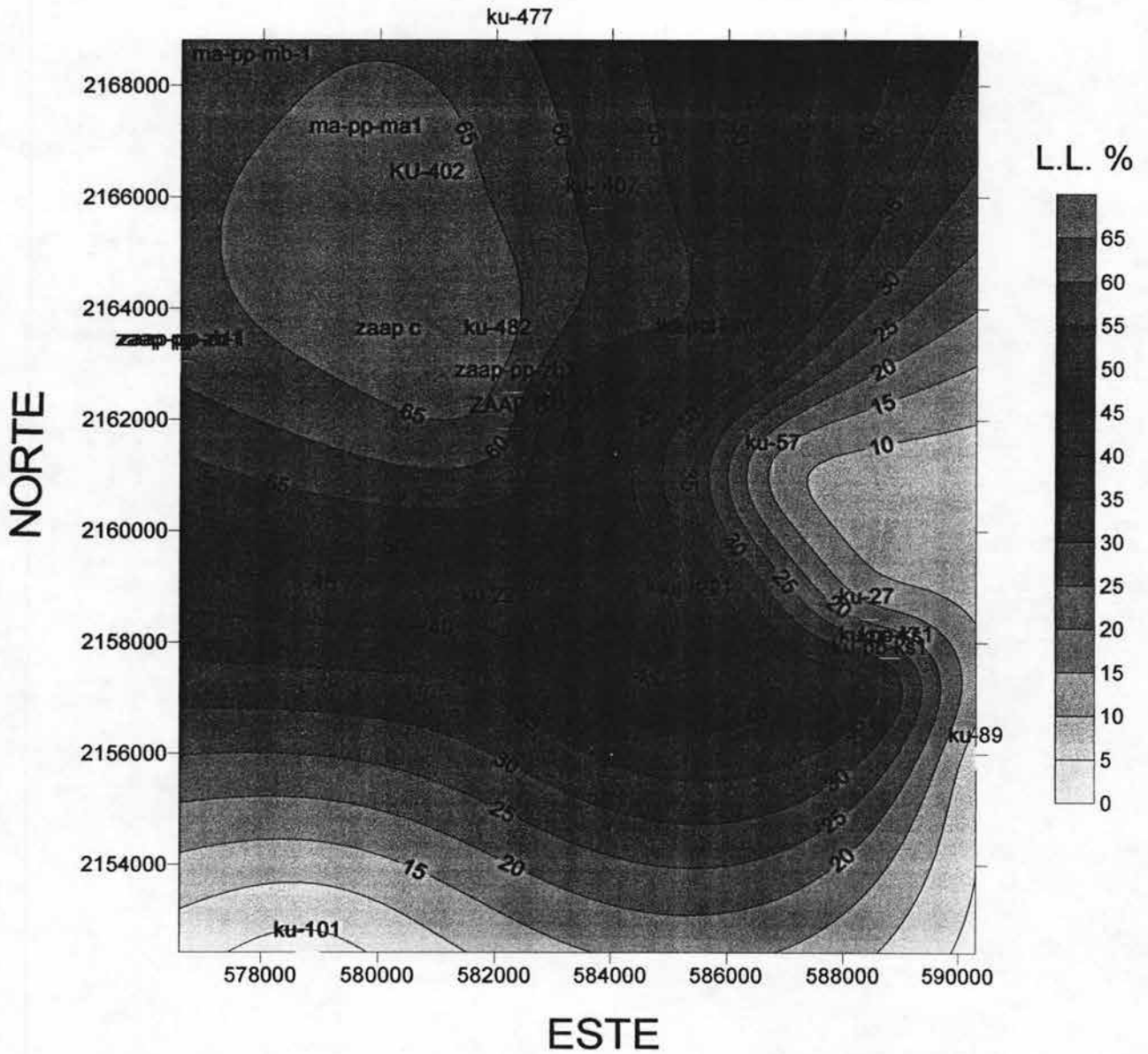
Variación a 20 m. de profundidad



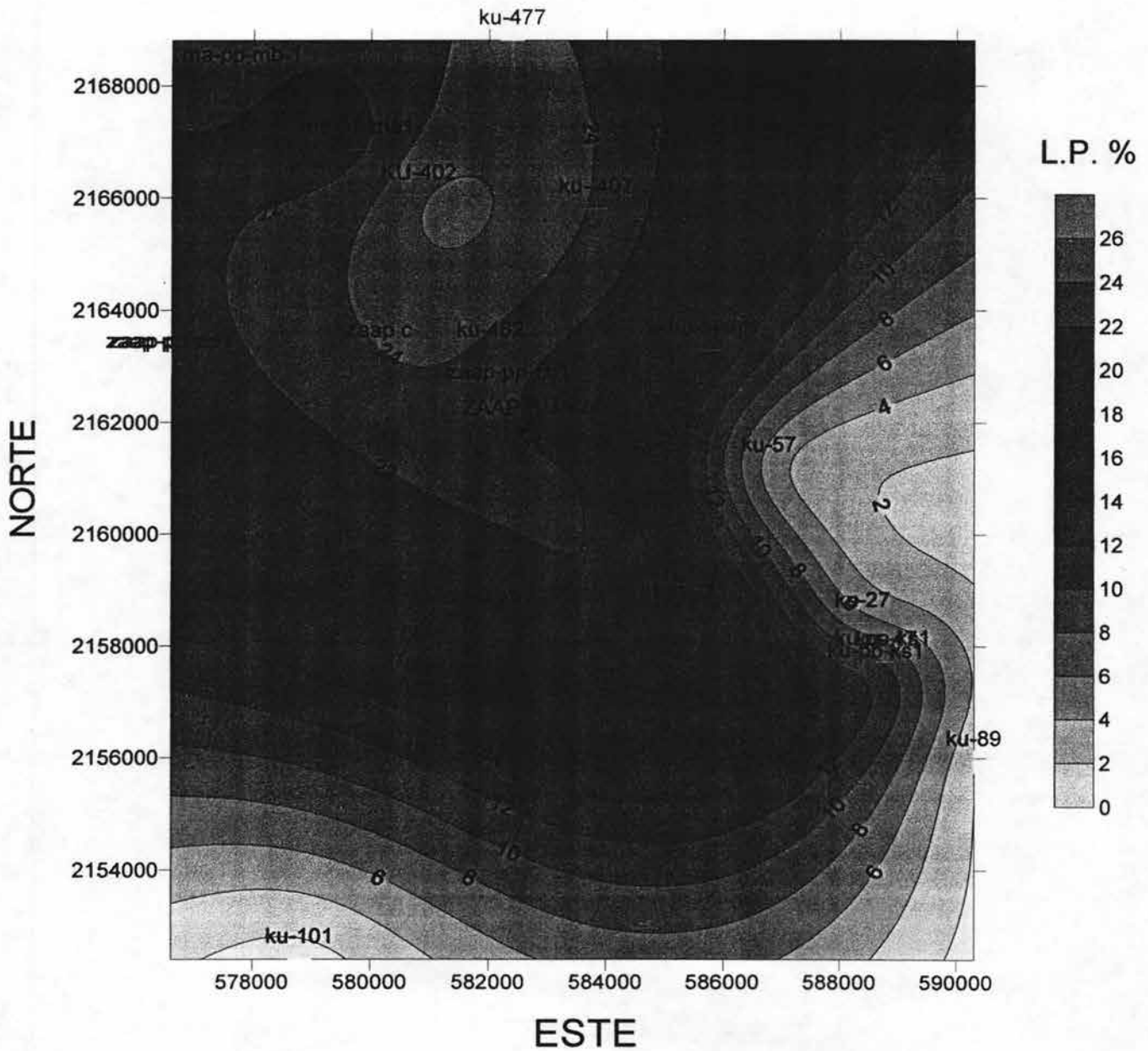
Gráfica 5.17 Variación del contenido del esfuerzo cortante 20 m de Profundidad



Gráfica 5.18 Variación del contenido de humedad a 20 m de profundidad

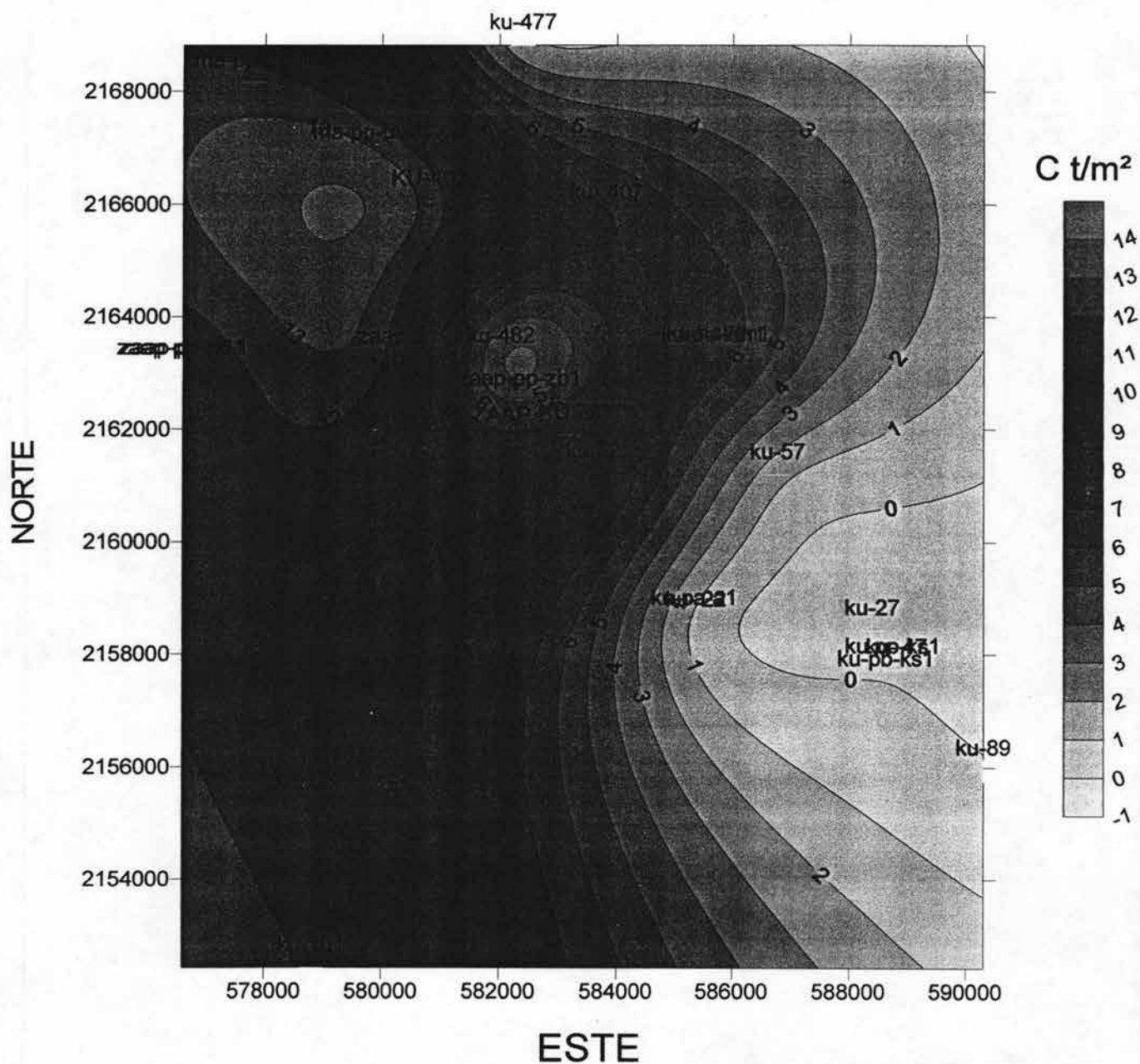


Gráfica 5.19 Variación del límite líquido a 20 m de profundidad

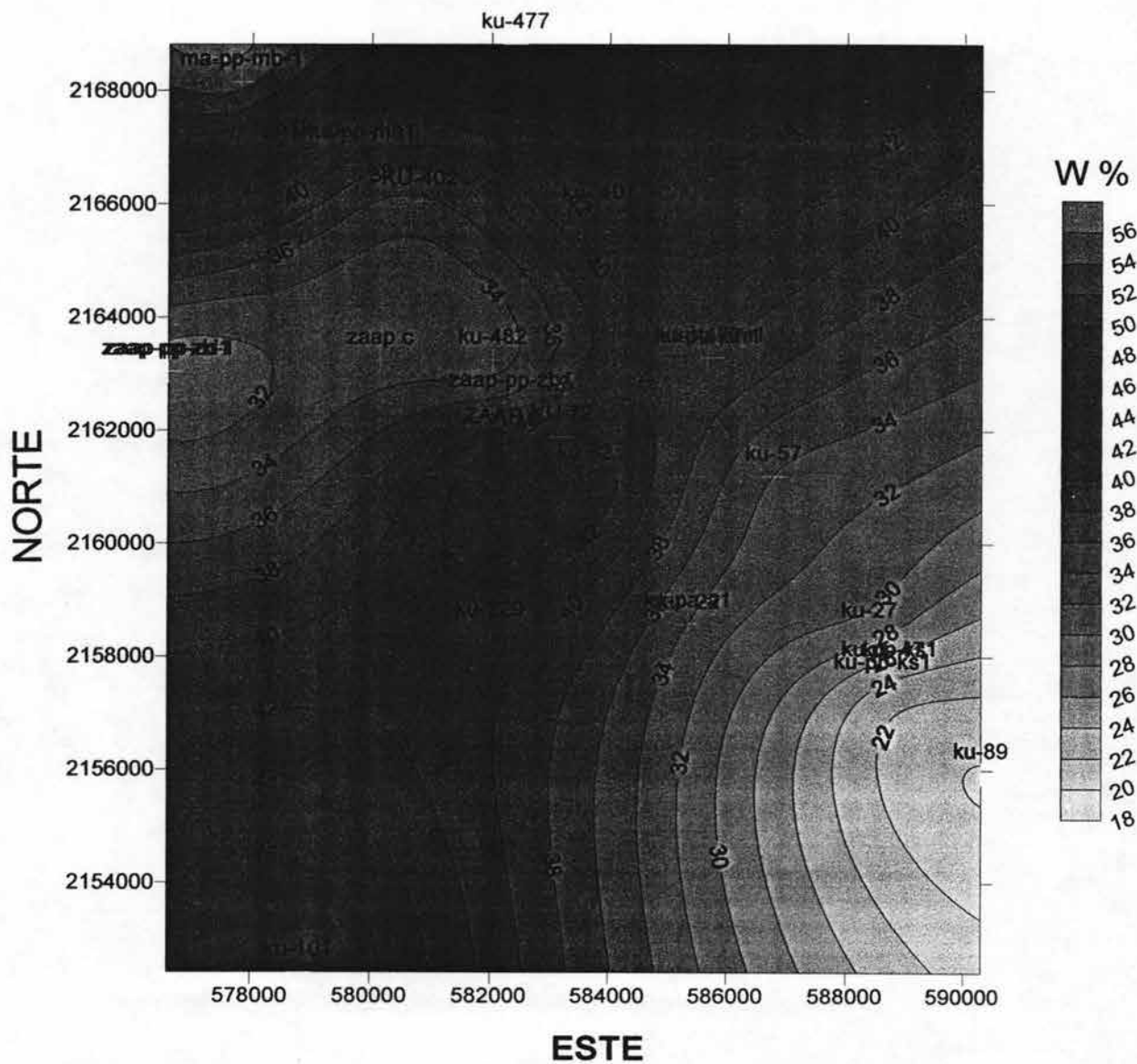


Gráfica 5.20 Variación del límite plástico a 20 m de Profundidad

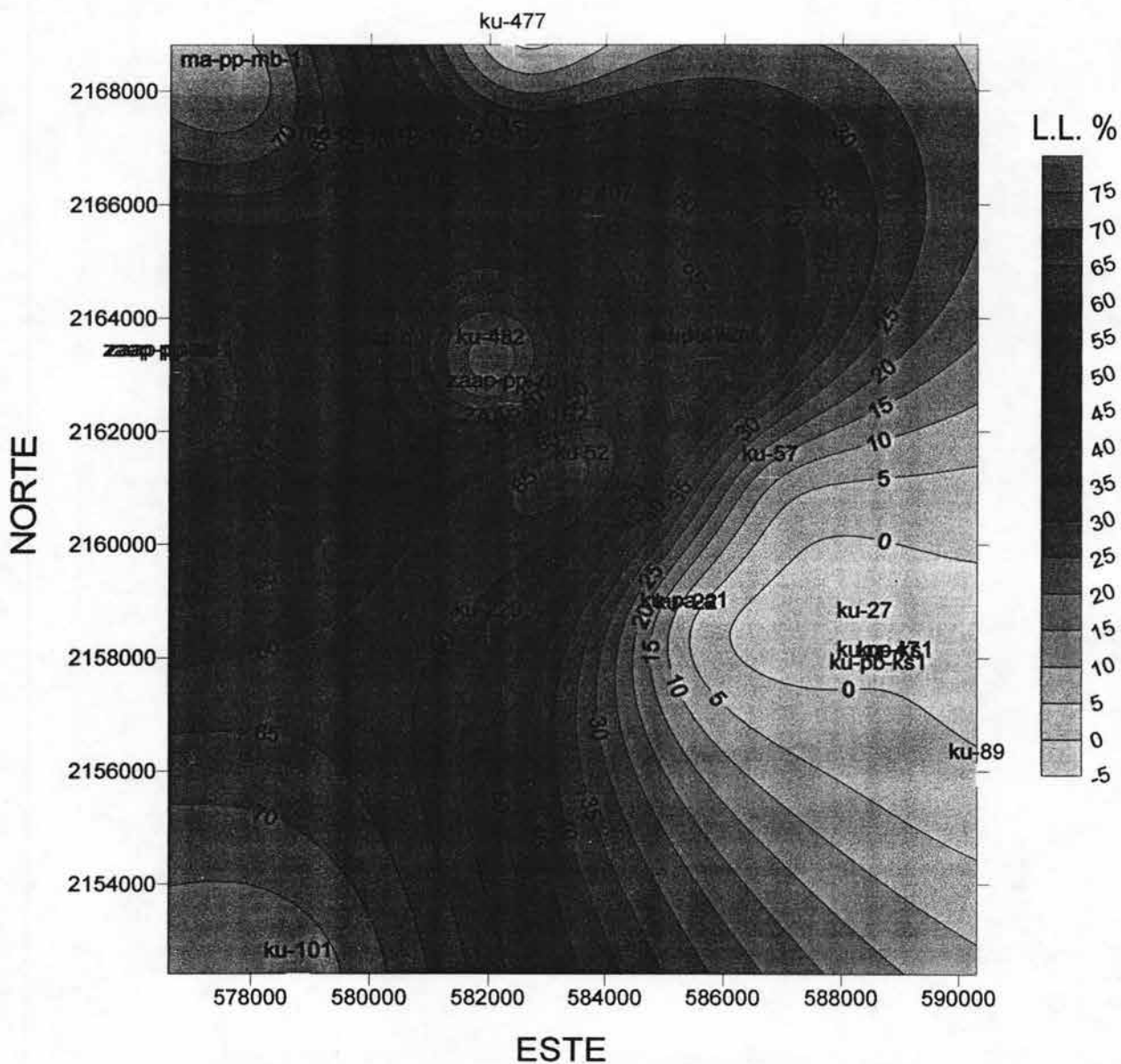
Variación a 50 m de profundidad



Gráfica 5.21 Variación del esfuerzo cortante a 50 m de profundidad

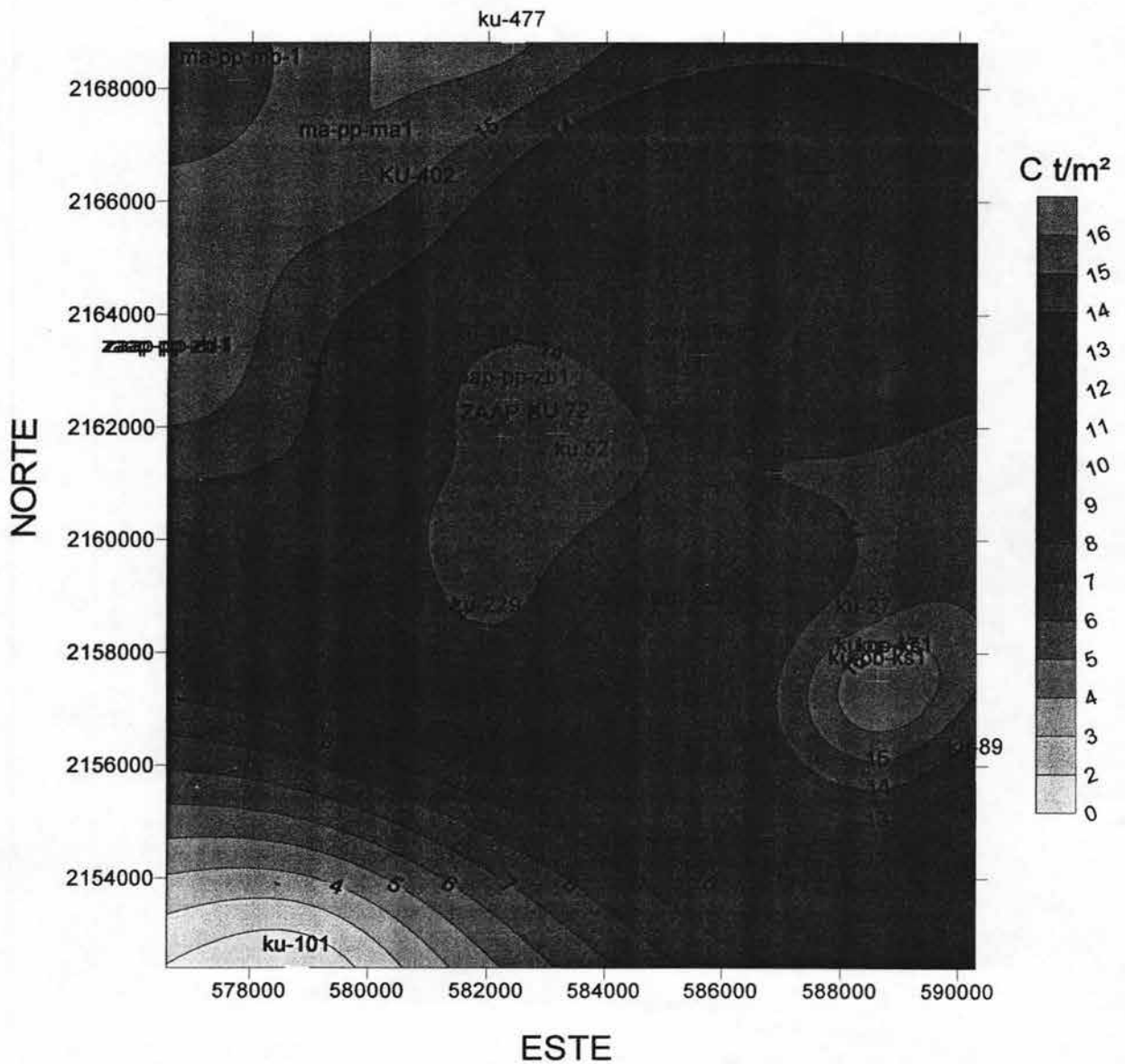


Gráfica 5.22 Variación de contenido de humedad a 50 m de profundidad

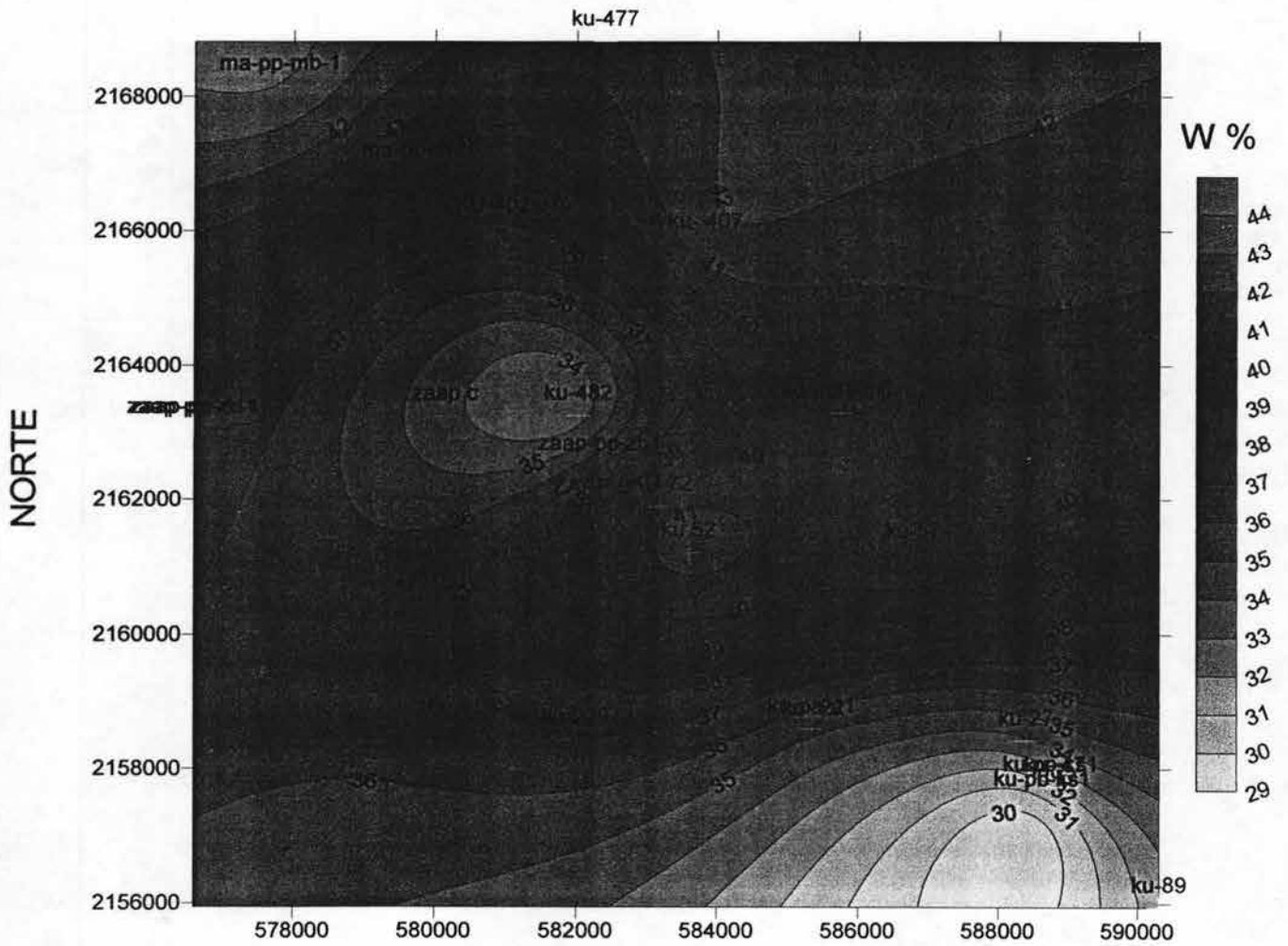


Gráfica 5.23 Variación del límite líquido a 50 m de profundidad

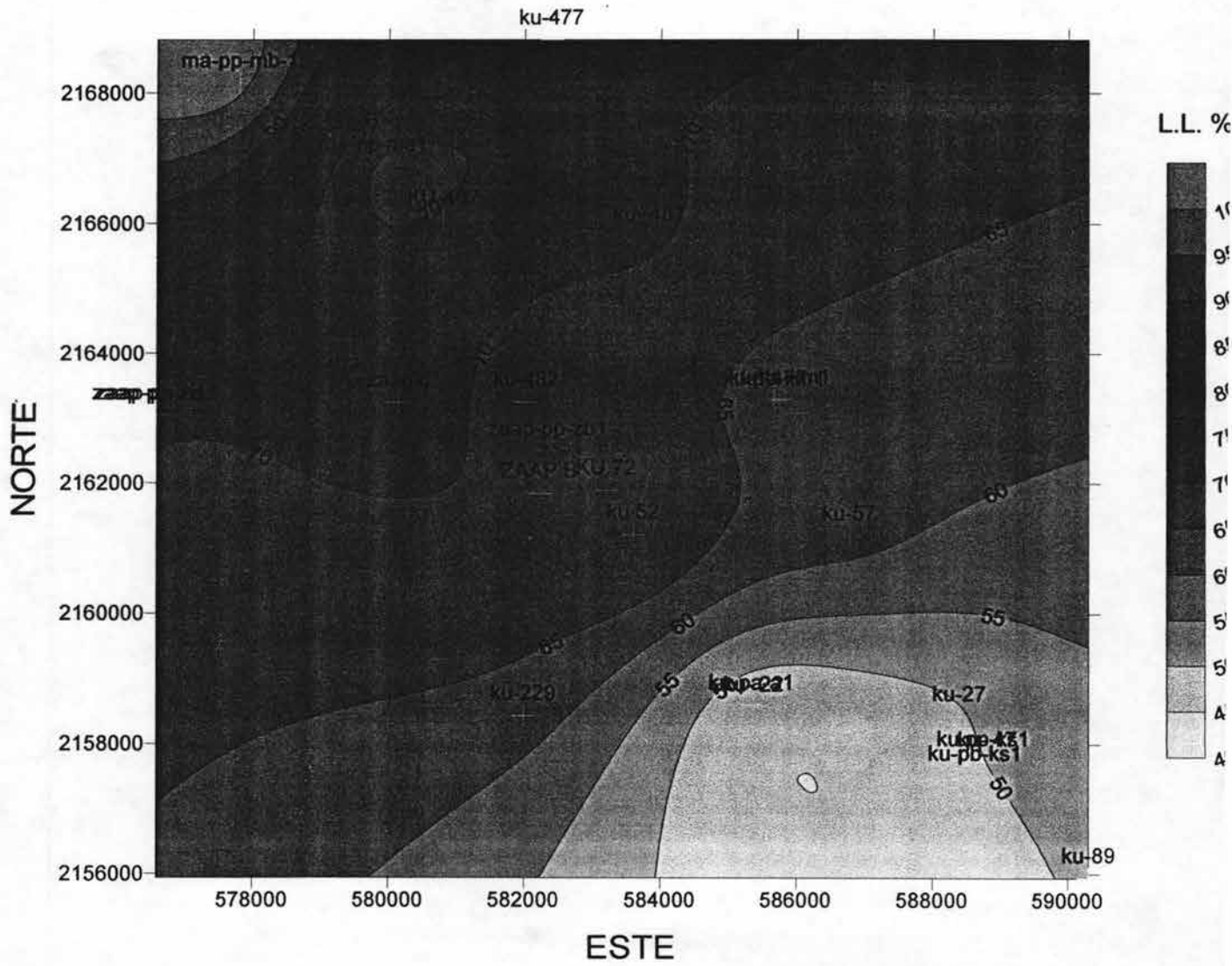
Variación a 80 m de profundidad



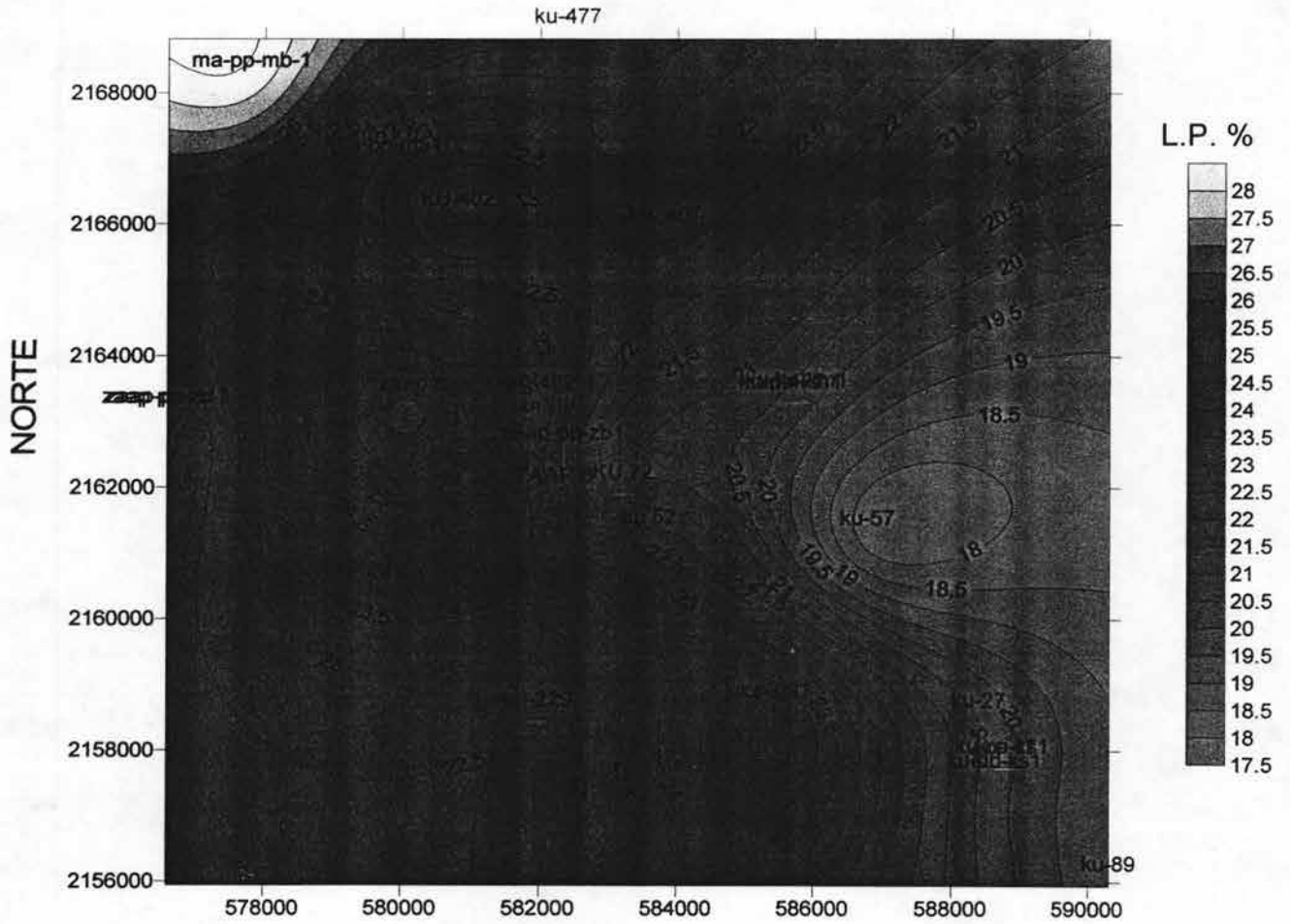
Gráfica 5.25 variación del esfuerzo cortante a 80 m de profundidad



Gráfica 5.26 Variación del contenido de humedad a 80 m de profundidad

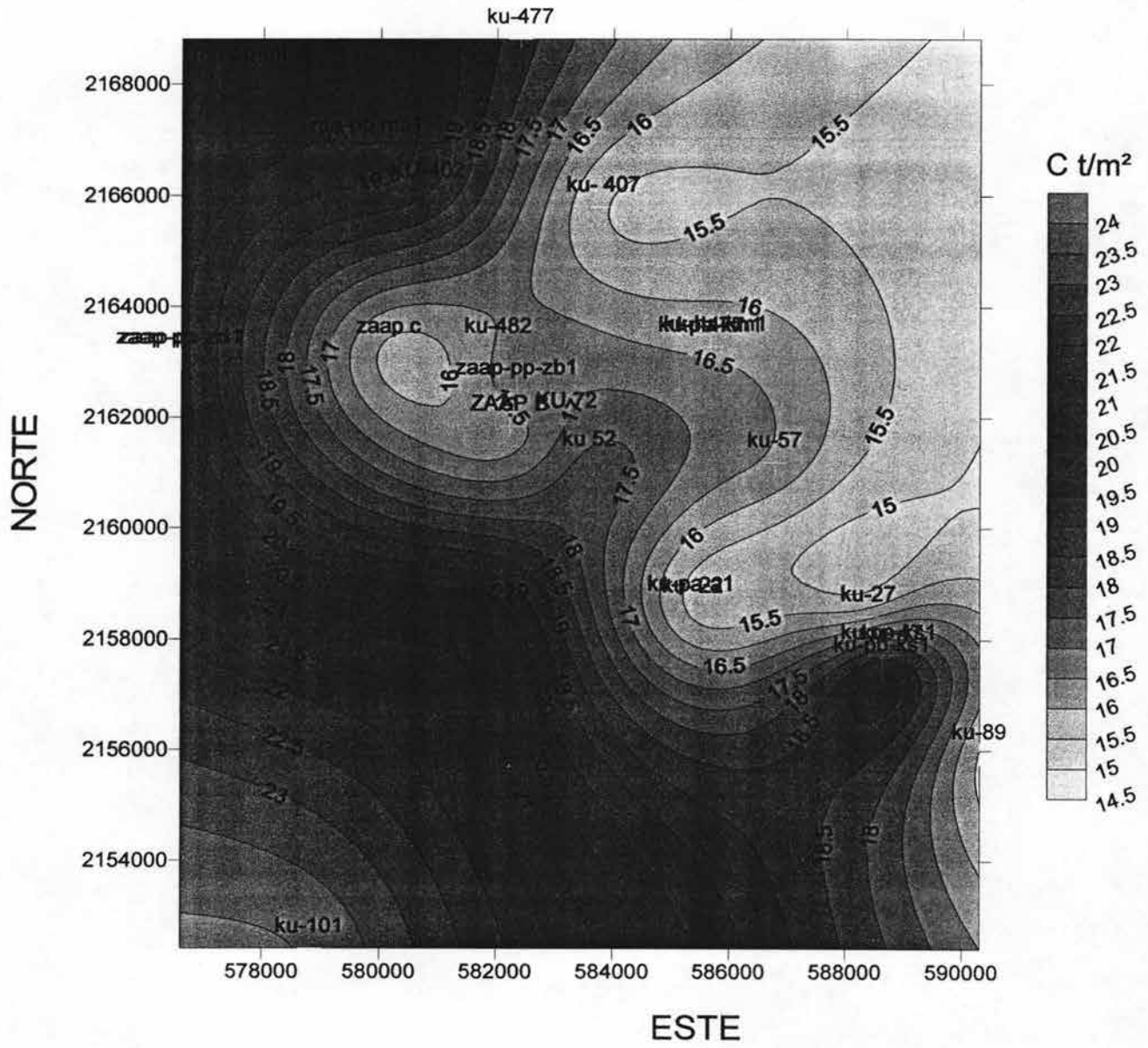


Gráfica 5.27 Variación del límite líquido a 80 m de profundidad

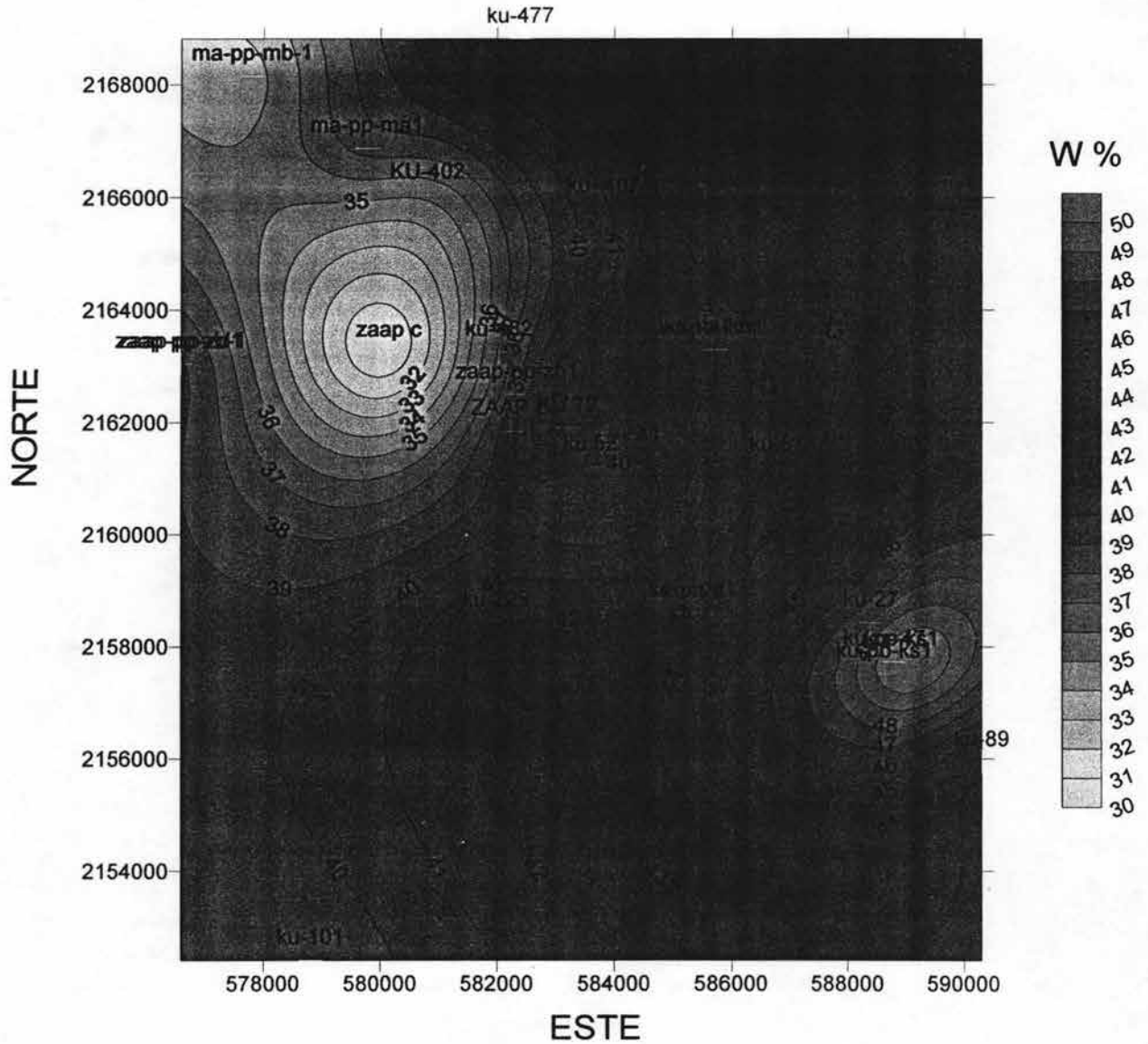


Gráfica 5.28 Variación del límite plástica a 80 m de profundidad

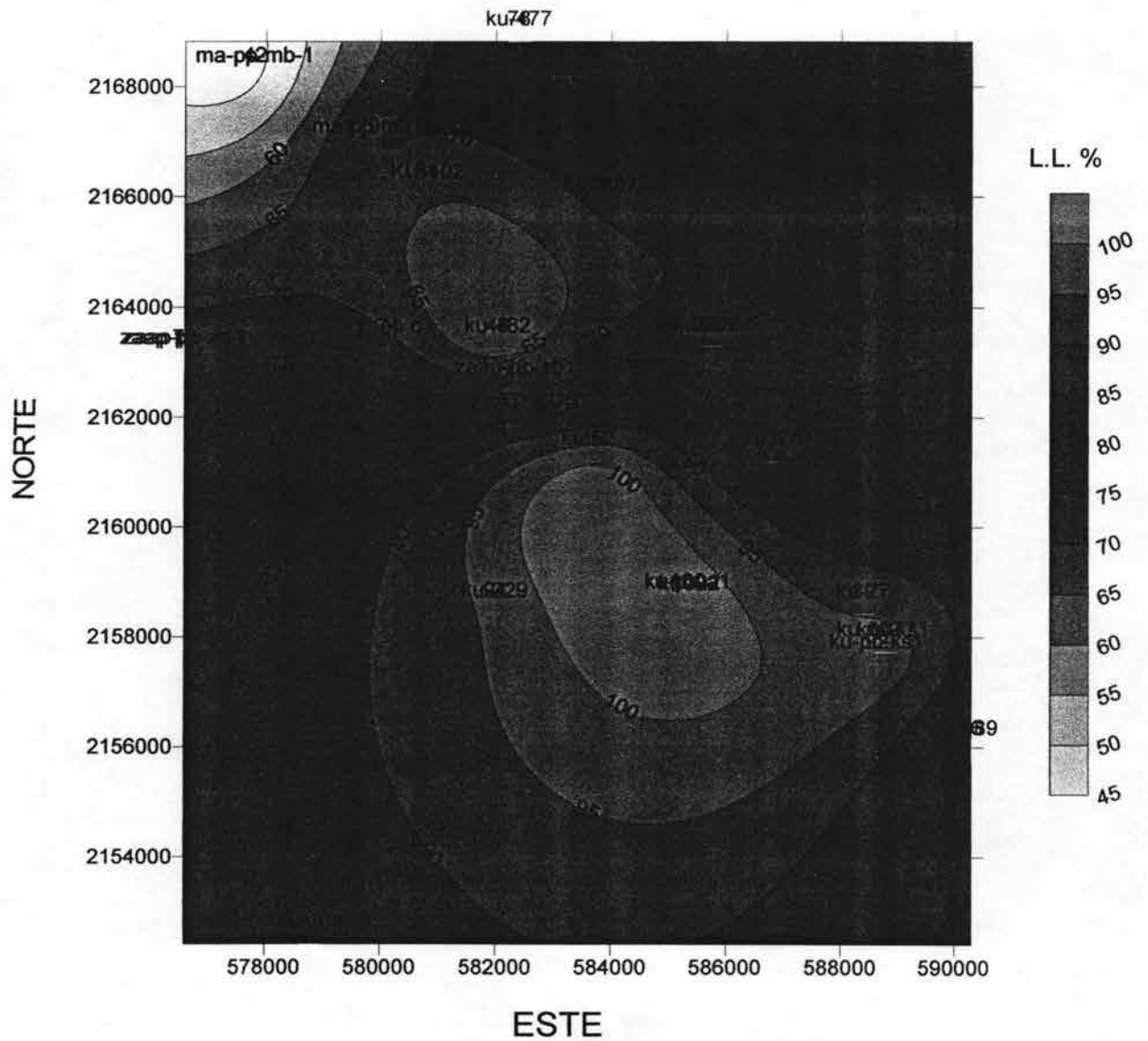
Variación a 100 m de profundidad



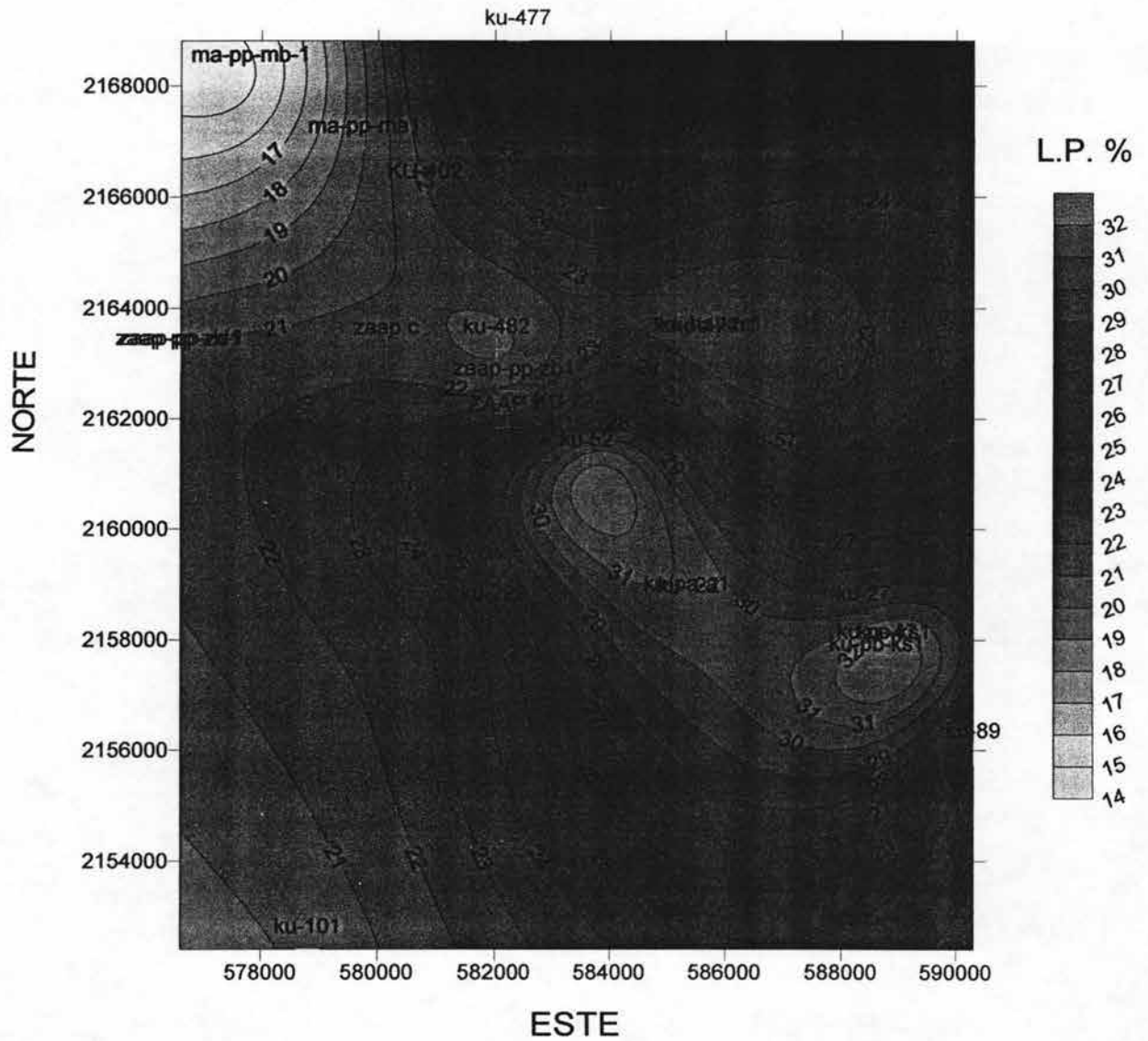
Gráfica 5.29 Variación a 100 m de profundidad.



Gráfica 5.30 Variación del contenido de humedad a 100 m de profundidad



Gráfica 5.31 Variación del límite líquido a 100 m de profundidad



Gráfica 5.32 Variación del límite plástico a 100 m de profundidad

CONCLUSIONES

De la información geofísica y geotécnica, se pudo observar que Ku-Maloob-Zaap es una zona en la que se manifiestan formaciones arrecifales, tanto sepultadas como aflorantes, esto da como consecuencia que no se sabe en ciencia cierta la continuidad de la estratigrafía, esto debido a la presencia de estas formaciones.

Asimismo, en algunos sitios se presentan riesgos geológicos como son formaciones de gas y fallas normales que estas se presentan desde el lecho marino hasta profundidades del orden de 150 m de profundidad.

Tomando en cuenta lo anterior no es posible poder realizar en su totalidad el objetivo de la investigación planteada al inicio de este trabajo, que fue la aplicación de la Geoestadística, ya que al estar buscando un modelo que se ajuste a las necesidades del proyecto, no es posible por las siguientes características:

- Los sondeos se encuentran muy separados.
- Pocos sondeos en el área Ku-Maloob-Zaap
- El método utilizado en la recuperación de las muestras por las campañas geotécnicas no es uniforme.
- Variación de propiedades

El último punto se refiere a que el método de recuperación de las muestras no es el mismo que se realiza en la actualidad, al principio se realizaba por medio de percusión y en la actualidad se determina mediante presión. Esta diferencia en los métodos hace varíen en las propiedades tanto físicas como mecánicas.

La generación de gráficas y curvas de influencia permite observar la variación de las propiedades índice y mecánicas, en la separación de los estudios geotécnicos, dichas curvas de construyeron con el método de interpolación Radial Basis Function que es un método que se aproxima mejor a los resultados..

Teniendo en cuenta que el análisis Geoestadístico, es una herramienta muy útil para aplicaciones de variación de las propiedades índice y mecánicas, no solo se limita en la aplicación de este trabajo sino que se que ha tomado auge en otras aplicaciones de ciencias de la tierra. Con esta herramienta resulta que si es posible encontrar valores desconocidos a partir de los conocidos.

RECOMENDACIONES

Para análisis estructurales preeliminares de cimentaciones para plataformas marinas en el área Ku-Maloob-Zaap se recomienda apoyarse en las gráficas presentadas en el capítulo 5, en el cual nos muestra la variación y el comportamiento de las propiedades índice y mecánicas.

Para el caso de sondeos geotécnicos es recomendable efectuarlos cerca y no tan distante de los sondeos realizados. Sin embargo sabemos que la distribución de los sondeos depende de las necesidades de explotación de PEP.

Uniformizar la metodología de exploración y muestreo utilizadas por las diferentes compañías encargadas de los estudios geotécnicos para evitar variaciones importantes en los resultados de dichos estudios geotécnicos.

BIBLIOGRAFIA

- Dr. Jaime Nuñez F. "INTRODUCCIÓN A LA GEOESTADISTICA" (IMP)
Instituto Mexicano del Petróleo, México DF.
- G. Auvinet "CONFIABILIDAD Y ANALISIS DE RIESGO EN GEOTECNIA"
Facultad de ingeniería UNAM DEP. SECCION MECANICA DE SUELOS
- Lászlo Réth "PROBABILISTIC SOLUTIONS IN GEOTECHNICS" Elsevier
- Montgomery Runger "PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA APLICADAS A LA INGENIERIA" Limusa
- Morris H. DeGroot "PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA"
- PEMEX "GEOTECNIA MARINA EN LA SONDA DE CAMPECHE"
Dirección de Proyecto y Construcción de Obras.
- López Ramos E. "GEOLOGIA DE MEXICO (1981)" Tomo III 3ª. Edición,
México DF.
- Ing. Eduardo Martínez "CURSO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA" SMMR
- Ing. José Quintín Cuador Gil "LA GEOESTADISTICA SU SURGIMIENTO Y SU EVALUACIÓN" Universidad de Pinar del Río, Cuba.
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística <http://www.inegi.gov.mx>
- Auvinet, G., 1975, "PROBABILIDAD Y ESTADISTICA", Apuntes para estudiantes del curso, División de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, Biblioteca DEPMI, México
- Medina Zetina, Z y Auvinet Guichard, G." APPLICATION OF GEOSTATICAL METHODS TO INTERPRETATION OF GEOTECHNICAL EXPLORATION RESULTS" XX Reunión Nacional de Mecánica de suelos Oaxaca México