

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



**MODELAMIENTO GEOLÓGICO Y VARIABILIDAD ESPACIAL  
DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA MECÁNICA DEL  
SUBSUELO DE LA PLANTA NUCLEAR ANGRA 2, BRASIL**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO GEÓLOGO

PRESENTADO POR

**BETZABE YAJAIRA TAFUR BORJAS**

LIMA – PERÚ

2010

## **Agradecimientos**

A Dios por iluminar cada uno de mis días y por su infinita bondad.

A mis padres por el amor, cariño y por todo el apoyo incondicional.

A mi novio Enrique, compañero y amigo por su apoyo, comprensión y cariño.

A la profesora Graciela Gonzales, por su valiosa orientación y ayuda en el desenvolvimiento de este trabajo.

Al Ingeniero Víctor Sanz, por sus consejos y orientación para el desarrollo de este trabajo.

A la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la FIGMM – Universidad Nacional de Ingeniería.

## INDICE

Resumen	9
CAPITULO I: Introducción	10
1.1 Objetivos	11
1.2 Organización de la Tesis	11
1.3 Aspectos Generales	12
1.3.1 Ubicación	12
1.3.2 Clima	15
1.3.3 Aguas Subterráneas	15
CAPITULO II: Geología del Area de Estudio	16
2.1 Geología Histórica	16
2.2 Geología Local	17
2.2.1 Unidades Litoestratigráficas	22
2.3 Geomorfología	26
CAPITULO III: Fundamentos Teóricos para las Investigaciones y Evaluaciones Geológicas-Geotecnicas	29
3.1 Análisis Estadístico	29
3.1.1 Estadística Descriptiva	30
3.1.2 Modelos de Distribución de Probabilidades	33
3.2 Análisis Geoestadístico	34
3.2.1 Análisis de la Variabilidad Espacial	34
3.2.2 Estimaciones Clásicas	45
3.3 Análisis de la Resistencia de Suelos	48
3.3.1 Criterio de Ruptura Mohr-Coulomb	50
3.3.2 Ensayo de Penetración Estándar (SPT)	53
3.3.3 Obtención de Parámetros Geotécnicos a Partir de Correlaciones Empíricas	57

3.4	Descripción y Clasificación de Suelos	62
3.4.1	Clasificaciones Geotécnicas	64
3.5	Datos Estructurales de la Planta Nuclear	67
CAPITULO IV: Investigación y Evaluación Geológica-Geotecnica del Area Angra 2, Planta Nuclear de Generación de Energia Eléctrica		68
4.1	Investigación del Subsuelo	68
4.1.1	Modelamiento Geológico	68
4.1.2	Propiedades y Parámetros de Resistencia del Suelo	82
4.2	Estadística de los Ensayos SPT	86
4.2.1	Estadística Descriptiva	86
4.3	Geoestadística y Variabilidad Espacial de los Parámetros de Resistencia del Subsuelo	91
4.3.1	Cálculo de los variogramas Direccionales por Litología	91
4.3.2	Modelamiento de Variogramas Experimentales	92
4.3.3	Obtención del Elipsoide de Influencia	103
4.4	Análisis de los Resultados	105
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		111
BIBLIOGRAFIA		114
ANEXOS		

## Lista de Figuras

Figura 1 -	Mapa índice de Brasil	13
Figura 2 -	Vista Aérea Mostrando la Ubicación de la Planta Nuclear Angra 2 en el Estado de Río de Janeiro-Brasil	13
Figura 3 -	Vista Panorámica Actual de la Planta Nuclear Angra 2-Río de Janeiro	14
Figura 4 -	Elevación del Nivel de Mar por Procesos Transgresivos	19
Figura 5 -	Sección Geológica 01 de Angra 2 RJ-Brasil, Rodrigues (1999)	20
Figura 6 -	Sección Geológica 02 de Angra 2 RJ-Brasil, Rodrigues (1999)	21
Figura 7 -	Sección Geológica 03 de Angra 2 RJ-Brasil, Rodrigues (1999)	21
Figura 8 -	Columna Estratigráfica del Area de Estudio	22
Figura 9 -	Vista Panorámica Actual de la Playa Itaorna	27
Figura 10 -	Formación de Suelos	28
Figura 11 -	Comportamiento de las Medidas de Correlación $\tilde{C}(h)$ , $\tilde{\rho}(h)$ , $z\tilde{\gamma}(h)$ , de una Variable Aleatoria $V(x)$	38
Figura 12 -	Esquema Básico de una Función Variograma	39
Figura 13 -	Características del Variograma	41
Figura 14 -	Tipos de Anisotropía Variográfica: a) Geométrica, b) Zonal	42
Figura 15 -	Modelos Variográficos con Meseta	43
Figura 16 -	Modelo Aleatorio	45
Figura 17 -	Potencia $\beta$ del Método IQD (Villanueva, 2000)	46
Figura 18 -	Comparación entre el Kriging Ordinario (KO) y el Inverso Cuadrado de la Distancia (IQD)	47
Figura 19 -	Transmisión de Fuerzas entre Partículas de Arenas y Arcillas (Sousa, 2002)	49
Figura 20 -	La Envolvente de Ruptura y el Círculo de Mohr. Estados Posibles (a y b) e Imposibles (c). González (2009)	52
Figura 21 -	Envolvente de Ruptura para Diferente Tipo de suelos	53
Figura 22 -	Equipo de SPT	55
Figura 23 -	Esquema de Realización del Ensayo	55

Figura 24 - Relación Entre el N° de Golpes (SPT) y la Densidad Relativa Schutze y Meyer (1965)	58
Figura 25 - Círculo de Mohr-Coulomb	60
Figura 26 - Relación entre N° de Golpes (SPT) y la Cohesión Cu	61
Figura 27 - Suelos en Función de su Granulometría	63
Figura 28 - Clasificación de Suelos SUCS	66
Figura 29 - Flujo Utilizando en el Modelamiento (Modificado a Partir de S. Houlding, 1994)	68
Figura 30 - Vista en Planta de la Distribución en el Terreno de los Ensayos de Penetración SPT	69
Figura 31 - Planilla Conteniendo los Datos Obtenidos en los Ensayos SPT	70
Figura 32 - Banco de Datos de Sondeos SPT	73
Figura 33 - Sondeos SPT-Tridimensional	75
Figura 34 - Modelo Geológico Tridimensional del Area de Estudio	75
Figura 35 - Tipos de Modelos de Bloques	77
Figura 36 - Bloque Ortogonal Unitario	77
Figura 37 - Procedimiento para la Evaluación Numérica	78
Figura 38 - Diagrama Esquemático del Modelamiento Numérico	79
Figura 39 - Volumen de Búsqueda Visto en el Plano	80
Figura 40 - Actores que Intervienen en un Proyecto de Cimentación	82
Figura 41 - Relación entre Densidad Relativa y el N° de Golpes (SPT)	84
Figura 42 - Relación entre el N° de Golpes (SPT) y la Resistencia en Arcillas	86
Figura 43 - Histograma de Distribución Exponencial de las Muestras A-F-M-PC-MC	87
Figura 44 - Histograma de Distribución Exponencial de las Muestras ASAR-PC-MC	88
Figura 45 - Histograma de Distribución Exponencial de las Muestras ARORG-M-MM	88
Figura 46 - Diagrama de Dispersión de A-F-M-PC-MC	89
Figura 47 - Diagrama de Dispersión de ASAR-PC-MC	90

Figura 48 - Diagrama de Dispersión de ARORG-M-MM	90
Figura 49 - Variograma Omnidireccional A-F-M-PC-MC	93
Figura 50 - Variograma Omnidireccional ASAR-PC-MC	94
Figura 51 - Variograma Omnidireccional ARORG-M-MM	94
Figura 52 - Variograma Direccional: Norte A-F-M-PC-MC	95
Figura 53 - Variograma Direccional: N 45° A-F-M-PC-MC	96
Figura 54 - Variograma Direccional: N 90° A-F-M-PC-MC	96
Figura 55 - Variograma Direccional: N 135° A-F-M-PC-MC	97
Figura 56 - Variograma Direccional: Vertical A-F-M-PC-MC	97
Figura 57 - Variograma Direccional: Norte ASAR-PC-MC	98
Figura 58 - Variograma Direccional: N 45° ASAR-PC-MC	98
Figura 59 - Variograma Direccional: N 90° ASAR-PC-MC	99
Figura 60 - Variograma Direccional: N 135° ASAR-PC-MC	99
Figura 61 - Variograma Direccional: Vertical ASAR-PC-MC	100
Figura 62 - Variograma Direccional: Norte ARORG-M-MM	100
Figura 63 - Variograma Direccional: N 45° ARORG-M-MM	101
Figura 64 - Variograma Direccional: N 90° ARORG-M-MM	101
Figura 65 - Variograma Direccional: N 135° ARORG-M-MM	102
Figura 66 - Variograma Direccional: Vertical ARORG-M-MM	102
Figura 67 - Elipsoide de Búsqueda A-F-M-PC-MC	104
Figura 68 - Elipsoide de Búsqueda ASAR-PC-MC	104
Figura 69 - Elipsoide de Búsqueda ARORG-M-MM	105
Figura 70 - Direcciones Principales (NE y EW) de los Aportes de Sedimentos en el Proceso de Formación de las Unidades Geotécnicas	106

## Lista de Tablas

Tabla 1 -	Compacidad de las Arenas en Función del N° de Golpes (SPT), Sousa (2002)	56
Tabla 2 -	Consistencia de las Arcillas en Función del N° de Golpes (SPT), Sousa (2002)	56
Tabla 3 -	Correlación Propuesta por Hunt	57
Tabla 4 -	Propiedades de los Suelos Arcillosos	60
Tabla 5 -	Categorías de Suelos y sus Características	64
Tabla 6 -	Parámetros de Resistencia de dos Horizontes de Suelos SPT	67
Tabla 7 -	Tipo de Materiales Geotécnicos Identificados en los Sondeos SPT	71
Tabla 8 -	Características de las Secciones Verticales	74
Tabla 9 -	A-F-M-PC-MC	81
Tabla 10 -	ASAR-PC-MC-2A	81
Tabla 11 -	ARORG-M-MM-3A	81
Tabla 12 -	ASAR-PC-MC-2B	81
Tabla 13 -	ARORG-M-MM-3B	81
Tabla 14 -	Clasificación Geotécnica de los Depósitos Cuaternarios SUCS	83
Tabla 15 -	Estadística Descriptiva de las Diferentes Litologías	87
Tabla 16 -	Dirección de los Variogramas	91
Tabla 17 -	Parámetros de Variogramas Horizontales	91
Tabla 18 -	Parámetros de Variogramas Verticales	92
Tabla 19 -	Modelamiento de los Variogramas Omnidireccionales	93
Tabla 20 -	Modelamiento de los Variogramas Direccionales	95
Tabla 21 -	Parámetros del Elipsoide de Influencia A-F-M-PC-MC	103
Tabla 22 -	Parámetros del Elipsoide de Influencia ASAR-PC-MC	103
Tabla 23 -	Parámetros del Elipsoide de Influencia ARORG-M-MM	104
Tabla 24 -	Resultados de Resistencia a Partir de Planos Isovalóricos	107
Tabla 25 -	Parámetros Geotécnicos Obtenidos a Partir de Correlaciones Empíricas	108



## **Lista de Anexos**

Anexo 1 - Plano Geológico de Río de Janeiro

Anexo 2 - Planos Litológicos de Distribución N° Golpes SPT

## Resumen

El presente trabajo describe una metodología desarrollada para el estudio integral de los depósitos cuaternarios del subsuelo de la Planta Nuclear Angra 2, ubicada en el estado de Río de Janeiro en el Brasil, utilizando principios geológicos, geotécnicos y geoestadísticas.

Se presenta un modelamiento geológico tridimensional de los depósitos cuaternarios realizado a partir de la información geológica obtenida en los sondeos (SPT). El estudio geotécnico es desarrollado mediante la interpretación del número de golpes obtenido de los ensayos de *stándar penetration test* (SPT) de los suelos y su utilidad en el estudio del comportamiento del subsuelo respecto a su resistencia mecánica.

La variabilidad espacial de las características de los materiales geotécnicos es desarrollada mediante métodos geoestadísticos, haciendo uso de la variografía para la determinación de las direcciones preferenciales de aporte de materiales a la cuenca y la interpretación de procesos geológicos ocurridos en la formación de las unidades geotécnicas.

Finalmente se obtuvieron mapas isovalóricos, estimando la variabilidad espacial del N de golpes SPT a partir del cual obtenemos los parámetros geotécnicos necesarios ( $c'$ ,  $\phi'$ ,  $q_u$ ) para la elaboración de un Proyecto de Ingeniería.

## **CAPITULO I:**

### **INTRODUCCION**

Actualmente los estudios de investigación del subsuelo constan de un estudio litoestratigráfico y un estudio geotécnico, para la obtención de parámetros geotécnicos de los materiales geológicos. Aunque ambos estudios se realizan, muchas veces no se toman en consideración las características geológicas en la obtención de los parámetros geotécnicos. Es por ello que nace esta propuesta de investigación, que intenta considerar las tendencias que dieron origen a la formación de estos materiales. La herramienta utilizada para la obtención de estas tendencias es un elemento de geoestadística denominada variograma.

La metodología propuesta en este trabajo intenta relacionar los conceptos geológicos y geotécnicos a través de la aplicación de técnicas de modelamiento de datos, que han sido aplicados con éxito en la evaluación de depósitos minerales y de reservorios de petróleo. La secuencia seguida en este trabajo ha sido desarrollada con la finalidad de obtener parámetros de resistencia mecánica que permita realizar estudios de estabilidad de taludes y cimentaciones tomando en cuenta las características geológicas de los materiales.

Esta metodología propuesta se aplicó a los depósitos cuaternarios donde se encuentra actualmente ubicada la Planta Nuclear Angra 2 en el estado de Río de Janeiro-Brasil.

## **1.1 Objetivos**

Los objetivos de este trabajo de tesis son:

- Realizar el trabajo de tesis y presentarlo a la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica para la obtención del título profesional de Ingeniero Geólogo.
- Realizar la evaluación Geológica-Geotécnica del área que ocupa actualmente la Planta Nuclear Angra 2, Río de Janeiro-Brasil.
- Proponer una metodología apropiada para las Investigaciones y Evaluaciones Geológicas-Geotécnicas del área donde se encuentra ubicada actualmente la Planta Nuclear Angra 2, Río de Janeiro-Brasil.

## **1.2. Organización de la tesis**

Este trabajo fue dividido en 5 capítulos siendo el capítulo 1, la presente introducción.

En el capítulo 2, se presenta la geología y la geomorfología del área de estudio.

En el capítulo 3, se presenta los fundamentos teóricos basados en la literatura consultada sobre conceptos de estadística, geoestadística y del comportamiento geotécnico de los suelos. Además de la metodología para las Investigaciones y Evaluaciones Geológicas-Geotécnicas que se empleará en el presente trabajo.

En el capítulo 4, se realiza la Investigación y Evaluación Geológica-Geotécnica del área de estudio, donde se ubica actualmente la Planta de Generación de Energía Eléctrica Angra 2. Se presenta una investigación Geológica-Geotécnica del subsuelo,

el tratamiento estadístico de los datos obtenidos de los ensayos SPT y la evaluación geoestadística y variabilidad espacial de los parámetros de resistencia del subsuelo.

En el capítulo 5, son presentados los resultados y las conclusiones obtenidas en este trabajo, además de las recomendaciones para futuros trabajos que darán continuidad a esta línea de investigación. Finalmente son presentadas las referencias bibliográficas, listando el material consultado para el desarrollo de este trabajo y los anexos.

### **1.3. Aspectos Generales**

Son presentados a continuación los aspectos principales del área de estudio: “Planta Nuclear Angra 2, Río de Janeiro-Brasil”.

#### **1.3.1. Ubicación**

La Planta Nuclear Angra 2 está localizada en la Latitud  $23^{\circ}00'30,2''S$  y la Longitud  $44^{\circ}27'26,3''W$ , a menos de medio grado al norte del trópico de Capricornio.

Situado en la playa de Itaorna, en la Bahía de Isla Grande, está distante en línea recta a 14Km de la ciudad de Angra de los Reyes y 130Km de la ciudad de Río de Janeiro. En la Figura 1 se presenta el mapa índice de Brasil, observándose el estado de Río de Janeiro, donde se ubica la ciudad Angra de los Reyes-Isla Grande, que es la ciudad donde se tiene la actual ubicación de la Planta Nuclear Angra 2.

Al Sur Este se ubica el estado de Río de Janeiro donde se encuentra la Ciudad Angra de los Reyes-Isla Grande, en dicha ciudad se localiza la Planta Nuclear Angra 2.



Figura 1 Mapa Índice de Brasil

En la Figura 2 se muestra la ubicación de la Planta Nuclear Angra 2-Río de Janeiro.



Figura 2 – Vista Aérea Mostrando la Ubicación de la Planta Nuclear Angra 2 en el Estado De Río de Janeiro-Brasil

En las direcciones oeste, norte y noreste, el área está cercada por las montañas Sierra del Mar, donde a distancias inferiores a 80Km pueden ser encontrados algunos de los puntos geográficos más elevados del territorio brasileño como el Pico de las Agujas Negras. La actual Planta se encuentra en dirección sureste a 20Km de Isla Grande.

En la Figura 3 se observa una vista panorámica de la Planta Nuclear Angra 2, Río de Janeiro-Brasil, se observa la presencia de vegetación sobre terrenos montañosos, alrededor de toda la Planta Nuclear y la cercanía al mar Atlántico.



Figura 3 - Vista Panorámica Actual de la Planta Nuclear Angra 2-Río de Janeiro, se observa vegetación en los terrenos montañosos y las llanuras ubicadas alrededor de la Planta Nuclear

### **1.3.2. Clima**

En el área de la región de la Planta Nuclear de Angra 2 el clima es tropical caliente y húmedo, los factores geográficos que llevan a la formación de este clima son la latitud (casi sobre el trópico de Capricornio), la proximidad del océano Atlántico e insolación intensa. Las lluvias frecuentemente superan los 2000mm anuales, ocurriendo principalmente entre los meses de noviembre a marzo, nunca se presenta estación seca. En la ciudad Angra de los Reyes donde se ubica la Planta Nuclear Angra 2, existen dos estaciones pluviométricas.

### **1.3.3. Aguas Subterráneas**

En la zona de ubicación de la Planta Nuclear Angra 2, el nivel de agua subterránea generalmente sigue la misma conformación de la superficie topográfica. Fluyendo en sentido hacia la playa de Itaorna, el nivel freático se encuentra aproximadamente dos metros debajo del nivel del terreno, con una inclinación de 0.5%, hasta una distancia de cerca de 200m de ésta. A partir de este punto, la inclinación se vuelve un poco más elevada (1%) hasta alcanzar el mar.



## **CAPITULO II:**

### **GEOLOGIA DEL AREA DE ESTUDIO**

#### **2.1. Geología Histórica**

El estado de Río de Janeiro, situado en la región Sur del país, está geotectónicamente situado en la provincia de Mantiqueira. Esta unidad cubre una extensión de cerca de 700 000Km<sup>2</sup>, y es la provincia estructural más compleja en América del Sur, afectada por el ciclo orogénico Neoproterozoico Cambriano (Brasiliano). La provincia se extiende del paralelo 33°S en Uruguay, hasta el paralelo 15°S al sur de Bahía y tiene alrededor de 3000Km de extensión y un ancho medio de 200Km. Está ubicada paralela a la costa brasileña, junto a las márgenes orientales de los cratones del Río de la Plata y San Francisco.

La provincia Mantiqueira representa una unidad geotectónica con orientación Nor Este, ubicada al Oeste del cratón de San Francisco al final de Neoproterozoico e inicio del Paleozoico. Constituyendo la estructura geotectónica del Sur Este Brasileño junto con la Faja Brasília, la cuña de Guaxupé y los metasedimentos de la denominada Faja Alto Río Grande.

Debido a su posición geográfica privilegiada, en el flanco del continente sudamericano y volteado hacia el sureste del continente africano, la provincia constituye un elemento clave para el entendimiento de la colada neoproterozoica de los orógenos Brasileños Panafricanos que siguió a la convergencia de los hasta

entonces dispersos fragmentos del supercontinente Rodonia, durante la amalgamación del supercontinente Gondwana Occidental.

La evolución tectónica de los terrenos precámbricos aflorantes en el estado de Río de Janeiro ha sido hace décadas objeto de numerosos estudios e intensas discusiones en el medio académico. Diversos trabajos de orden regional postulan que las características tectono-termales de la provincia son resultantes de procesos de subducción, seguido de una o más colisiones en el Neoproterozoico.

## **2.2. Geología Local**

La playa de Itaorna es una estrecha faja de arena, 2 a 4m encima del nivel del mar. De modo general el basamento rocoso está constituido predominantemente por gneis, migmatitas y granitos pre-cambrianos con características intrusivas y reciben los nombres de Mambucaba, Angra y Mangaratiba.

Las rocas básicas se encuentran presentes bajo la forma de diques de diabasa y basalto, en general, de poco espesor, encajadas en las rocas pre-cámbricas siguiendo la dirección N40-50E.

El macizo rocoso se encuentra 20 a 30m debajo de la superficie del terreno, y está recubierto por suelo residual, con 10 a 20m de espesor. Encima, el paquete sedimentario compuesto de arena media intercalada con lentes de arena fina, limo y arcilla.

Los sedimentos marinos y fluvio marinos, de edad cuaternaria, presentes en el local de la planta nuclear están en su mayor parte cubiertos por material del relleno sanitario usado para la implementación del proyecto.

La superficie de estos sedimentos holocénicos consiste de una alternancia de arenas finas y arcillas. La parte superior del paquete sedimentario está compuesto de arenas, y el número de horizontes de arena y arcilla en la columna sedimentaria crece en dirección a la línea de la costa. La porción central del área de Itaorna es la más profunda del paquete (más de 20m de espesor).

Se observó a través de sondeos, tres o más horizontes de arcilla alternada con arena, secuencias deposicionales transgresivas en el área.

**Transgresión Marina.-** fenómeno de avance progresivo del mar sobre terrenos continentales, llevándola al sumergimiento, debido a la subida del nivel del mar (fusión de glaciares), a la subsidencia del continente o por el movimiento vertical de ambos. La transgresión, así como la regresión, se han alternado a través del tiempo geológico, constituyéndose inclusive como un criterio para las clasificaciones estratigráficas.

**Regresión Marina.-** retroceso de las aguas del mar, debido a la variación del nivel del mar que se traduce en un recubrimiento de los sedimentos previamente depositados por sedimentos de una mayor granulometría, sin pérdida de la continuidad de la deposición. De modo que los sedimentos más gruesos de la cercanía de la costa pasan a recubrir progresivamente los sedimentos previamente depositados a una mayor distancia litoral.

La Figura 4 muestra la modificación de la línea de costa cuando se produce un proceso de transgresión marina. Las secuencias transgresivas están caracterizadas por secuencias granodecrescentes en razón de la disposición sucesiva de depósitos formados en condiciones de baja energía de los originados en áreas de fuertes corrientes (zonas continentales y litorales).

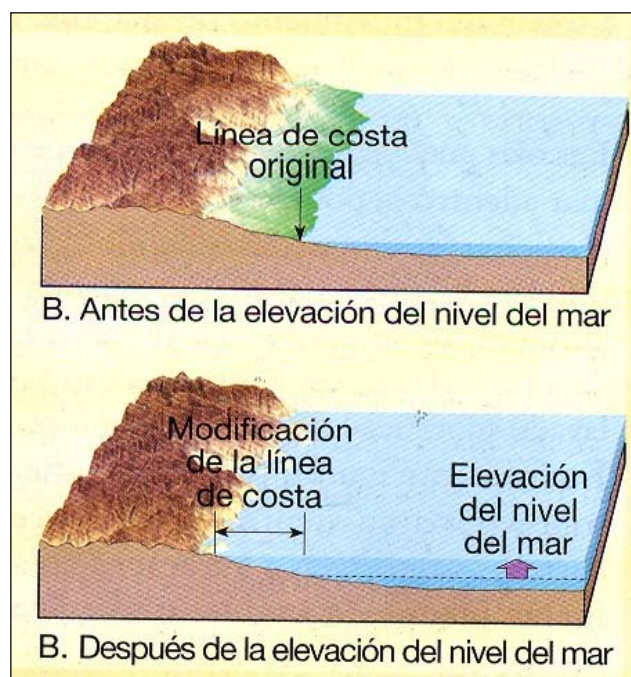


Figura 4 – Elevación del Nivel de Mar por Procesos Transgresivos

La primera transgresión depositó un horizonte de arena basal directamente sobre el suelo residual, con espesor de hasta 3m, cubierta por un horizonte de arcilla, de 2 a 7m de espesor. Esa secuencia arena/arcilla es indicativa de un aumento relativo del nivel del mar, evidenciando una transgresión marina.

La segunda secuencia transgresiva de la arena/arcilla es más extensa que la primera. Constituida también por un fino horizonte de arena subyacente a un horizonte más grueso de arcilla, indica también una transgresión marina, pero con nivel del mar relativamente más alto.

El horizonte superior, localmente, está constituido por suelos coluviales soterrados, lo que puede indicar movimientos de masas antiguas próximas a la línea de costa.

La secuencia sedimentaria marina superior en la ensenada de Itaorna, tanto en el continente como en el área marina (“*offshore*”), está compuesta por potentes horizontes de arena, que aumentan en espesor desde 5m, en el área marina y hasta 10m en la parte continental. La textura de se vuelve más gruesa a medida que se aproxima a la base de las pendientes que cercan la ensenada. Este último horizonte,

esencialmente arenoso, testimonia una regresión del mar y una progradación de la línea de playa antes de la configuración actual.

**Suelos Orgánicos.-** son llamados suelos orgánicos aquellos que contienen una cantidad apreciable de productos de la descomposición de materia de origen vegetal o animal, en varias etapas de descomposición. Generalmente son arcillas o arenas finas, y son de fácil identificación por el color oscuro y por el olor característico.

Los suelos orgánicos generalmente son problemáticos por ser muy compresibles. Ellos son encontrados en el Brasil principalmente en los depósitos litorales con potencias de decenas de metros. El porcentaje de materia orgánica en peso varía de 4 a 20%. Por su característica orgánica presenta elevados espacios vacíos, y por ser de sedimentación recientes normalmente son no consolidados, poseen una baja capacidad de soporte y una considerable compresibilidad.

Las secciones geológicas presentadas a continuación Figura 5, Figura 6, y Figura 7 han sido interpretadas por Rodrigues (1999), muestran las secuencias sedimentarias depositadas en el área de estudio.

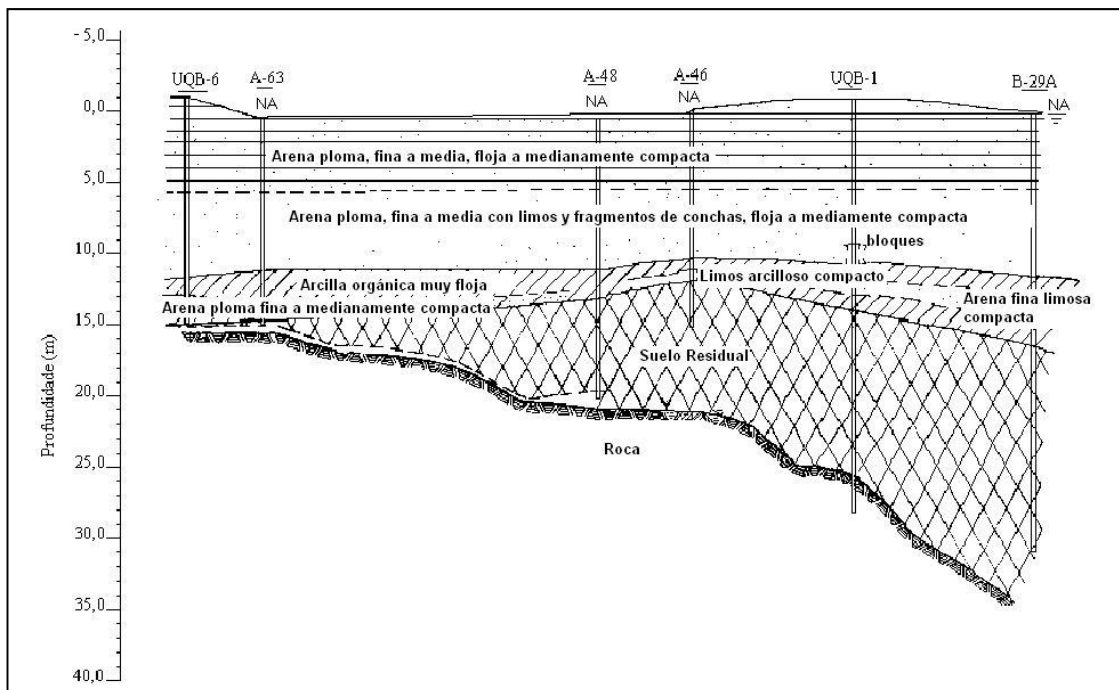


Figura 5 - Sección Geológica 01 de Angra 2 RJ-Brasil, Rodrigues (1999)

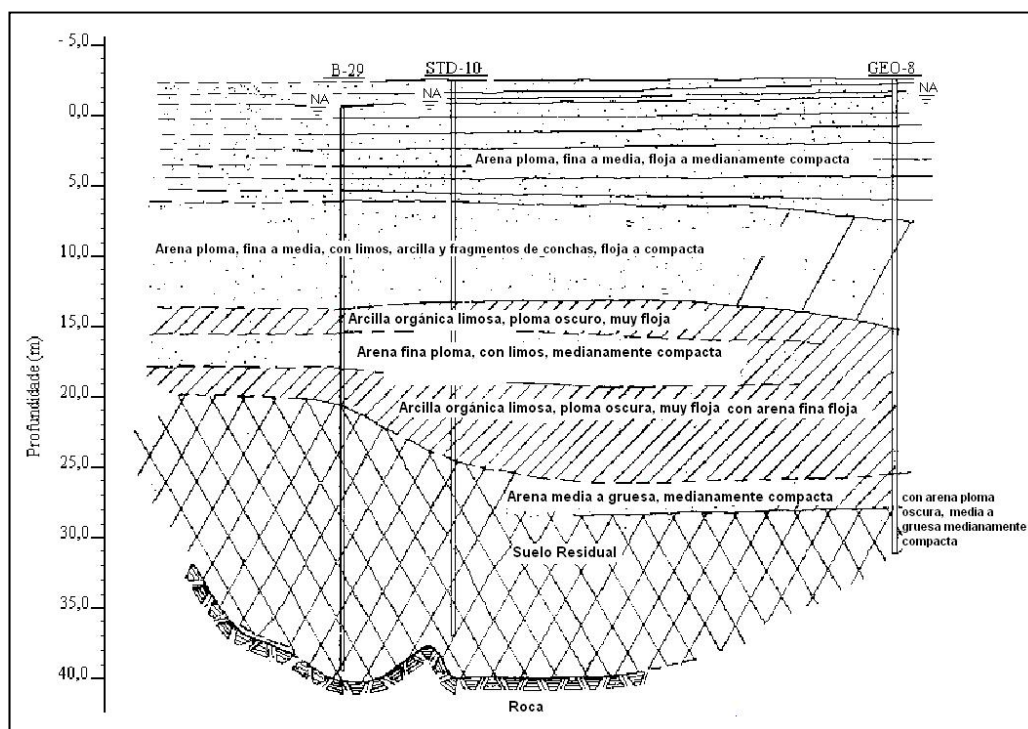


Figura 6 - Sección Geológica 02 de Angra 2 RJ-Brasil, Rodrigues (1999)

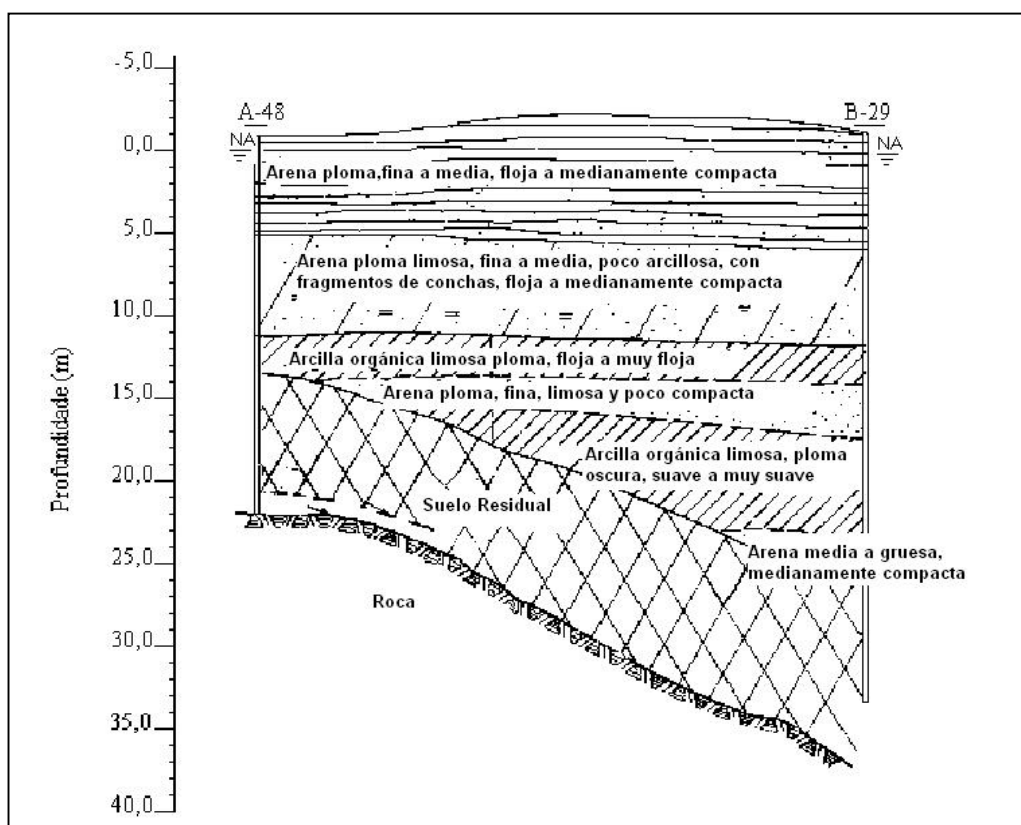


Figura 7 - Sección Geológica 03 de Angra 2 RJ-Brasil, Rodrigues (1999)

### 2.2.1. Unidades Litoestratigráficas

Para la delimitación de las unidades de rocas metamórficas, el Código Estratigráfico de Norteamérica (1982) ha propuesto el empleo de rangos de unidades litodémicas (constituidas por rocas metamórficas fuertemente deformadas, delimitadas por sus características litológicas), para rocas metamórficas con alto grado de metamorfismo cuyas relaciones con formaciones son inciertas. Entre los rangos se establece: suite, supersuite y complejo (metamórfico, volcánico y estructural). En la Figura 8 se presenta la columna estratigráfica del área de estudio y se presenta el plano geológico de Río de Janeiro (anexo 1).

CENOZÓICO	CUATERNARIO	Qhfl	Depósitos Flúvio- Lagunares	
		Qc	Depósito Coluvial- Aluvial	
PALEOZÓICO	CAMBRIANO (BRASILIANO III)	MAGMATISMO POST – TECTÓNICO	$\epsilon\gamma 5$	Granitoides pos-tectónicos
			$\epsilon\beta 5$	Plutones pos-tectónicos máficos toleíticos
PROTEROZÓICO	NEOPROTEROZOICO (BRASILIANO III)	GRANITOIDES TARDI-COLISIONALES	N $\gamma$ 3p	Suite Pedra-Selada
			N $\gamma$ 3a	Suite Serra das Araras

Figura 8 – Columna Estratigráfica del Área de Estudio

### **Suite Sierra de las Araras (Neo-proterozoico 560 Ma)**

Son cuerpos con expresión batolítica, estructura foliada y posicionamiento en niveles mesozonales, de las facies anfibolito medio y superior. De un modo general en el centro del batolito las estructuras de flujo ígneo son comunes, ya que en los bordes predominan estructuras deformacionales resultantes de cizallamiento transcurrente, con dirección NE-SW. En otras palabras, ocurre una obstrucción progresiva de la textura ígnea magmática original, hacia un tipo extremadamente foliado, donde es notoria la presencia de la foliación generada en ese estado. La transición de las estructuras magmáticas a tectónicas es caracterizada por la presencia de megacristales de microclina, que evolucionan a elipsoides estirados, por recristalización dinámica incipiente en sus bordes.

Según Corrêa Neto et al. (1993, 1994), las rocas granitoides de la Sierra de las Araras varían de sienogranitos, monzogranitos y llegan hasta granodiorita, habiendo predominio de granito porfírico, con fenocristales de microclina de hasta 5cm de largo.

Los dominios de biotita-granate gneis con intercalaciones de roca calcisilicática y cuarzítica son interpretados como remanentes de los protolitos de la fusión que generó el granitoide de Sierra de las Araras.

### **Suite Piedra Selada (Neo-proterozoico 553 Ma)**

Ocurren en la forma de cuerpos alargados en la dirección NE-SW o como lentes paralelas a la foliación principal del Complejo Paraíba do Sul. Presentan foliación en los bordes, interpretada por Heilbron (1993), como resultante de la combinación de flujo magmático con efectos de deformación, doblada y cizallada por otra deformación subsecuente.

Heilbron (1993) describió los granitos Pedra Selada como granitos porfiroides, conteniendo megacristales subhedrales de K-feldespatos de hasta 12cm de largo. La matriz es rica en biotita, con proporciones menores de cuarzo, plagioclasa y K-feldespatos. Presentan máficos ricos en anfíbol y lentes de cuarzo. Los contactos son gradacionales y bruscos con un leucogranito gnéisico, que ocurre como sills o bolsones en el interior de los granitos.



### **Plutones Toleíticos Máficos Pos-tectónicos (Paleozoico-Cambriano)**

Complejo formado por noritas, olivino y gabros inyectados por micronoritas y micromelanodioritas. Las rocas presentan una estructura gnéisica, y están cortadas por venas y diques pegmatíticos y aplíticos.

El macizo gábrico de Amparo es un olivino gabro, presenta facies félsicas de composición granodiorítica y tonalítica. Petrográficamente y químicamente el plutón Amparo está constituido de gabro-norita toleítico, subalcalino de bajo potasio, con enriquecimientos de bario y estroncio.

El metagabro de Tijuca ha sido cartografiado como un cuerpo intrusivo de diorita. Esta unidad es definida como intrusiones básicas e intermedias, metamorfizadas y gneisificadas.

### **Granitoides Pos-tectónicos (Paleozoico-Cambriano)**

Como productos finales de la granitogénesis Brasiliana han sido cartografiados numerosos cuerpos de granitos pos-tectónicos que se distribuyen especialmente en el Dominio Sierra del Mar.

Estos cuerpos han sido estudiados hace más de medio siglo, presentan estructuras homogéneas, isotrópicas o anisotrópicas, cuando presentan estructuras de flujo magmático o deformaciones en sus bordes. Presentan venas y diques aplíticos, así como bolsones pegmatíticos irregulares.

Estos plutones están constituidos en su mayoría por granitos biotíticos (hornblenda), además ocurren una variedad de rocas de composiciones variadas: sienogranito, monzogranito, granodiorita, tonalita y cuarzo diorita.

La granitogénesis cambriana está relacionada a los estadios pos-tectónicos del Orógeno Brasiliano, marcando la fase de surgimiento y colapso pos-colisional del orógeno que siguió al episodio orogénico Brasiliano III.

## **Depósitos Cuaternarios**

### **Ambientes de Sedimentación Continental**

- **Depósitos Cuaternarios Fluvio-Lagunares (Qhfl)**

Los depósitos Fluvio-lagunares están genéticamente relacionados a episodios distintos de progradación fluvial sobre un ambiente transicional marino, posiblemente en función de variaciones climáticas y/o glacio-eustáticas. Estas características se encuentran bien representadas en la región de Campos, donde se infiere que esta área representaba un ambiente del tipo lagunar-barrera en el auge de la transgresión marina holocénica (5,1Ma). Remanentes de esta paleolaguna se encuentran hoy representados por el conjunto de lagos existentes a lo largo de la planicie, donde se destaca la Laguna Fea. En el auge de la transgresión holocénica, el río Paraíba del Sur desaguaba en la margen oeste de esta laguna y, con la fase regresiva marina, el río inicio su progradación a través de un delta intralagunar. Litológicamente, estos depósitos se encuentran registrados en el área a través de una extensa sedimentación superficial areno-lodosa, sobreyacente a estratos de arenas biodetríticas y sedimentos lodosos de fondo lagunar.

- **Depósitos Cuaternarios Coluvio-Aluvionales (Qc)**

La deposición de los sedimentos coluvio-aluvionales se inició probablemente en el periodo Terciario, y los procesos responsables de su génesis perduraron por todo el Cuaternario, pudiendo ser constatados hasta nuestros días. Las facies proximales envuelven cascajos, arenas y lodos resultantes de la acción de procesos de flujos gravitacionales y aluviales de transporte de material de alteración de las vertientes. La acumulación de material detrítico originó depósitos coluviales (con predominio de material fino) y depósitos de derrubios (predominio de material grueso suelto sin consolidar) junto a la base y en la pendiente media de los cerros. Estos materiales sufrieron transporte por gravedad, por movimientos de masa de reptación o deslizamientos. Su morfología puede ser atribuida en parte a la existencia de varios puntos de flujo sedimentario, así como también a efectos de retrabajamiento y posterior erosión. Se encuentran constituidos por material de espesor, extensión y granulometría variada, que envuelve desde arcilla hasta bloques

de roca y gravas. En la porción más distal de este conjunto ocurren sedimentos arenosos y lodosos, eventualmente con gravas, localizados en regiones de baja declividad y a lo largo de los drenajes. Se presentan generalmente bien estratificados, reflejando deposición a partir de flujos torrenciales canalizados y no canalizados. En algunas situaciones, se observa interdigitación con depósitos deltáicos, lagunares o de playas marinas. Se encuentran subdivididos en depósitos de fondo de canal, de planicie de inundación, de rompimiento de diques marginales y de meandro. En los depósitos de fondo de canal (depósitos residuales de canales), ocurren arenas y gravas depositadas por las corrientes. Los depósitos de planicie de inundación, caracterizados por presentar una sedimentación lodosa, son acumulados cuando hay desborde del lecho del río en períodos de creciente. Los depósitos acumulados en los de diques son depositados por tracción y suspensión, por lo tanto, arena y lodo. En los depósitos de meandro ocurre sedimentación esencialmente arenosa, y la deposición se da principalmente a través de tracción y alguna suspensión (tope da barra).

### **2.3. Geomorfología**

El lugar está cercado predominantemente por afloramientos de rocas gnéicas recubiertas por depósitos coluviales y aluviales, en los lugares con mayor pendiente; habiendo además suelos residuales en locales de menor elevación.

Los taludes localizados frente a la playa Itaorna poseen ángulos entre 30° y 40°.

Las mayores elevaciones del entorno de la playa de Itaorna están al este y al norte de la Planta Nuclear de Angra 2. La Figura 9 muestra una vista panorámica actual de la playa Itaorna.

El suelo residual es originado por el intenso intemperismo a que son sometidas las rocas en el área. El espesor del suelo residual y la roca descompuesta localizada debajo del horizonte de suelo varía entre 10 y 20cm.



Figura 9 - Vista Panorámica Actual de la Playa Itaorna

### **Origen y Formación de Suelos**

Los suelos tienen su origen en los macizos rocosos preexistentes que constituyen la roca madre, sometida a la acción ambiental disgregadora de la meteorización en sus tres formas:

- **Física**, debido a cambios térmicos y a la acción del agua. Estas acciones físicas tienden a romper la roca inicial y a dividirla en fragmentos de tamaño cada vez más pequeño, que pueden ser separados de la roca por agentes activos (agua, viento y gravedad) y llevados a otros puntos iniciándose la acción erosiva. Es decir, tienden a crear las partículas que van a formar el suelo.
- **Química**, originada por fenómenos de hidratación, disolución, oxidación, cementación, etc. Esta acción, por lo tanto, tiende a disgregar y a cementar.
- **Biológica**, producida por actividad bacteriana, induciendo putrefacciones de materiales orgánicos y mezclando el producto con otras partículas de origen físico-químico actuando de elemento catalizador.

En la Figura 10 se resumen los distintos procesos que intervienen en la formación de los suelos.

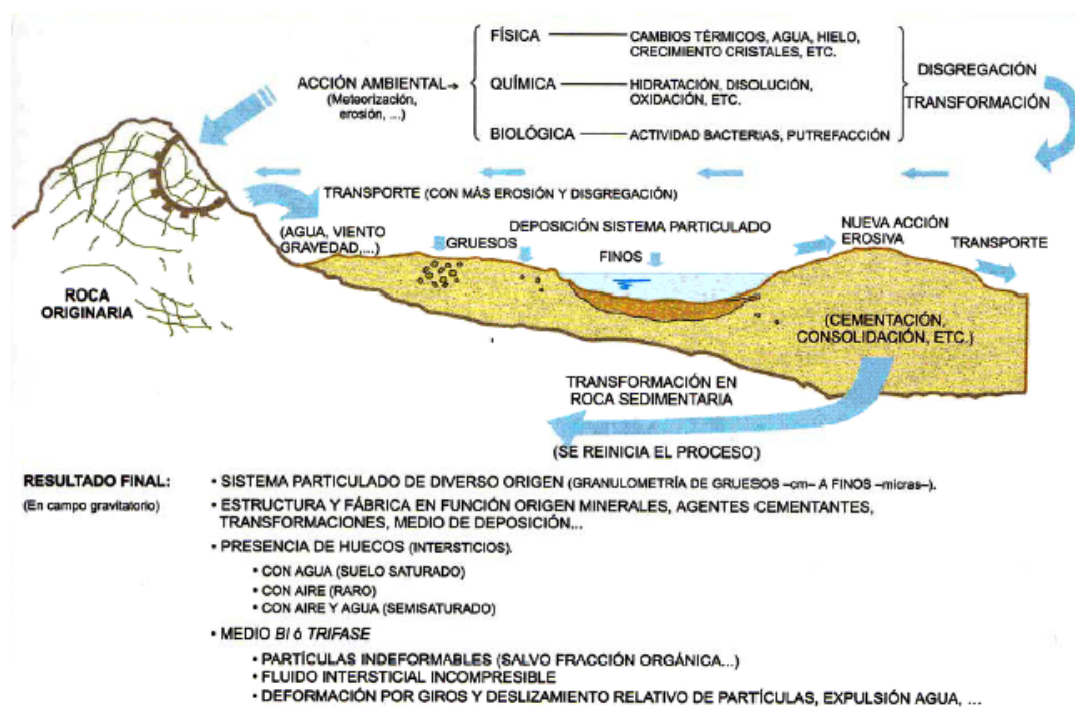


Figura 10 – Formación de Suelos

## **CAPITULO III:**

# **FUNDAMENTOS TEORICOS PARA LAS INVESTIGACIONES Y EVALUACIONES GEOLOGICAS-GEOTECNICAS**

Este capítulo presentará los principales conceptos teóricos de estadística, geoestadística y conceptos teóricos geotécnicos consultados y utilizados en el desarrollo de este trabajo de tesis.

### **3.1. Análisis Estadístico**

La ejecución de análisis estadísticos básicos es una tarea prácticamente obligatoria en el tratamiento de muestras y en el procesamiento de cantidades significativas de datos o variables. Además de posibilitar la clasificación y depuración de los datos, también permiten análisis interpretativos de los modelos de distribución de probabilidades, correlaciones y ajustes de funciones de regresión.

#### **3.1.1. Estadística Descriptiva**

Los datos obtenidos a través de muestras pueden ser descritos y analizados a través de estadísticas que son útiles para la caracterización de las distribuciones de frecuencia y realización de inferencias sobre la población. Las medidas estadísticas que describen las distribuciones pueden ser clasificadas en tres grupos:

## Medidas de Localización en la Distribución

**Media Aritmética ( $m$ ).**- También llamada momento de primer orden o esperanza matemática. El valor típico de un conjunto de  $n$  datos  $X_i$ , está representado por:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

Donde  $m$  representa la “media” alrededor de la cual se distribuyen los valores tomados por múltiples realizaciones independientes de la función aleatoria.

**Moda.**- Valor que ocurre con más frecuencia en un conjunto de datos, es el valor más común. La moda puede no existir, y aunque exista, puede no ser única.

**Mediana ( $M$ ).**- Valor medio de un conjunto de datos ordenados por orden ascendente. Mitad de los valores están encima de la mediana y mitad de los valores están debajo de la mediana. La medida de los datos ordenados puede ser calculada como:

Si  $n$  es impar

$$M = X_{\frac{n+1}{2}} \quad (2)$$

Si  $n$  es par

$$M = \frac{1}{2} \left( X_{\frac{n}{2}} + X_{\frac{n}{2}+1} \right) \quad (3)$$

Si el número de datos es impar la mediana corresponde al valor central y si el número de datos es par,  $M$  es cualquiera de los valores que están entre los datos centrales. Se acostumbra a tomar el promedio de los datos centrales.

Tanto la media como la mediana son medidas de localización del centro de la distribución. La media por lo tanto es más sensible en la presencia de valores erráticos altos o bajos.

## Medidas de Dispersión

**Varianza ( $\sigma^2$ ).**- Se define como la media aritmética de los cuadrados de las desviaciones de los datos con respecto a la media aritmética.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - m)^2 \quad (4)$$

Por incluir diferencias al cuadrado, la varianza es sensible a valores erráticos altos.

La varianza es una cantidad siempre positiva, por ser definida como la esperanza de un cuadrado.

**Desviación Estándar ( $\sigma$ ).**- Representada por la raíz cuadrada de la varianza. Frecuentemente se usa en vez de la varianza porque su unidad es la misma a la de las variables.

## Medidas de Forma

**Coefficiente de Asimetría.**- Indica la simetría de la distribución de las frecuencias, definido por:

$$Asimetria = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - m)^3}{\sigma^3} \quad (5)$$

El coeficiente de asimetría sufre la influencia de los valores erráticos extremos más que la media o la varianza. Frecuentemente no se usa el valor del coeficiente de asimetría, solo el signo como medida de la forma de la distribución.

- **Asimetría positiva:** con campana de la distribución más larga a la derecha del valor máximo, siendo la mediana menor que la media.
- **Asimetría negativa:** si ocurre lo inverso.
- **Asimetría nula:** el histograma es aproximadamente simétrico y la media y mediana son aproximadamente coincidentes.



Como la media tiende a situarse al mismo lado de la moda, también pueden ser definidas medidas de simetría en relación a la diferencia entre la media y la moda (primer coeficiente de asimetría de Pearson) o entre media y la mediana (segundo coeficiente de asimetría de Pearson).

**Coeficiente de Variación (CV):** Constituye una medida de dispersión relativa y también una alternativa para evaluar la simetría de las distribuciones, primariamente usada en las distribuciones cuyos valores sean todos positivos y cuya asimetría sea también positiva.

$$CV = \frac{\sigma}{m} \quad (6)$$

Valores de  $CV > 1$  pueden indicar la presencia de valores erráticos extremos en las muestras, con significativo impacto en las estimativas finales.

### 3.1.2. Modelos de Distribución de Probabilidades

#### Modelo para Variables Continuas

Si la variable aleatoria  $X$  asume un conjunto continuo de valores, el polígono de frecuencia relativa de una muestra se vuelve, en el caso teórico el límite de una población, una curva continua  $f(X)$ , designada como función densidad de probabilidad o función densidad.

#### Distribución Normal

Una de las más importantes distribuciones continuas de probabilidad es la distribución normal, o distribución de Gauss, definida por la ecuación (7):

$$f(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\Pi}} e^{-0.5\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (7)$$

Donde  $\mu$  y  $\sigma$  representan la media y la desviación estándar de la variable continua  $X$ .

La distribución binomial (discreta) puede ser aproximada por la distribución normal (continua) cuando  $N$  es grande y ni  $p$  o  $q$  esten muy próximos de cero. A medida que  $N$  aumenta, la asimetría de la distribución binomial tienden a las de la normal; en el límite, coinciden. En la practica la aproximación es buena para  $Np > 5$ .

### **Distribución Log-Normal**

Cuando el logaritmo de la variable aleatoria continua sigue el modelo de distribución normal, esto es:

$$f(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\Pi}} e^{-0.5\left(\frac{\log X - \mu}{\sigma}\right)^2} \quad (8)$$

Donde  $\mu$  y  $\sigma$  representan la media y la desviación estándar de los logaritmos de la variable continua  $X$ .

### **Distribución Exponencial**

La función densidad de probabilidad  $f(x)$ , de una variable aleatoria continua  $X$  que tiene una distribución exponencial, es simétrica respecto de un eje vertical que pasa por la media.

$$f(X) = \frac{1}{\beta} e^{-X/\beta}, \quad X > 0 \quad (9)$$

$$\mu = \beta, \quad \sigma = \beta$$

Donde  $\mu$  y  $\sigma$  representan la media y la desviación estándar de la variable continua  $X$ .

## 3.2. Análisis Geoestadístico

Matheron<sup>a</sup> en 1962, define la Geoestadística como “Una aplicación del formalismo de las funciones aleatorias para reconocimiento y estimación de fenómenos naturales”.

La Geoestadística con respecto a la estadística considera en su análisis matemático no solamente el valor en el punto donde fue muestreado, sino también la posición del punto en el cuerpo mineral o geológico y su relación con otras muestras.

### 3.2.1. Análisis de la Variabilidad Espacial

Un fenómeno natural puede ser caracterizado por la distribución en el espacio de una o dos variables llamadas “Variables regionalizadas”. Ellas están basadas en la correlación, que es la dependencia de los valores entre muestras contiguas, debido a que casi siempre toda variable tiene un patrón de distribución, ya que nada es al azar en la naturaleza (Canchaya, 2003). Una variable regionalizada es una función que representa el desplazamiento en el espacio de una cierta magnitud asociada a un fenómeno natural.

Una de las principales características de las variables regionalizadas es su continuidad espacial, cuya evaluación está fundamentada en los principios de regresión lineal que, en la estadística, investiga la dependencia entre variables de un fenómeno.

En geoestadística, se busca evaluar la dependencia de la variable con ella propia, evaluada en diferentes posiciones separadas por un vector  $\vec{h}$ . Esta continuidad espacial puede ser descrita por la variación de los coeficientes de correlación (función de correlación o correlograma), de las varianzas (función covarianza) o del semivariograma o simplemente variograma.

<sup>a</sup> léase en Canchaya, S. (2003), citado en bibliografía.

### **Función Covarianza** $\tilde{C}_v(h)$

Una importante diferencia entre los parámetros de un modelo conceptual y las estadísticas, que pueden ser calculadas a partir de valores experimentales, se necesita esclarecer convenientemente en este punto. Para enfatizar la diferencia con valores medidos, el símbolo  $\sim$  será utilizado para referenciar parámetros del modelo; así  $m$  significa la media aritmética entre valores observados y  $\tilde{m}$  corresponde a la media de los valores idealizados como realizaciones de una función aleatoria, los valores estimados se distinguen por el símbolo  $\wedge$ .

La función covarianza, como el nombre lo indica, representa la variación espacial entre variables separadas por la distancia  $h$ .

$$\tilde{C}_v(h) = Cov\{V(x).V(x+h)\} \quad (10)$$

$$\tilde{C}_v(h) = E\{V(x).V(x+h)\} - E\{V(x)\}.E\{V(x+h)\} \quad (11)$$

Donde el valor esperado de la variable aleatoria  $E\{V(x)\}$  denota su media  $\tilde{m}$ . Para funciones aleatorias estacionarias,  $E\{V(x)\} = E\{V(x+h)\}$ , resultando:

$$\tilde{C}_v(h) = E\{V(x).V(x+h)\} - E\{V(x)\}^2 \quad (12)$$

### **Función Correlograma o Función de Correlación** $\tilde{\rho}_v(h)$

Indica la continuidad espacial de los coeficientes de correlación, y se expresa matemáticamente por:

$$\tilde{\rho}_v(h) = \frac{Cov\{V(x).V(x+h)\}}{\sqrt{Var\{V(x)\}.Var\{V(x+h)\}}} \quad (13)$$

## **Función Variograma** $\tilde{\gamma}_v(h)$

El variograma es una función que constituye la herramienta fundamental de la Geoestadística. Definida como la mitad del cuadrado de las diferencias esperadas entre las variables aleatorias distanciadas de h,

$$\tilde{\gamma}_v(h) = \frac{1}{2} E \left\{ [V(x) - V(x+h)]^2 \right\} \quad (14)$$

$$\tilde{\gamma}_v(h) = \frac{1}{2} E \{V^2(x)\} - E\{V(x)V(x+h)\} + \frac{1}{2} E \{V^2(x+h)\} \quad (15)$$

Considerando que para funciones aleatorias estacionarias  $E\{V^2(x)\} = E\{V^2(x+h)\}$  la expresión 15 puede ser escrita como:

$$\tilde{\gamma}_v(h) = E\{V^2(x)\} - E\{V(x)V(x+h)\} \quad (16)$$

Adicionando y substrayendo  $E\{V(x)\}^2$  al segundo término de la ecuación 16,

$$\tilde{\gamma}_v(h) = E\{V^2(x)\} - E\{V(x)\}^2 - [E\{V(x)V(x+h)\} - E\{V(x)\}^2] \quad (17)$$

Finalmente resulta con auxilio de la ecuación (12):

$$\tilde{\gamma}_v(h) = \tilde{C}_v(0) - \tilde{C}_v(h) \quad (18)$$

Observándose que  $\tilde{\gamma}_v(0) = 0$ .

Para la mayoría de las funciones aleatorias usadas en análisis geoestadísticos, pares de variables muy separadas son prácticamente independientes entre sí. La función covarianza y correlograma tienden a cero con el aumento de la distancia h, en cuanto el variograma converge para un valor máximo, referenciado como “meseta”, que también representa la varianza de la función aleatoria estacionaria.

La Ecuación (17) puede ser escrita como:

$$\tilde{\gamma}_v(h) = \tilde{C}_v(0) - \tilde{\gamma}_v(h) \quad (19)$$

$$\tilde{\gamma}_v(h) = \tilde{\gamma}_v(\infty) - \tilde{\gamma}_v(h) \quad (20)$$

Considerando que  $\tilde{\gamma}_v(\infty) = \tilde{C}_v(0)$  ó  $\tilde{\gamma}_v(\infty) = Var\{V(x)\}$ .

Las funciones covarianza, correlograma y variograma proporcionan la misma información de manera ligeramente diferente (Figura 11). El correlograma inicia con el valor 1, tendiendo a cero con el crecimiento de h, mientras que la función covarianza decrece de forma similar a partir del valor inicial  $\tilde{C}(0) = \tilde{\sigma}^2$ . El variograma inicia en cero aumentando hasta el valor máximo  $\tilde{\gamma}(\infty) = \tilde{\sigma}^2$ . Normalmente los variogramas son contraídos a lo largo de las direcciones en que la variable presenta mayor y menor continuidad espacial. Para obtenerlos, varios variogramas direccionales son probados en una fase preliminar de la definición del modelo geoestadístico.

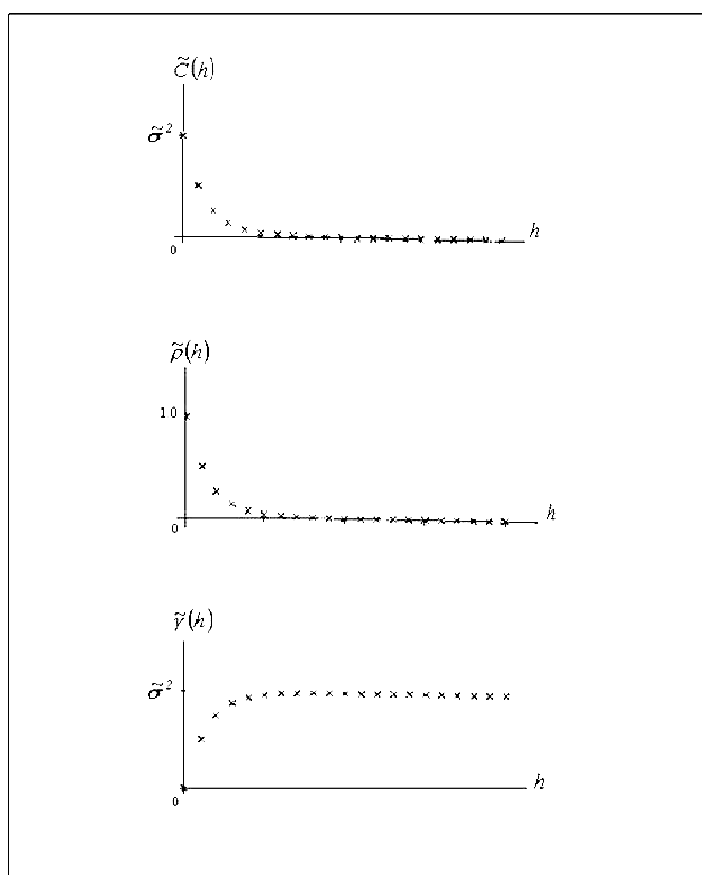


Figura 11 - Comportamiento de las Medidas de Correlación  $\tilde{C}(h)$ ,  $\tilde{\rho}(h)$ ,  $\tilde{\gamma}(h)$ , de una Variable Aleatoria  $V(x)$

El concepto de variograma a una sola variable puede ser extendido para describir la continuidad espacial entre dos variables, esto es, en vez de considerar pares de la misma variable en locales diferentes se trabaja con variables diferentes situadas en posiciones diferentes, distanciadas por el vector posición  $\vec{h}$  (variograma cruzado).

$$\gamma_{uv}(h) = E\{V(x) - V(x+h)\}E\{U(x) - U(x+h)\} \quad (21)$$

En geoestadística es una práctica común proceder en términos variográficos para la mayoría de cálculos iniciales.

### Características del Variograma

Tomando como base la Figura 12 se describieron las principales características del variograma.

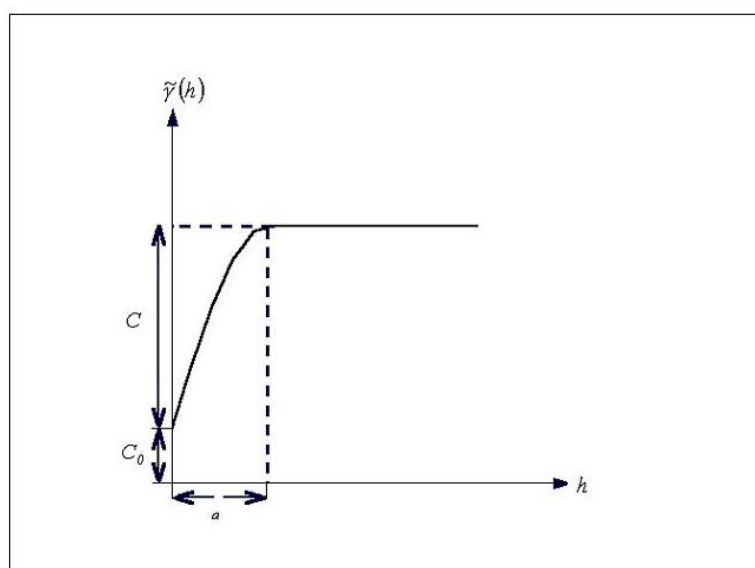


Figura 12 - Esquema básico de una Función Variograma

- a) Alcance (“range”): distancia a partir de la cual los valores del variograma (o función covarianza) permanecen esencialmente constantes.

- b) Meseta  $C + C_0$  (“sill”): valor máximo del variograma para distancias muy grandes  $\tilde{\gamma}(\infty)$ . Es también el valor de la función covarianza para  $h=0$ , o simplemente, la varianza  $\tilde{\sigma}^2$  de la variable aleatoria.
- c) Efecto pepita  $C_0$ : representa discontinuidad en el origen causado por varios factores como errores de muestreo, errores de medida, micro regionalizaciones de la variable estudiada.

La relación  $E = C_0 / (C_0 + C)$ , denominada efecto pepita relativo, expresa el grado de aleatoriedad del fenómeno regionalizado, siendo clasificado como:

- $E < 0.15$ : componente aleatorio pequeño
- $0.15 < E < 0.30$ : componente aleatorio significativo
- $E > 0.30$ : componente aleatorio muy significativo

En la Figura 12, se describe los parámetros requeridos para el cálculo del variograma. El “Lag” o distancia ( $h$ ) del variograma es un dato que se requiere para el cálculo del variograma. Ventana o *Spread* ángulo, es la zona de influencia del variograma direccional. El número de intervalos o “rango” es una medida similar al “Lag” que permite dar un número más de metros de rango. En el momento del cálculo del variograma, se genera un cono de influencia.

Para la obtención de los variogramas experimentales, los trabajos típicamente se inician con la elaboración del variograma omnidireccional para el cual la tolerancia direccional es grande o suficiente para volver la influencia de la dirección del vector posición  $\vec{h}$  muy pequeña. Con todas las posibles direcciones combinadas y un único variograma, solamente es importante el módulo de  $\vec{h}$  (distancia  $h$ ).

La construcción del variograma omnidireccional no implica aceptar la hipótesis de que la continuidad espacial de la variable investigada sea la misma en todas las direcciones. Su utilidad viene básicamente de las siguientes razones:

- a) Como los efectos de dirección no son examinados en este tipo de variograma, el análisis puede concentrarse en la búsqueda de las distancias  $h$ , en sus respectivas tolerancias, que produzcan una estructura de clara interpretación.



- b) Si la estructura obtenida en el variograma global fuera confusa, es poco probable que se obtengan mejores resultados en variogramas direccionales contruidos con menor número de muestras. El comportamiento verificado en el variograma global, en esta fase preliminar de los trabajos, puede entonces indicar la presencia de muestras con valores erráticos en el conjunto investigado o que las muestras pertenecen a una zona específica que contiene altos valores de la variable.

Una vez obtenidos los variogramas omnidireccionales, se puede explorar los patrones de anisotropía (direcciones de máxima o mínima continuidad) en los variogramas direccionales. Esta etapa puede ser facilitada si se conociera alguna información sobre los ejes de anisotropía de observaciones en campo. Caso contrario se puede recurrir a mapas de isovalores o más comúnmente calcularse los variogramas direccionales en varias direcciones y plotearse en la roseta de variogramas, la distancia en la dirección en que determinado valor de  $\tilde{\gamma}(h)$ , previamente escogido, se alcance. En el caso, que el cuerpo mineral o geológico tuviera una dirección y buzamiento predeterminado, entonces el cálculo de los variogramas se realizará en tres direcciones principales, dos direcciones horizontales y en la vertical.



Figura 13 - Características del Variograma

### Isotropía

Se dice que un fenómeno es isotrópico cuando la magnitud del vector  $\vec{h}$  permanece constante cualquiera que sea la dirección ( $\theta$ ) del vector, la variabilidad es simétrica. En este caso es suficiente modelar el variograma omnidireccional.

### Anisotropía

En la naturaleza es muy raro encontrar un fenómeno isotrópico, son más frecuentes los fenómenos anisotrópicos.

Anisotropía direccional (geométrica o zonal) aparece cuando los variogramas son diferentes en distintas direcciones, quiere decir que existen direcciones privilegiadas en el depósito. Para obtener la morfología del fenómeno conviene calcular varios variogramas en diferentes direcciones.

Existen dos grandes tipos de anisotropía:

- a) **Anisotropía Zonal**, tanto los valores de la meseta como del alcance variográfico varían con las direcciones, indicando un posible zonamiento espacial de la variable o asociación entre distintas poblaciones (Figura

14a). En la práctica, casos de anisotropía zonal pura se encuentran muy raramente, pero si asociaciones de anisotropía zonal y geométrica.

- b) **Anisotropía Geométrica**, los valores contraídos en diferentes direcciones presentan la misma meseta, pero diferentes alcances variográficos (Figura 14b). Este tipo de fenómeno se halla muy comúnmente en depósitos aluviales, donde el alcance en la dirección vertical es mucho menor que en la dirección principal del depósito, conservando su variabilidad en ambos casos (misma meseta).

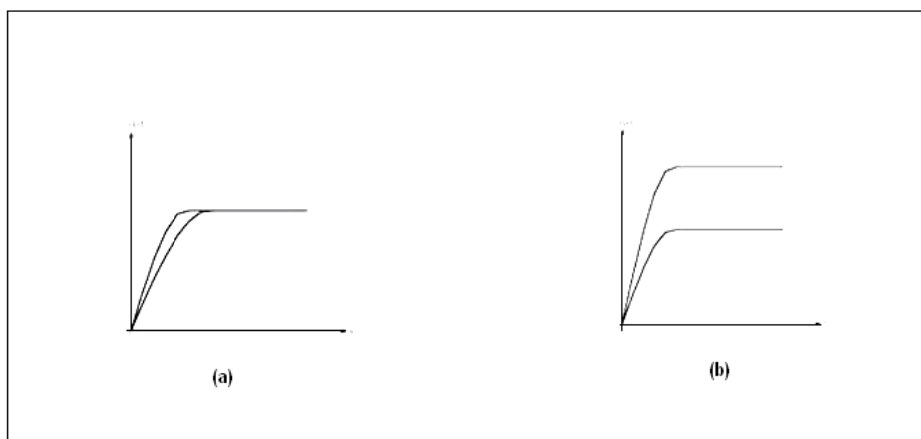


Figura 14- Tipos de Anisotropía Variográfica: a) Geométrica, b) Zonal

### Modelos Variográficos

En los métodos de estimativas y simulaciones geoestadísticas, se requieren valores de  $\gamma(h)$  en distancias y direcciones, para las cuales no se dispone de observaciones experimentales. De ahí la necesidad de adoptar un modelo variográfico  $\tilde{\gamma}(h)$  que mejor se ajuste al comportamiento espacial de la variable estudiada.

### Modelos con Meseta

En este tipo de modelo, la función variograma crece con  $h$  hasta un valor máximo, correspondiente a la varianza de la población, permaneciendo entonces constante, (Figura 15).

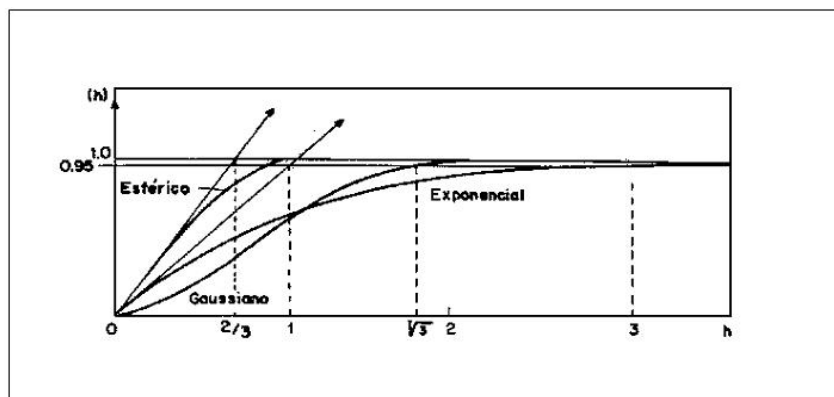


Figura 15 - Modelos Variográficos con Meseta

- a) **Modelo Esférico o de Matheron:** es el modelo que se usa más frecuentemente y se expresa por:

$$\tilde{\gamma}(h) = \begin{cases} (C + C_0)1.5 \left[ \frac{h}{a} \right] - 0.5 \left[ \frac{h}{a} \right]^3 & \dots h \leq a \\ C + C_0 & \dots h > a \end{cases} \quad (22)$$

En el ajuste del modelo al variograma experimental, es útil recordar que la tangente por el origen alcanza el valor de la meseta aproximadamente a  $2/3$  del alcance variográfico.

- b) **Modelo Exponencial:** En este modelo la meseta es alcanzada por la función asintóticamente. Crece más lentamente que el modelo esférico y tiene por ecuación:

$$\tilde{\gamma}(h) = (C + C_0) \left( 1 - e^{-\left( \frac{3h}{a} \right)} \right) \quad (23)$$

En el ajuste del modelo al variograma experimental es útil recordar que la tangente por el origen alcanza la meseta  $C$  aproximadamente a  $1/3$  del alcance variográfico. En muchas publicaciones, este modelo se presenta bajo una forma genérica.

$$\tilde{\gamma}(h) = (C + C_0) \left( 1 - e^{-\left(\frac{h}{a}\right)} \right) \quad (24)$$

Pero el parámetro “a” en este caso no representa el alcance variográfico práctico asociado al valor  $\tilde{\gamma}(h) = 0,95(C + C_0)$ .

c) **Modelo Gaussiano:** Modelo frecuentemente usado para fenómenos naturales con elevada continuidad. Tiene un comportamiento parabólico en el origen, su ecuación es:

$$\tilde{\gamma}(h) = (C + C_0) \left( 1 - e^{-\left(\frac{3h^2}{a^2}\right)} \right) \quad (25)$$

A semejanza del modelo exponencial, el valor máximo  $\tilde{\gamma}(h) = (C + C_0)$  es alcanzado asintóticamente. El alcance variográfico práctico “a” es definido en la distancia donde el valor del variograma alcanza 95% de la meseta.

El modelo Gaussiano presenta un comportamiento parabólico próximo al origen, como también un punto de inflexión de la función.

En los modelos esféricos, exponencial y Gaussiano el efecto pepita es un parámetro que se define a priori, sumado en el modelo variográfico como una constante  $C_0$ .

d) **Modelo Aleatorio:** Caracterizado por el efecto pepita puro ( $C_0$ ) es representativo de fenómenos naturales de elevada discontinuidad. El efecto pepita podría verse como un caso particular de un modelo esférico de alcance infinitamente pequeño. Por tanto, desde el punto de vista físico, existe una diferencia fundamental entre los dos modelos. El modelo pepita representa una regionalización discontinua a escala de observación, donde los valores mudan rápidamente de un punto a otro, en tanto que el modelo esférico describe una regionalización continua.

$$\tilde{\gamma}(h) = \begin{cases} 0 & \dots\dots\dots h = 0 \\ C & \dots\dots\dots h > 0 \end{cases} \quad (26)$$

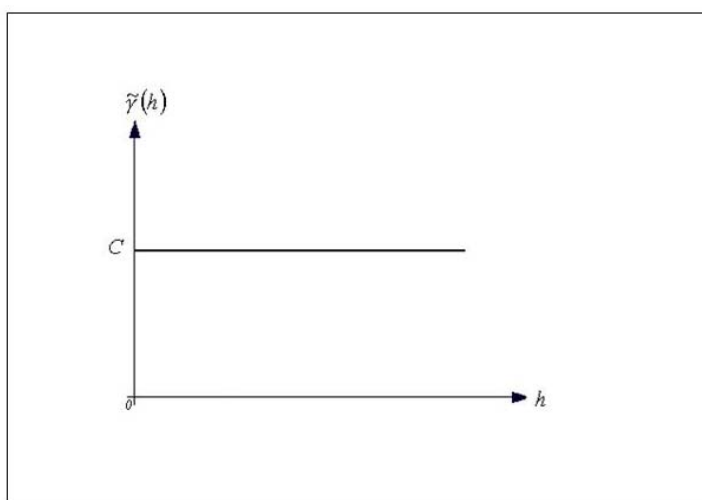


Figura 16 - Modelo Aleatorio

### 3.2.2. Estimaciones Clásicas

Los principales métodos de estimación clásica son el inverso cuadrado de la distancia y el método poligonal. Los dos métodos tienen una gran desventaja: sobreestima las zonas con valores altos y subestima las zonas con valores bajos, este fenómeno es conocido como sesgo condicional.

#### Inverso Cuadrado de la Distancia (IQD)

Este método se basa en que la influencia de los valores en un punto, decrecen cada vez que se apartan del punto, de tal manera que el valor varía en función inversa a su distancia.

En este método el estimador del bloque  $V_s^*$  es una combinación lineal ponderada de las muestras  $v_i$ . Los ponderadores  $\lambda$  se determinan por las distancias de las muestras  $d_i$  al centro del bloque. La menor distancia del centro del bloque será el peso que se da a la muestra y viceversa.

$$V_s^* = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{d_i^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^\beta}} \quad (27)$$

El valor del índice que da la ponderación  $\beta$  es importante para el proceso de estimación, pero al mismo tiempo es arbitrario, ya que no se conocen métodos que permitan conocer el valor adecuado (este valor puede ser calculado en función de la dirección y el tipo de depósito y se debe calcular basándose en el análisis del mismo), se puede usar valores ente 1 y 5. Según Barnes<sup>a</sup> (1980), si el valor de  $\beta$  es igual a 5 el método es parecido al método del polígono y si el valor es muy bajo como 0.5, hace que se de mayor importancia a las muestras que se encuentran más lejos del centro del bloque. En este trabajo se usará  $\beta = 2$ .

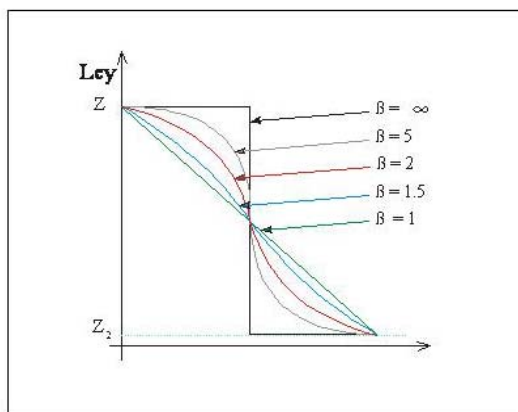


Figura 17 - Potencia  $\beta$  del Método IQD (Villanueva, 2000)

#### Observaciones al Método:

Se adapta con mucha facilidad para las estimaciones locales y globales, además de considerar el agrupamiento de las muestras, similar a la técnica de la media aritmética.

<sup>a</sup> léase en Villanueva (2000), citado en bibliografía.

Las muestras cerca del centro del bloque tienen el mayor peso y no toma en cuenta la forma del depósito.

En el trabajo de Gutiérrez (2009) se observa, como las estimaciones efectuadas del parámetro geomecánico RQD con los métodos de Kriging Ordinario e Inverso Cuadrado de la Distancia en los modelos de bloques con los que se discretizaron diferentes materiales geotécnicos, presentan valores similares. La Figura 18 muestra este análisis. Debido a ello se eligió para este trabajo utilizar el método del Inverso cuadrado de la distancia por ser más simple y práctico para las previsiones de las variables.

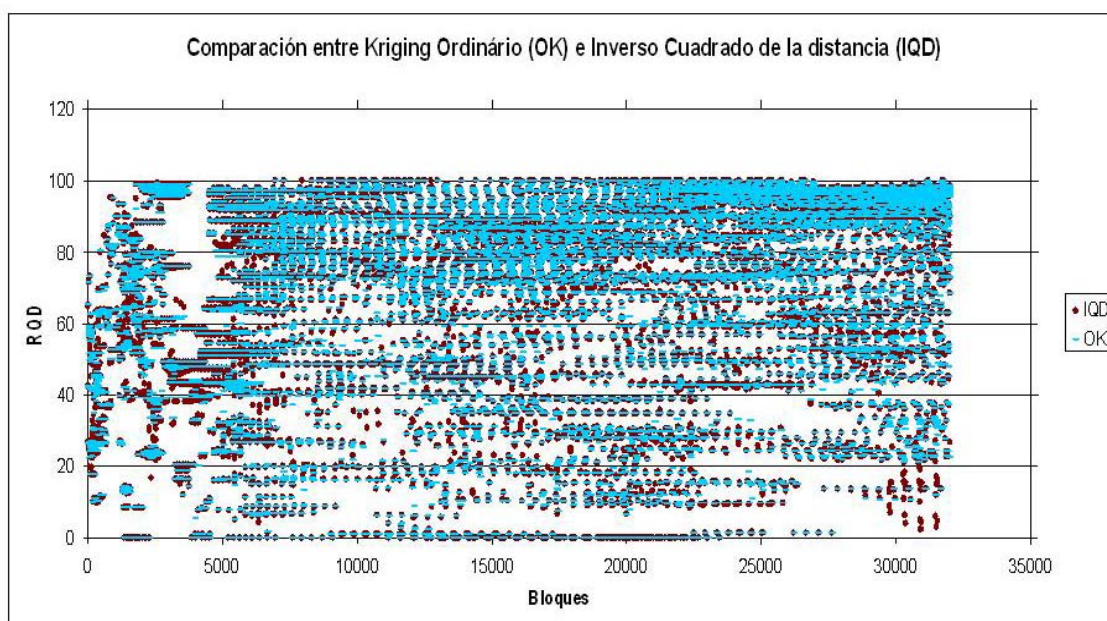


Figura 18 - Comparación entre el Kriging Ordinario (KO) y el Inverso Cuadrado de la Distancia (IQD)

Se observa que la dispersión de los valores del RQD es similar aplicando los dos métodos porque el material geotécnico está siendo analizado de manera local y sus propiedades no presentan la alta variabilidad que tienen los elementos químicos en un yacimiento metálico.



### **3.3. Análisis de la Resistencia de Suelos**

#### **Estado Tensional del Suelo**

Al modificar el estado de tensión del suelo se producen deformaciones que pueden originar su ruptura.

La ruptura de los suelos es casi siempre un fenómeno de cizallamiento. Esto sucede, por ejemplo cuando una zapata de cimentación es cargada hasta la ruptura o cuando ocurre deslizamiento de un talud. Solo en condiciones especiales ocurren rupturas por tensiones de tracción, como puede ser el caso de las grietas verticales que a veces se observan en la coronación de un talud deslizado, la forma de ruptura más habitual en los suelos es por esfuerzo cortante (tensión tangencial).

#### **Angulo de Rozamiento**

Es el ángulo máximo, que una fuerza transmitida por un cuerpo a una superficie puede hacer con la normal al plano de contacto sin que ocurra deslizamiento. Alcanzado este ángulo, la componente tangencial es mayor que la resistencia al deslizamiento, que depende de la componente normal.

El fenómeno de rozamiento en los suelos se diferencia del fenómeno de rozamiento entre dos cuerpos porque el desplazamiento se hace envolviendo un gran número de granos, pudiendo ellos deslizarse entre sí o rodar unos sobre otros, acomodándose en los vacíos que encuentran.

Existe también una diferencia entre las fuerzas transmitidas entre los contactos de los granos de arena y los granos de arcilla. En los contactos entre granos de arena, generalmente las fuerzas transmitidas son suficientemente grandes para expulsar el agua de la superficie, de tal forma que los contactos ocurren entre los minerales.

En el caso de las arcillas, el número de partículas es mucho mayor y la parte de fuerza transmitida en cada contacto extremadamente reducida. Las partículas de arcilla están envueltas por moléculas de agua adsorbida a ellas. Las fuerzas de contacto no son suficientes para remover las moléculas de agua y son ellas las responsables por la transmisión de las fuerzas. Esta característica que es responsable del asentamiento secundario, provoca también una dependencia de la resistencia de las arcillas a la velocidad de compresión a que son sometidas. La Figura 19 muestra,

la diferencia de contactos entre los granos de arena y los granos de arcilla (De Sousa, 2002).

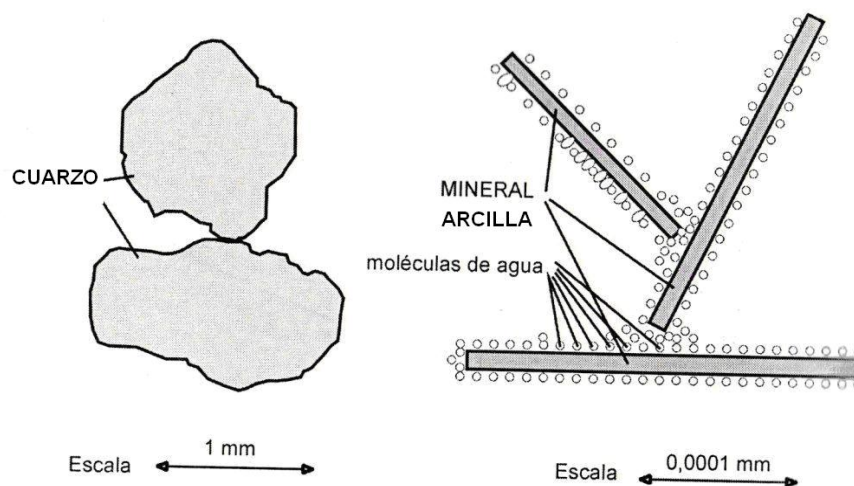


Figura 19 - Transmisión de Fuerzas entre Partículas de Arenas y Arcillas (De Sousa, 2002)

### Cohesión

La atracción química entre las partículas puede provocar una resistencia independientemente de la tensión normal actuante en el plano y que constituye una cohesión real, como si se aplicara algún pegamento entre ellas.

La cohesión en suelos sedimentarios, en general es muy pequeña aunque existen suelos cimentados naturalmente que presentan partes con cohesión real de alto valor.

La cohesión aparente es una parte de la resistencia al cizallamiento de suelos húmedos no saturados, debida a la tensión entre partículas resultantes de la presión capilar del agua. La cohesión es un fenómeno de rozamiento donde la tensión normal que la determina es consecuencia de la presión capilar. Saturándose el suelo, esta resistencia desaparece. Siendo esto más visible en las arenas y es en los suelos arcillosos donde la cohesión aparente adquiere mayores valores.

El fenómeno físico de cohesión no debe ser confundido con la cohesión correspondiente a una ecuación de resistencia al cizallamiento. Aunque lleve el mismo nombre, esto indica simplemente el intercepto de una ecuación lineal de

resistencia válida para una rango de tensiones más elevada y no para la tensión normal nula o próxima a cero.

### 3.3.1. Criterio de Ruptura Mohr-Coulomb

La resistencia al corte del suelo no puede considerarse como un parámetro único y constante, ya que depende de su naturaleza, estructura, enlaces, nivel de deformaciones, así como, muy especialmente, de su estado tensional y de la presión del fluido que rellena sus poros (agua o agua y aire).

- **Tensiones Totales.-** las tensiones en cualquier punto de un plano que atraviesa una masa de suelo seco pueden ser calculadas a partir de las tensiones principales totales:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  que actúan en ese punto.
- **Tensiones Efectivas.-** Terzaghi definió como parte fundamental de su enunciado que si los poros del suelo se encuentran rellenos de agua bajo una presión  $u$ , las tensiones principales totales se componen de dos partes. Una parte,  $u$ , llamado presión intersticial, que actúa sobre el agua y sobre las partículas sólidas en todas las direcciones y con igual intensidad. Las diferencias  $\sigma_1' = \sigma_1 - u$ ,  $\sigma_2' = \sigma_2 - u$ ,  $\sigma_3' = \sigma_3 - u$  representan un exceso de presión sobre la presión neutra  $u$  y actúan exclusivamente en la fase sólida del suelo. Estas fracciones de las tensiones principales totales se denominan tensiones efectivas.

Cualquier efecto medible debido a un cambio de tensiones, tal como la compresión, la distorsión o la modificación de la resistencia al corte de un suelo, es debido exclusivamente al cambio de las tensiones efectivas.

El criterio de ruptura de Mohr - Coulomb relaciona tensiones efectivas normales y tensiones tangenciales actuando en cualquier plano del suelo. Este criterio establece que, para un suelo saturado, la resistencia al corte viene dada por la expresión:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \tan \varphi' \quad (28)$$

donde:

$\tau$  = resistencia al corte del terreno a favor de un determinado plano

$\sigma_n$  = tensión total normal actuando sobre el mismo plano

$u$  = presión intersticial

$c'$  = cohesión efectiva

$\varphi'$  = ángulo de rozamiento interno efectivo.

La ecuación anterior representa una recta en el espacio  $(\sigma', \tau)$ , que a menudo se denomina línea de resistencia intrínseca o envolvente de rotura del suelo. Esta línea proporciona, para cada valor de la tensión efectiva normal a un plano que atraviesa un elemento del suelo, la máxima tensión tangencial movilizable a favor de dicho plano.

Si los parámetros de resistencia al corte del suelo ( $c'$ ,  $\varphi'$ ) dan lugar a la línea de resistencia intrínseca, se puede observar de la Figura 20 que:

- El estado tensional representado por el círculo (a) cuenta con un margen de seguridad, ya que no llega a alcanzar a la envolvente de rotura del suelo. Es por tanto un estado posible y seguro (el suelo no ha roto).
- El estado tensional representado por el círculo (b) indica una situación de rotura. Así, el punto (0) representa la combinación  $(\sigma'_f, \tau_f)$  en un plano que atraviesa el elemento de suelo en el que se alcanzan las condiciones del criterio de rotura definido.
- El estado tensional representado por el círculo (c) es imposible, ya que existirían orientaciones de planos atravesándole elemento de suelo en los que se excederían las condiciones  $(\sigma', \tau)$  de rotura (todos los planos representados por puntos del círculo situados por encima de la línea de resistencia intrínseca).

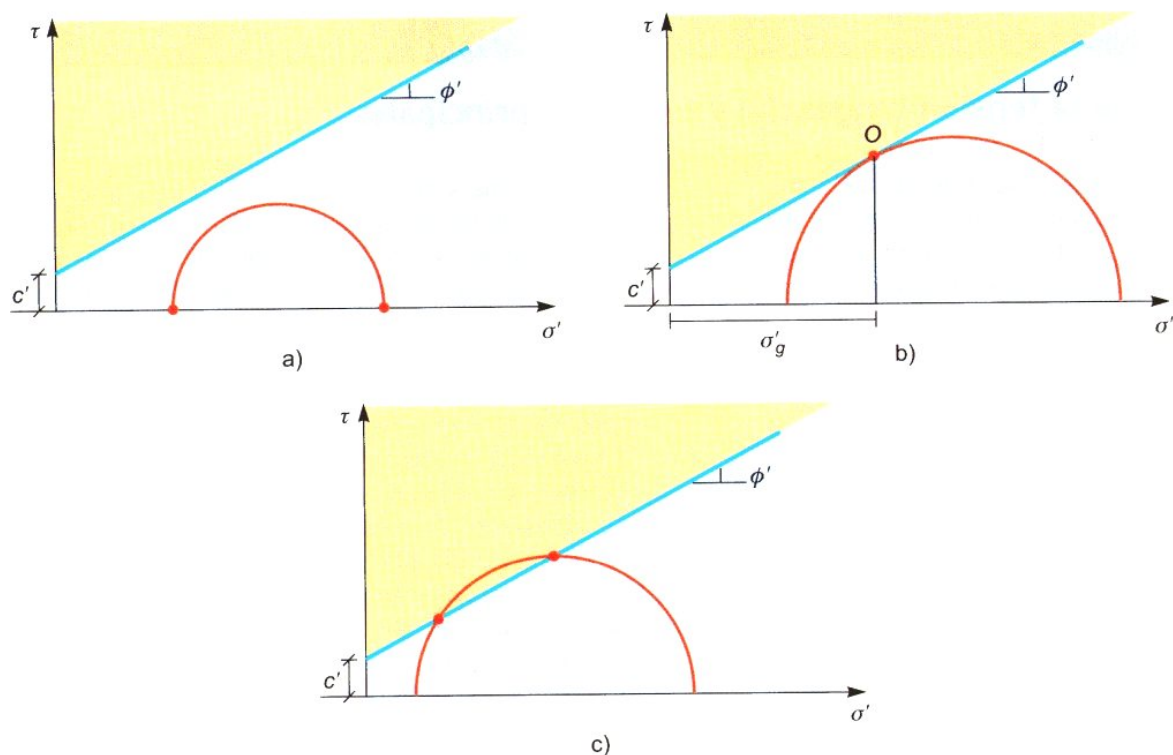


Figura 20 - La Envolvente de Ruptura y el Círculo de Mohr. Estados Posibles (a y b) e Imposibles (c). González (2009)

Del análisis anterior se desprende que, cuando se alcanzan las condiciones de rotura en un elemento de suelo, el círculo de Mohr que representa su estado tensional será tangente a la línea de resistencia intrínseca y además, el plano a favor del cual se alcanzan dichas condiciones de rotura será el representado por el punto de tangencia.

La posición de la recta permite identificar el tipo de suelo estudiado de acuerdo a los parámetros  $c$  y  $\phi$ . Así para suelos granulares se tiene una recta que parte del origen, que representa una cohesión igual a cero. Para suelos cohesivos el ángulo de rozamiento interno resulta ser nulo, como se observa en la Figura 21.

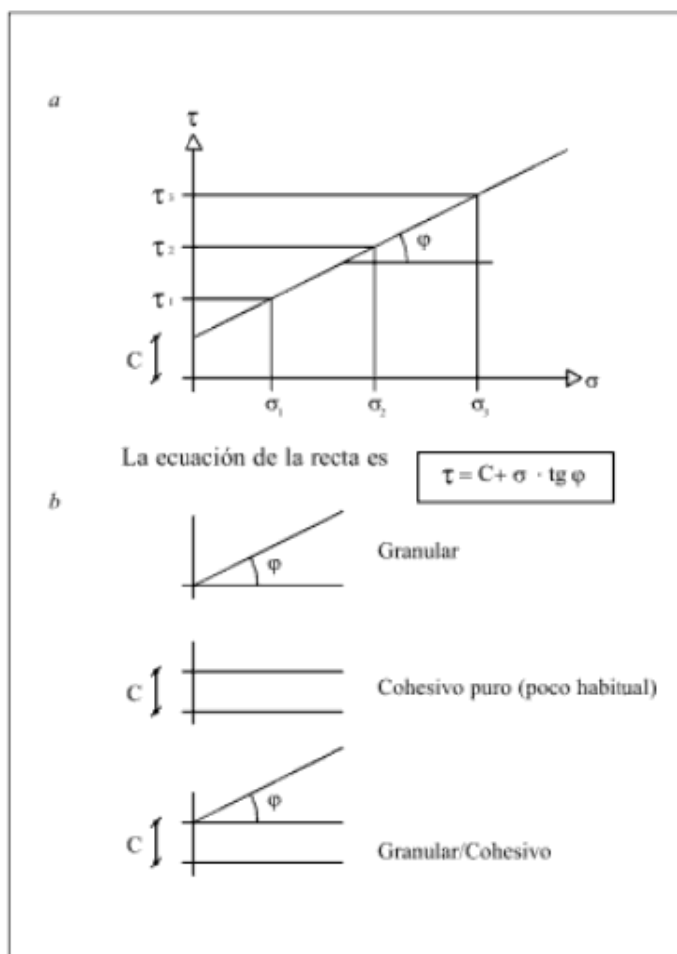


Figura 21 - Envolvente de Ruptura para Diferente tipo de Suelos

### 3.3.2. Ensayo de penetración estándar (SPT)

El Ensayo de Penetración Estándar (SPT del inglés, *standard penetration test*) nace en el año 1927, desarrollado por un sondista de la Raymond Concrete Pile Co, quien propuso a Terzaghi contabilizar el número de golpes necesarios para introducir 1 pie ( $z = 30$  cm) al tomamuestras que solía utilizar para obtener muestras en terrenos sin cohesión (arenas).

El ensayo de penetración estándar o SPT es un tipo de prueba de penetración dinámica, empleada para ensayar terrenos en los que se desea realizar un reconocimiento geotécnico. Permite obtener un valor de resistencia a la penetración

que puede ser correlacionado con parámetros geotécnicos como la densidad relativa, el ángulo de rozamiento, la carga admisible y los asientos en los suelos granulares. En el ensayo también se obtiene una muestra alterada, para realizar ensayos de identificación en el laboratorio. En la Figura 22 se muestra el equipo utilizado para realizar los sondeos SPT.

### **Descripción del ensayo SPT**

Una vez que en la perforación del sondeo se ha alcanzado la profundidad a la que se ha de realizar la prueba, sin avanzar la entubación y limpio el fondo del sondeo, se desciende el tomamuestras SPT unido al varillaje hasta apoyarlo suavemente en el fondo. Realizada esta operación, se eleva repetidamente la maza con una frecuencia constante, dejándola caer libremente sobre una sufridera o cabezal que se coloca en la zona superior del varillaje. Luego se contabiliza y se anota el número de golpes necesarios para introducir la cuchara los primeros 15cm (N0-15) (ver Figura 23). Posteriormente se realiza la prueba en sí, introduciendo otros 30cm, anotando el número de golpes requerido para hincar cada intervalo de 15cm de penetración (N15-30 y N30-45).

El resultado del ensayo es el número de golpes SPT o resistencia a la penetración estándar:

$$N(\text{SPT}) = N15 - 30 + N30 - 45$$

El ensayo SPT puede ejecutarse prácticamente en todo tipo de suelos, incluso en roca muy alterada, aunque en los suelos granulares es donde se realiza preferentemente; la dificultad de obtener muestras inalteradas en este tipo de suelos añade relevancia al SPT.

Generalmente la información referente al estado del suelo se obtiene en base a la resistencia que ofrece a la penetración del tomamuestras.



Figura 22 - Equipo de SPT

La frecuencia habitual para la realización del SPT a lo largo del sondeo es de un ensayo cada 2 a 5m o incluso mayor, en función de las características del terreno.

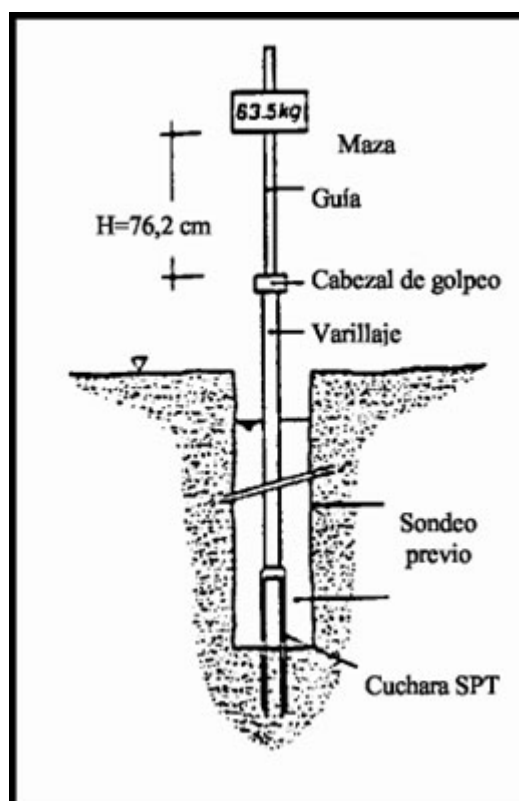


Figura 23 - Esquema de Realización del Ensayo



### Aplicabilidad del Ensayo

El ensayo SPT es por naturaleza simple y puede ser intercalado con facilidad en cualquier sondeo de reconocimiento. Puede ejecutarse en casi cualquier tipo de suelo, incluso en rocas blandas o meteorizadas.

Los resultados de la prueba, difundida ampliamente en todo el mundo, se correlacionan empíricamente con las propiedades específicas *in situ* del terreno.

En función de la resistencia a la penetración, el estado del suelo es clasificado por la compacidad, cuando se trata de arena o limo, o por la consistencia, cuando se trata de arcilla o limo arcilloso, ver Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1 - Compacidad de las Arenas en Función del N° de Golpes (SPT), Sousa (2002)

<b>Resistencia a la Penetración N° de Golpes (SPT)</b>	<b>Compacidad de la Arena</b>
0 a 4	muy floja
5 a 8	floja
9 a 18	medianamente densa
18 a 40	densa
> 40	muy densa

Tabla 2 - Consistencia de las Arcillas en Función del N° de Golpes (SPT), Sousa (2002)

<b>Resistencia a la Penetración N° de Golpes (SPT)</b>	<b>Consistencia de la Arcilla</b>
<2	muy floja
3 a 5	floja
6 a 10	medianamente densa
11 a 19	densa
> 19	muy densa

Las ventajas de este ensayo con relación a otros son la simplicidad del equipamiento, bajo costo, y obtención de un valor numérico que puede ser relacionado con relaciones empíricas.

### 3.3.3. Obtención de Parámetros Geotécnicos a partir de Correlaciones Empíricas

Existen numerosas correlaciones empíricas con diversos parámetros geotécnicos. Debe entenderse claramente que estas relaciones son aproximativas y su uso resulta tanto más adecuado cuanto mayor sea la experiencia de quien las utiliza. Se han recopilado las diferentes correlaciones para la obtención de parámetros geotécnicos como la densidad relativa ( $D_r$ ), ángulo de rozamiento y cohesión.

#### Obtención de la Densidad Relativa a partir del Ensayo SPT

Para la obtención de este parámetro en suelos granulares se relaciona la densidad relativa con el parámetro  $N^\circ$  de golpes (SPT). Se considera la correlación propuesta por Hunt (Tabla 3):

Tabla 3 – Correlación Propuesta por Hunt

Densidad Relativa	Nº de Golpes (SPT)
< 0,15	< 4
0,15 - 0,35	4 - 10
0,35 - 0,65	10 - 30
0,65 - 0,85	30 - 50
0,85 - 1	> 50

Los datos determinados por Hunt para un mismo golpeo son considerablemente más altos que los obtenidos por Schultze y Meyer en 1965. En vista de utilizar siempre el valor más conservador, es recomendable la utilización de la fórmula propuesta por los dos últimos autores aquí mencionados:

$$D_r = 0,317 \cdot \log N(\text{SPT}) - 0,22 \cdot \sigma_0' + 0,392 \pm 0,067 \quad (29)$$

En la Figura 24 se representan valores de densidad relativa en relación a N° de golpes (SPT) suponiendo una densidad aparente de  $1,9 \text{ g/cm}^3$ , con una presión vertical efectiva de 0,093 bares (0,5 m de profundidad), 0,186 bares (1 metro de profundidad) y 0,372 bares (2 m de profundidad), suponiendo una presión intersticial nula, en el caso de la aplicación de las fórmulas de Schutze y Meyer en 1965.

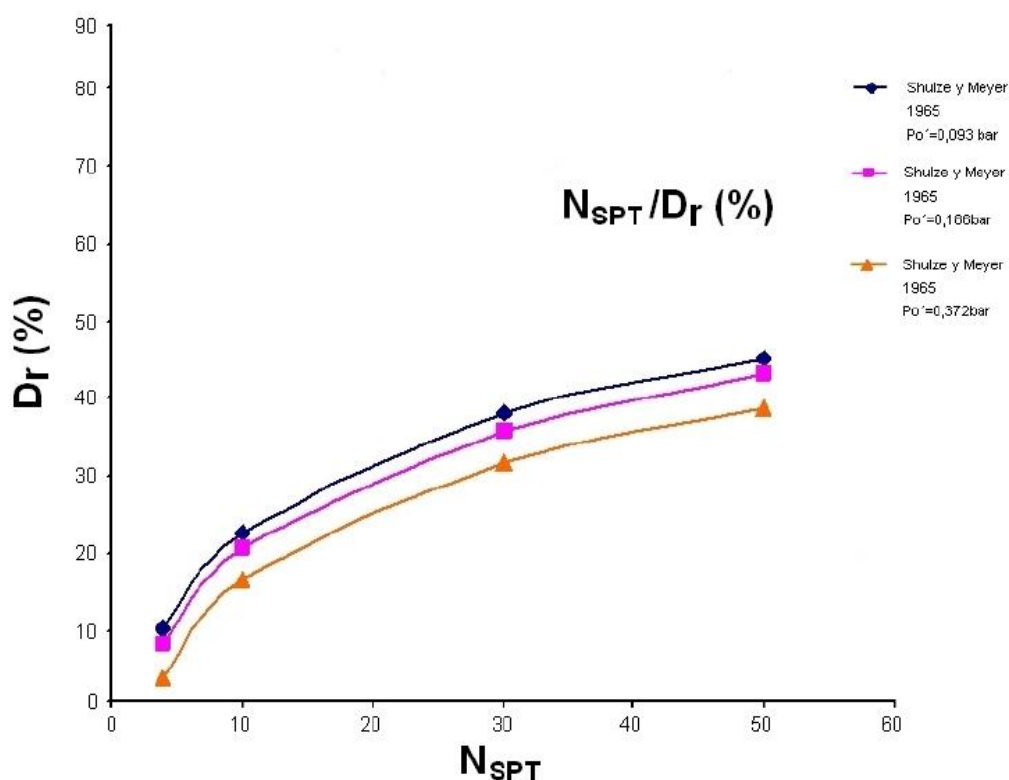


Figura 24- Relación entre el N° de Golpes (SPT) y la Densidad Relativa Schutze y Meyer (1965)

Existen, además de los expuestos, numerosos trabajos sobre la cuantificación de la  $D_r$  (%). Muchos de ellos intentan explicar las desviaciones de los diferentes métodos. La técnica del ensayo, así como la granulometría, composición y angulosidad de las partículas son factores que juegan un papel importante.

### **Obtención del Ángulo de Rozamiento Interno a partir del Ensayo SPT**

Los datos que se obtienen del ensayo SPT permiten estimar el ángulo de rozamiento interno de los materiales directamente a partir del valor  $N^\circ$  de golpes (SPT).

Existen diversas expresiones propuestas por varios autores para la obtención del ángulo de rozamiento interno. Para el desarrollo de este trabajo se utilizará las expresiones propuestas por Meyerhof (1956) para suelos arenosos:

$$\Phi' = 25 + 0.15 D_r \quad (> 5\% \text{ arena fina y limo}) \quad (30)$$

$$\Phi' = 30 + 0.15 D_r \quad (< 5\% \text{ arena fina y limo}) \quad (31)$$

Además se utilizará la expresión combinando la ecuación de Schmertman para valores de  $N^\circ$  de golpes (SPT) bajos, con la regresión logarítmica obtenida para facies de suelos mixtos para valores de  $N^\circ$  de golpes (SPT) superiores a 25 golpes, obteniéndose la nueva ecuación (31) según el estudio realizado por ASG Geotecnia y Sondeos Geotest (Parra & Ramos), que recopilaron información de diferentes correlaciones existentes para la obtención de parámetros mecánicos de resistencia y deduciendo la ecuación (31):

$$\Phi' = 5.35 \ln N(\text{SPT}) + 14.44 \quad (32)$$

Los valores de ángulo de rozamiento obtenidos por dicha ecuación son conservadores y se adaptaría mejor a suelos de carácter mixto, en los cuales el alto contenido en finos reduce sustancialmente el ángulo de rozamiento.

### **Obtención de la Cohesión a partir del Ensayo del SPT**

La cohesión puede estimarse a partir del Círculo de Mohr-Coulomb, conocidos los valores de resistencia a la compresión simple, presión intersticial y el ángulo de rozamiento interno, tal y como se muestra en la Figura 25.

Partiendo de la ecuación  $N^\circ$  28 mediante la cual se obtiene el criterio de rotura, se determina el valor de la cohesión:

$$\tau = C_u' + (\sigma_n - u) \cdot \text{tg } \varphi' \quad (33)$$

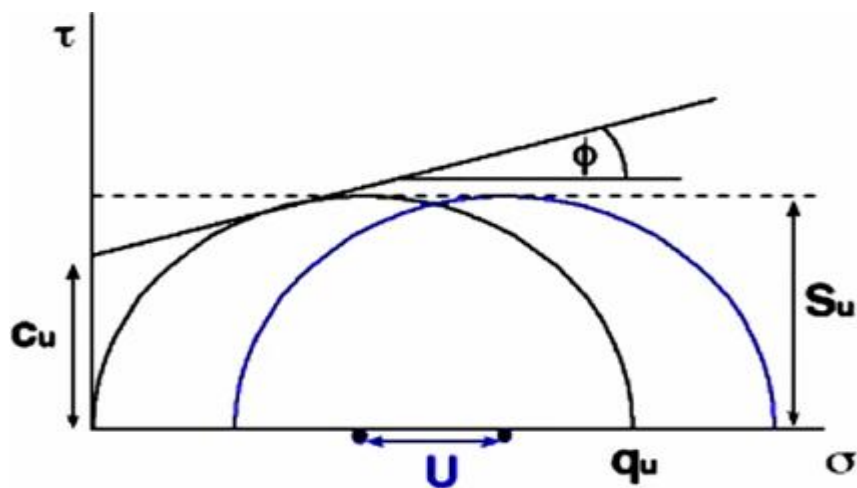


Figura 25 - Círculo de Mohr-Coulomb.

En los terrenos cohesivos, las correlaciones basadas sobre los resultados del ensayo SPT sólo deben considerarse orientativos. En la Tabla 4 se presentan relaciones entre N° de golpes (SPT) y la resistencia a la compresión simple.

Tabla 4 - Propiedades de los Suelos Arcillosos. Hunt 1984, en IGME, 1987

Consistencia	N° de golpes (SPT)	Identificación manual	$\gamma_{sat}$ g/cm <sup>3</sup>	Resistencia a la compresión simple $q_u$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
Dura	> 30	Se marca difícilmente	> 2,0	> 4,0
Muy rígida	15-30	Se marca con la uña del pulgar	2,08-2,24	2,0-4,0
Rígida	8-15	Se marca con el pulgar	1,92-2,08	1,0-2,0
Media (firme)	4-8	Moldeable bajo presiones fuertes	1,76-1,92	0,5-1,0
Blanda	2-4	Moldeable bajo presiones débiles	1,60-1,76	0,25-0,5
Muy blanda	< 2	Se deshace entre los dedos	1,44-1,60	0-0,25

Las resistencias a la compresión simple obtenidas aplicando el método propuesto por Hunt para un mismo golpeo, son demasiado elevadas para suelos mixtos. En el caso de suelos mixtos se va a considerar la ecuación según el estudio realizado por ASG Geotecnia y Sondeos Geotest (Parra & Ramos), que aportaron la siguiente ecuación:

$$C_u = 0,22 \ln N(\text{SPT}) - 0,40 \quad (34)$$

La Figura 26 presenta la relación entre el N° de golpes (SPT) y el ángulo de rozamiento interno propuesta por Hunt (1984) y la propuesta por ASG Geotecnia y Sondeos Geotest par suelos mixtos.

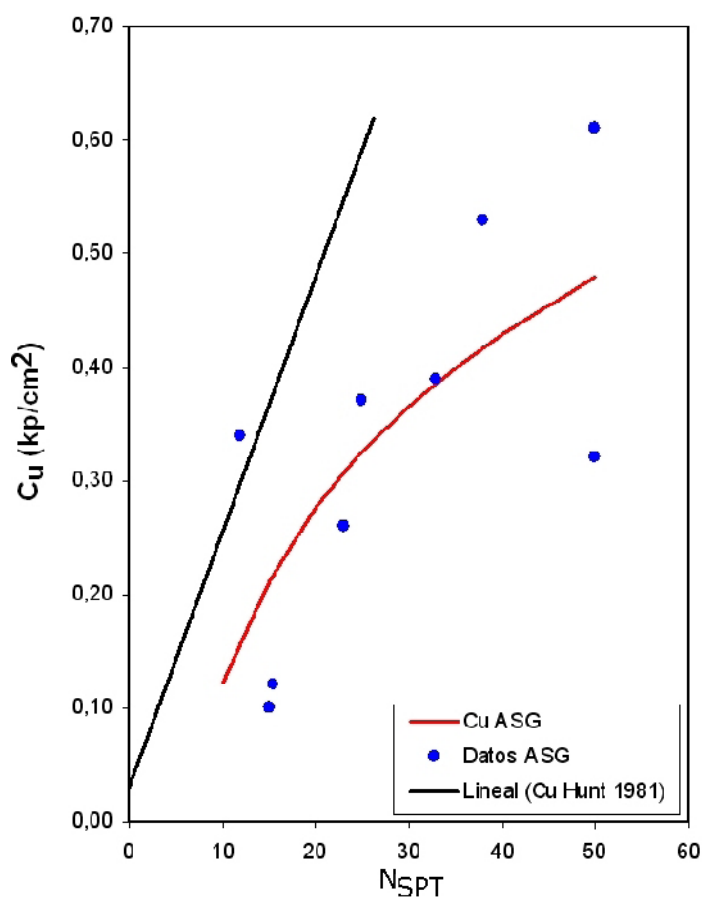


Figura 26 – Relación entre N° de Golpes (SPT) y la Cohesión C<sub>u</sub>

### 3.4. Descripción y clasificación de suelos

Para estudiar un material complejo como es suelo, con diferentes características y composición química es necesario seguir una metodología con definiciones y sistemas de evaluación de propiedades. Así se han clasificado los suelos en grupos en función de su granulometría (Normas A.S.T.M, D.I.N):

- **Gravas**, con tamaño de grano entre 8-10cm y 2mm; se caracterizan porque los granos son observables directamente. No retienen el agua, por la inactividad de su superficie y los grandes huecos, existentes entre partículas.
- **Arenas**, con partículas comprendidas entre 2 y 0,060mm, todavía son observables a simple vista. Cuando se mezclan con el agua no se forman agregados continuos, sino que se separan de ella con facilidad.
- **Limos**, con partículas comprendidas entre 0,060 y 0,002 mm. Retienen el agua mejor que los tamaños superiores.
- **Arcillas**, formadas con partículas con tamaños inferiores a los limos (0,002 mm). Están formadas principalmente, por materiales silicatados, constituidos por hojas tetraédricas y octaédricas, unidas por enlaces covalentes y enlaces de Van der Waals, pudiendo entrar moléculas de agua entre las hojas produciendo a veces, aumentos de volumen, por lo que son generalmente los materiales más problemáticos.

En la Figura 27 se puede observar diferente tipo de suelos clasificados en función de su granulometría.

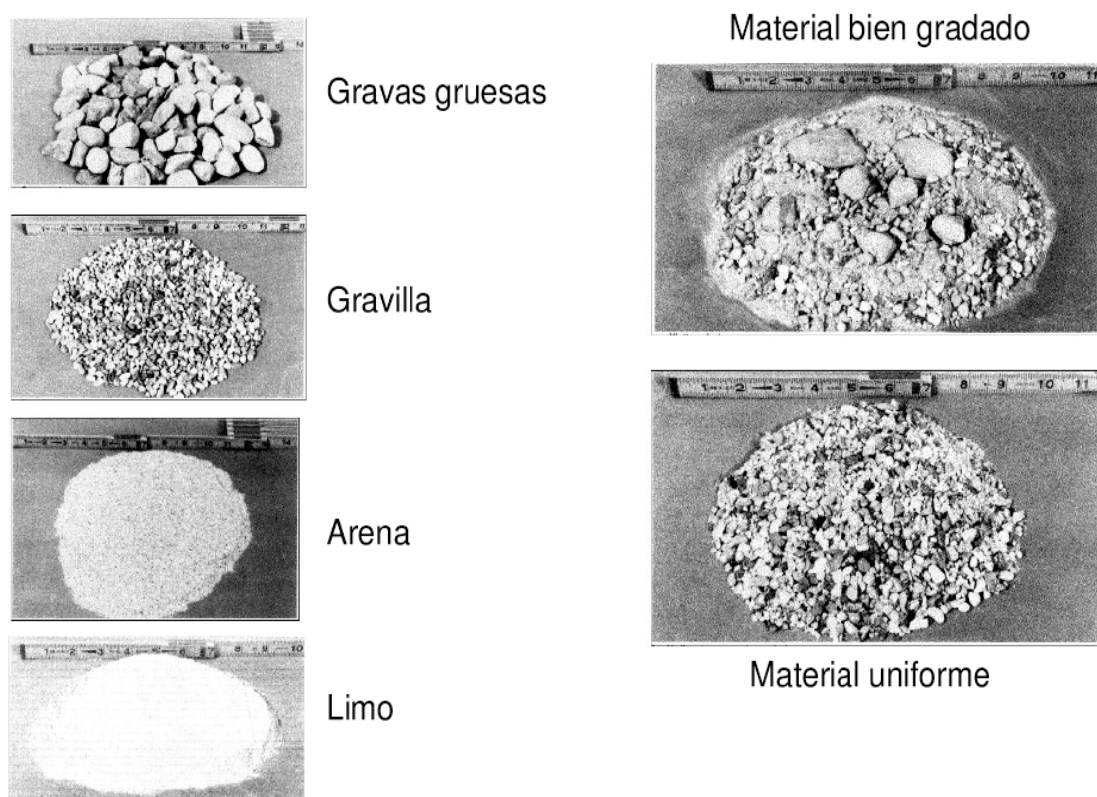


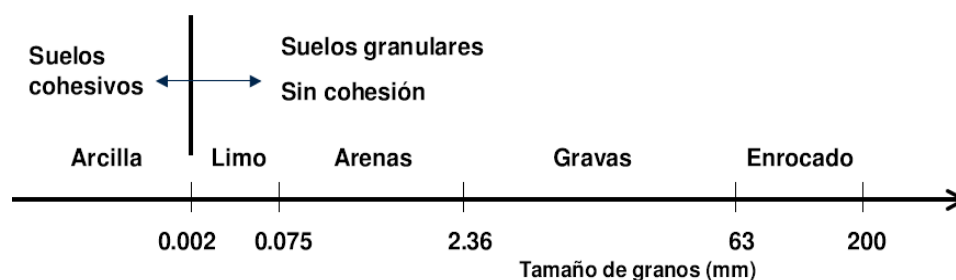
Figura 27 – Suelos en Función de su Granulometría

La Tabla 5 presenta un resumen de las categorías y principales características de los suelos.



Tabla 5 – Categorías de Suelos y sus Características

Categorías de suelos y sus características				
Material	Tamaños de partículas	Resistencia	Compresibilidad	Permeabilidad
<b>Roca</b>		Muy alta	Muy baja	Media a baja
Suelo <b>Granular</b> (gravas y arenas)	G: 100-2mm S: 2 – 0.06mm	Alta	Baja	Alta
Suelos <b>arcillosos</b> o cohesivos (arcilla y limo)	L: 0.06 – 0.002 A: <0.002 mm	Media a baja	Alta	Baja a Muy Baja
Suelo <b>orgánico</b>		Muy baja	Muy Alta	Baja
Suelo artificial o <b>urbano</b> (relleno)		Media a baja	Media a Alta	Baja a alta



### 3.4.1. Clasificaciones Geotécnicas

La clasificación de suelos consiste en incluir un suelo, en un grupo que presenta un comportamiento semejante. La correlación de ciertas propiedades con un grupo de un sistema de clasificación suele ser un proceso empírico.

Son consideradas clasificaciones geotécnicas convencionales aquellas que se basan en los ensayos de granulometría y límites de Attenberg<sup>a</sup> (Límite de liquidez y Límite de plasticidad) para clasificar y determinar el estado de los suelos. Entre las más utilizadas en el mundo se encuentra la SUCS.

- **Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)**

Casagrande<sup>b</sup> definió este sistema de identificación con datos de granulometría muy usado en la práctica, representado en la Figura 28. En esta clasificación, los suelos son agrupados en 15 grupos, representados por dos letras, de la siguiente forma:

<sup>a</sup> y <sup>b</sup> léase en Gonzales de Vallejo (2002), citado en bibliografía.

**Suelos Gruesos:** GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM, SC.

**Suelos finos:** CL, ML, OL, CH, MH, OH, PT.

El significado de la primera letra es el siguiente:

G: *gravel* (grava)

S: *sand* (arena)

C: *clay* (arcilla)

M: *mō* (limo en sueco)

O: *organic* (orgánico)

PT: *peat* (turba)

El significado de la segunda letra es el siguiente:

W: *well* (bien graduado)

P: *poor* (mal graduado)

C: *clayey* (arcilloso)

Para los suelos finos (indicando plasticidad):

L: *low* (baja plasticidad)

H: *high* (alta plasticidad)

Identificación en el campo (excluyendo las partículas mayores de 7,6 cm y basando las fracciones en pesos estimados)				Simbolo del grupo	Nombres típicos					
Suelos de grano grueso-Más de la mitad del material es retenido por el tamiz N.º 200	Gravas más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz N.º 4	Para la clasificación visual puede suponerse que la abertura del tamiz N.º 4 es equivalente a medio centímetro	Gravas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Amplia gama de tamaños y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	<b>GW</b>	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con pocos finos o sin ellos				
			Predominio de un tamaño o un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios	<b>GP</b>	Gravas mal graduadas, mezclas de arena y grava con pocos finos o sin ellos					
			Fracción fina no plástica (para la identificación ver el grupo <i>ML</i> más abajo)	<b>GM</b>	Gravas limosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y limo					
			Finos plásticos (para identificación ver el grupo <i>CL</i> más abajo)	<b>GC</b>	Gravas arcillosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y arcilla					
	Arenas más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz N.º 4	Para la clasificación visual puede suponerse que la abertura del tamiz N.º 4 es equivalente a medio centímetro	Arenas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Amplia gama de tamaños y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	<b>SW</b>	Arenas bien graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos				
			Predominio de un tamaño o un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios	<b>SP</b>	Arenas mal graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos					
			Finos no plásticos (para identificación ver el grupo <i>ML</i> más abajo)	<b>SM</b>	Arenas limosas, mezclas de arena y limo mal graduadas					
			Finos plásticos (para identificación ver el grupo <i>CL</i> más abajo)	<b>SC</b>	Arenas arcillosas, mezclas mal graduadas y arenas y arcillas					
	Métodos de identificación para la fracción que pasa por el tamiz N.º 40									
	Suelos de grano fino-Más de la mitad del material pasa por el tamiz N.º 200 (La abertura del tamiz N.º 200 corresponde aproximadamente al tamaño de la menor partícula apreciable a simple vista)	Limos y arcillas con límite líquido menor de 50	Resistencia en estado seco (a la disgregación)	Distancia (reacción a la agitación)	Tenacidad (consistencia)					
						Nula a ligera	Rápida a lenta	Nula	<b>ML</b>	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas con ligera plasticidad
						Media a alta	Nula a muy lenta	Modia	<b>CL</b>	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas
Ligera a media		Lenta	Ligera	<b>OL</b>	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad					
Limos y arcillas con límite líquido mayor de 50		Resistencia en estado seco (a la disgregación)	Distancia (reacción a la agitación)	Tenacidad (consistencia)	Ligera a media	Lenta a nula	Ligera a media	<b>MH</b>	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o con diatomeas, suelos limosos	
					Alta a muy alta	Nula	Alta	<b>CH</b>	Arcillas inorgánicas de plasticidad elevada, arcillas grasas	
	Media a alta				Nula a muy lenta	Ligera a media	<b>OH</b>	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta		
Suelos altamente orgánicos		Fácilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa			<b>Pt</b>	Turba y otros suelos altamente orgánicos				

Los suelos que poseen características de dos grupos se designan con la combinación de los dos símbolos. P. ej., *GW-GC*, mezcla bien graduada de arena y grava. Todos los tamaños de tamices se refieren al U.S. Standard.

Figura 28 – Clasificación de Suelos SUCS

### 3.5. Datos Estructurales de la Planta Nuclear

La Central Nuclear ocupa un área aproximada de 1.250 ha, las estructuras fueron cimentadas en roca sin fracturamiento.

La Planta Nuclear Angra 2 por pertenecer al grupo de construcciones especiales debe ser construida cumpliendo las normas de seguridad, por lo que el factor de seguridad a utilizar para esta construcción es 4.

Los cimientos sobre los que es construida la planta debe considerar las condiciones del terreno, en nuestro caso la Planta Nuclear Angra 2 se necesita obligatoriamente un conjunto de pilotes distribuidos en toda el área de cimentación. Los pilotes generalmente son estructuras metálicas, que son clavadas en el suelo a través de la presión ejercida por una maquina de tipo martillo.

En perfiles de suelos estratificados con horizontes de arena y arcilla orgánica es necesario contar con pilotes dentro del plan de cimentación, estos garantizaran que los asentamientos sean homogéneos en toda la estructura; ya que la superficie de falla bajo carga, en este tipo de suelos, puede extenderse a través de dos o más estratos. La determinación de la capacidad de carga en suelos estratificados se estima de acuerdo al procedimiento propuesto por Meyerhof y Hanna (1978) y Meyerhof (1974).

Para una cimentación superficial de dos horizontes de suelos a diferentes profundidades se utilizan los siguientes parámetros físicos:

Tabla 6 – Parámetros de Resistencia de dos Horizontes de Suelos

<b>Estrato</b>	<b>Peso específico</b>	<b>Angulo de fricción del suelo</b>	<b>Cohesión</b>
Superior	$\gamma_1$	$\phi_1$	$C_1$
Inferior	$\gamma_2$	$\phi_2$	$C_2$

En esta tesis, se ha desarrollado un modelo tridimensional de las capas de suelo y una distribución de los parámetros de resistencia, con esta información el ingeniero estructural podrá desarrollar un mejor diseño de su cimentación, optimizando tanto la seguridad como los costos.

## **CAPITULO IV:**

### **INVESTIGACION Y EVALUACION GEOLOGICA-GEOTECNICA DEL AREA ANGRA 2, PLANTA NUCLEAR DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA**

#### **4.1. Investigación del Subsuelo**

##### **4.1.1. Modelamiento Geológico**

La metodología de modelaje geológico y geotécnico es una modificación de la metodología de Houlding (1994), y está dividida en modelamiento geométrico y numérico. El modelamiento geométrico debe dar un espacio tridimensional a partir del cual se podrá producir un modelo de bloques y se podrá evaluar la variabilidad espacial con métodos geoestadísticos. Según Gutiérrez (2009), se recomienda un proceso o conjunto de criterios que evalúe toda la información en unidades geológicas geotécnicas homogéneas.

En la realidad, los parámetros geológico-geotécnicos (forma, tamaño, volumen, discordancia estratigráfica, granulometría, etc.) reales de un depósito serán conocidos completamente solo cuando se realice el trabajo *in situ*. Además es labor del ingeniero interpretar toda la información disponible y definir un modelo aproximado del depósito cuaternario. En la Figura 29 se presenta el flujo del modelaje utilizado en este trabajo de investigación modificado a partir de la metodología de Houlding (1994).

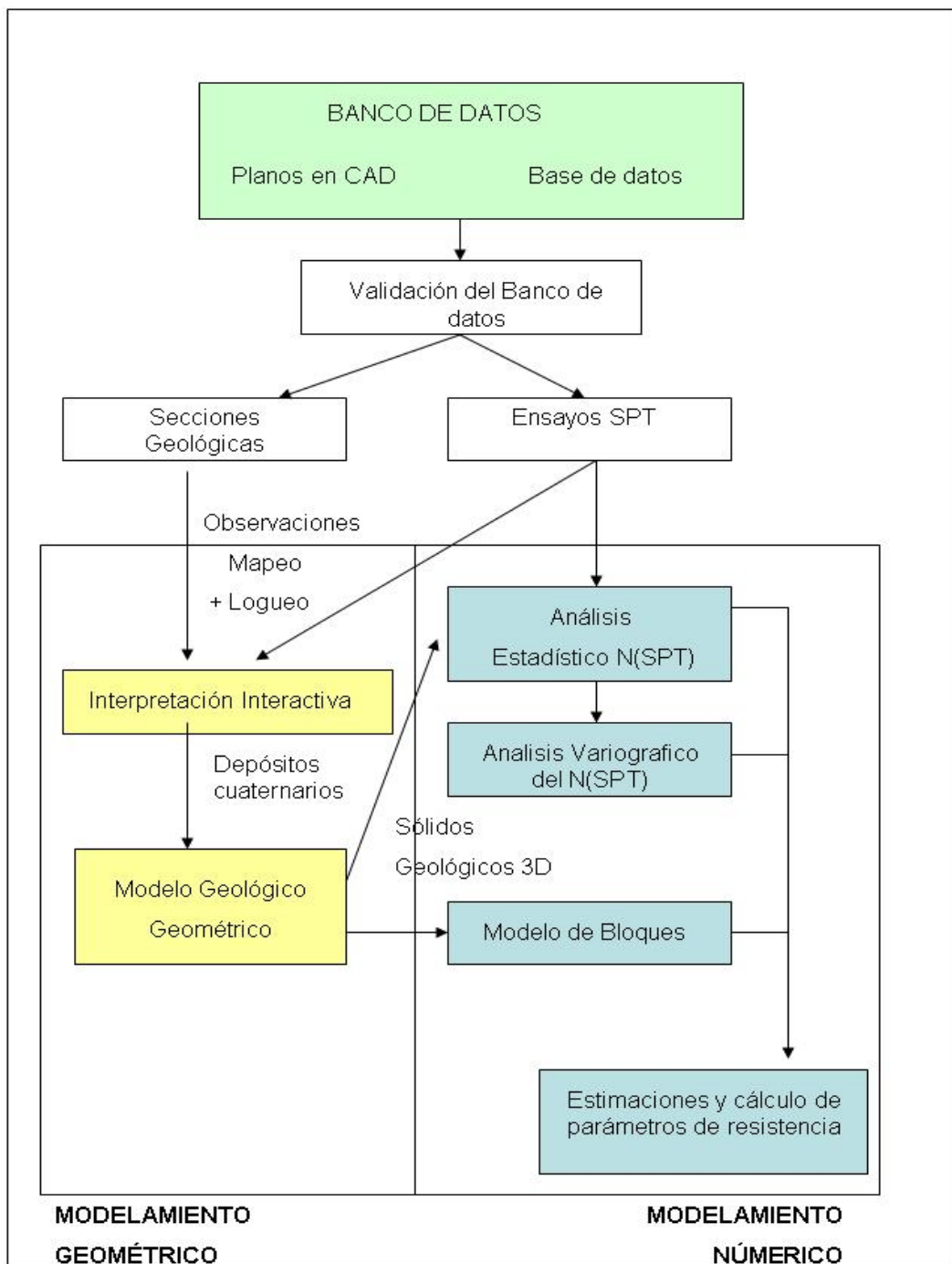


Figura 29 - Flujo Utilizando en el Modelamiento (modificado a partir de S. Houlding, 1994)

## Modelamiento Geológico-Geométrico

### Metodología del Trabajo

#### Levantamiento de los Datos

Se realizaron 111 huecos de sondeos para los ensayos de penetración SPT, estos ensayos fueron realizados cada 1m de profundidad en un área de 400 x 400m<sup>2</sup>, la distribución de estos puntos se presentan en la Figura 30. Los resultados obtenidos en estos ensayos se presentan en la planilla de la Figura 31.

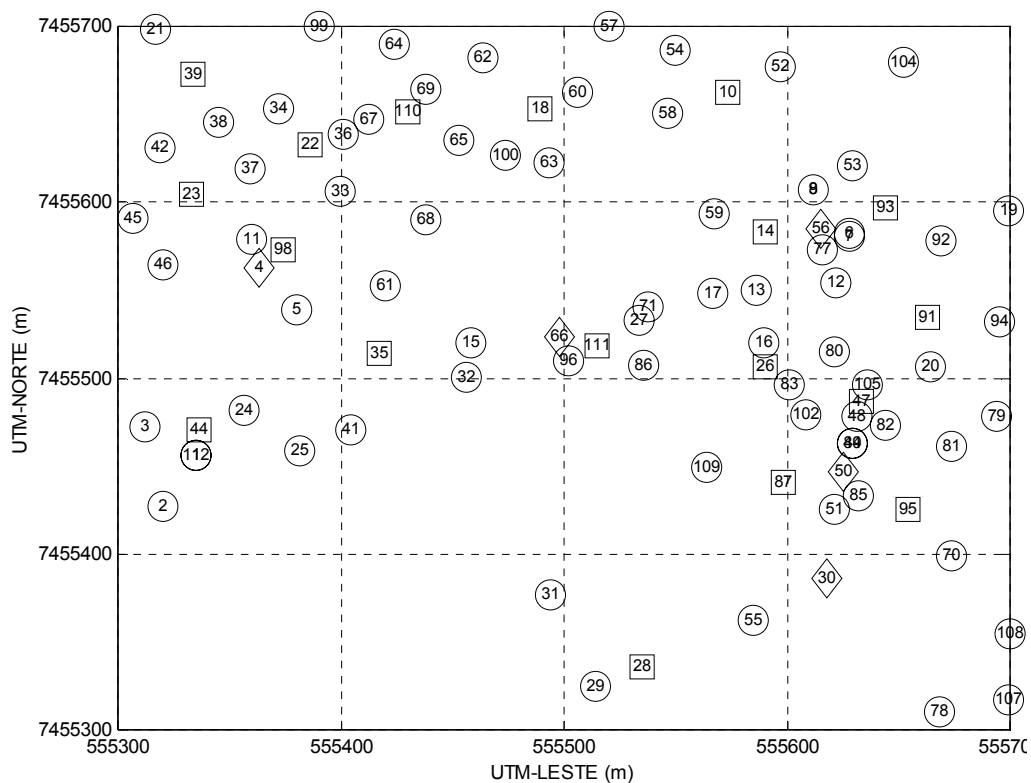


Figura 30 - Vista en Planta de la Distribución en el Terreno de los Ensayos de Penetración SPT

**PLANILLA SPT**

Sondeo: 46 ó CHI

Boca del orificio (m) = 0.00

Cota del nivel impenetrable = -18.70

Cota del nivel de agua= 2.35

Coordenadas de la perforación= 7455487.0 555633.5

<b>Profundidad (m)</b>	<b>SPT</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Horizonte</b>
1	8	A-F-M-PC-MC	1
2	15	A-F-M-PC-MC	1
3	10	A-F-M-PC-MC	1
4	7	A-F-M-PC-MC	1
5	9	A-F-M-PC-MC	1
6	15	ASAR-PC-MC	2
7	18	ASAR-PC-MC	2
8	5	ASAR-PC-MC	2
9	4	ASAR-PC-MC	2
10	5	ASAR-PC-MC	2
11	6	ASAR-PC-MC	2
12	8	ASAR-PC-MC	2
13	3	ARORG-M-MM	3
14	2	ARORG-M-MM	3
15	23	ASAR-PC-MC	2
16	8	ASAR-PC-MC	2
17	15	ARORG-M-MM	3
18	22	ARORG-M-MM	3

Figura 31 - Planilla Conteniendo los Datos Obtenidos en los Ensayos SPT



La Tabla 7 presenta los colores utilizados en el modelamiento geológico tridimensional de cada código litológico, esto ayudará a identificar fácilmente el tipo de unidad geotécnica.

Tabla 7 - Tipo de Materiales Geotécnicos Identificados en los Sondeos SPT

<b>Código litológico</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Color del código</b>
A-F-M-PC-MC	Arena fina a media, poco compacta a medianamente compacta	Amarillo
ASAR-PC-MC	Arena limo-arcillosa, poco compacta a medianamente compacta	Verde
ARORG-M-MM	Arcilla orgánica, consistencia suave a muy suave	Azul
ROCA	Roca	Gris
Canto rodado	Canto rodado	Blanco
AGUA	Lámina de agua en la superficie del terreno	Celeste

Con los datos obtenidos de los ensayos, que están representados en la planilla descrita anteriormente, se creó una base de datos en el programa *MS access' 2003* para la ejecución de los análisis estadísticos y geoestadísticos.

#### **Base de Datos**

Los datos de los sondeos fueron compilados, organizados y estructurados en forma de un banco de datos operacional en la aplicación *Microsoft Access'2003*. Esta etapa fue esencial para la viabilidad de la investigación, ya que las consultas al banco de datos brindan la base de datos utilizadas para los análisis realizados.

#### **Preparación del Banco de Datos Geotécnicos**

Después de la etapa de selección y colecta de los sondeos, que pueden ser considerados, como un banco de datos analógico en formulario, fue necesaria la elaboración de un banco de datos en medio digital para el debido almacenamiento de todos los datos presentes en las fichas de sondeos, esperando abastecer las bases de

datos necesarias para la realización de los análisis estadísticos y geoestadísticos. El programa seleccionado como Sistema Gerenciador de Banco de Datos Relacional fue el *Microsoft Access 2003* para *Windows de la Microsoft XP* por poseer una interfase interactiva y recursos adecuados a las rutinas de análisis procesadas.

La estructura de la base de datos está compuesta por las tablas N° 1 y N° 2 (Figura 32 - Banco de Datos de Sondeos SPT

La Tabla N°1 está compuesta por los siguientes campos:

- Sondeo.- nombre del sondeo, identificado de la planilla del ensayo SPT.
- Norte.- coordenada norte en el sistema UTM.
- Este.- coordenada este en el sistema UTM.

La tabla N° 2 está compuesta por los siguientes campos:

- N(SPT).- número de golpes del ensayo SPT.
- Profundidad.- del punto central del intervalo ensayado.
- Litología.- tipo de material geológico o no geológico identificado en campo.
- Clasificación Geotécnica.- Código de clasificación de suelos según SUCS.
- Código de litología.- código numérico identificador de cada capa de suelos.

En la Figura 32 se muestra, el Formulario del Banco de Datos de Sondeos SPT, está compuesto por varias tablas que almacenan todos los datos presentes en los informes de los sondeos seleccionados. Los datos de cada estrato de suelo fueron almacenados como una tabla independiente, así como las tablas con los datos de SPT. La alimentación de los datos al banco de datos elaborados se da vía formulario que es una estructura que concatena las tablas a través de las relaciones. De este modo, es posible la organización de todos los datos que en forma secuencial alimentan el sistema. Con el banco de datos alimentado completamente, se iniciaron las investigaciones, con las cuales se obtuvo las bases de datos de los análisis emprendidos.

<b>BASE DE DATOS DE LOS SONDEOS SPT</b>		
<b>Codigo</b>		<b>Sondeo</b>
4		A-1
<b>Norte</b>	<b>Este</b>	<b>Profundidad (m)</b>
7455336	555535	4
<b>DESCRIPCIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO</b>		
<b>N° de Golpes (SPT)</b>		
13		
<b>Litología</b>		
A-F-M-PC-MC		
<b>Clasificación Geotécnica</b>		
SW		

Figura 32 - Banco de Datos de Sondeos SPT

Se establecieron reglas para el modelamiento geológico, estas reglas se aplican en el modelamiento a través de secciones verticales.

Se definieron las secciones geológicas verticales con dirección Norte - Sur en el software GEMCOM ingresando los datos de las secciones (observar Tabla 8) en este caso 17 secciones.

Tabla 8 - Características de las Secciones Verticales

Secciones	Punto Izquierdo		Punto Derecho		Elevaciones de las Secciones		Influencia de las Secciones	
	Norte	Este	Norte	Este	Mínima Elevación (m)	Máxima Elevación (m)	Atrás (m)	Adelante (m)
1AN	555772.50	7455306.42	555303.90	7455306.42	-32.10	8.39	40	40
2AN	555772.50	7455346.42	555303.90	7455346.42	-32.10	8.39	40.00	40.00
3AN	555772.50	7455386.42	555303.90	7455386.42	-32.10	8.39	40.00	40.00
4AN	555772.50	7455426.42	555303.90	7455426.42	-32.10	8.39	40.00	40.00
5AN	555772.50	7455466.42	555303.90	7455466.42	-32.10	8.39	40.00	40.00
6AN	555772.50	7455506.42	555303.90	7455506.42	-32.10	8.39	40.00	40.00
7AN	555772.50	7455546.42	555303.90	7455546.42	-32.10	8.39	40.00	40.00
8AN	555772.50	7455586.42	555303.90	7455586.42	-32.10	8.39	40.00	40.00
9AN	555772.50	7455626.42	555303.90	7455626.42	-32.10	8.39	40.00	40.00
10AN	555772.50	7455666.42	555303.90	7455666.42	-32.10	8.39	40.00	40.00
10YA	555772.50	7455546.42	555303.90	7455546.42	-32.10	8.39	10.00	10.00
11YA	555772.50	7455566.42	555303.90	7455566.42	-32.10	8.39	10.00	10.00
12YA	555772.50	7455586.42	555303.90	7455586.42	-32.10	8.39	10.00	10.00
13YA	555772.50	7455606.42	555303.90	7455606.42	-32.10	8.39	10.00	10.00
14YA	555772.50	7455626.42	555303.90	7455626.42	-32.10	8.39	10.00	10.00
15YA	555772.50	7455646.42	555303.90	7455646.42	-32.10	8.39	10.00	10.00
16YA	555772.50	7455666.42	555303.90	7455666.42	-32.10	8.39	10.00	10.00

A continuación en la Figura 33 se muestra la posición tridimensional de los sondeos SPT.

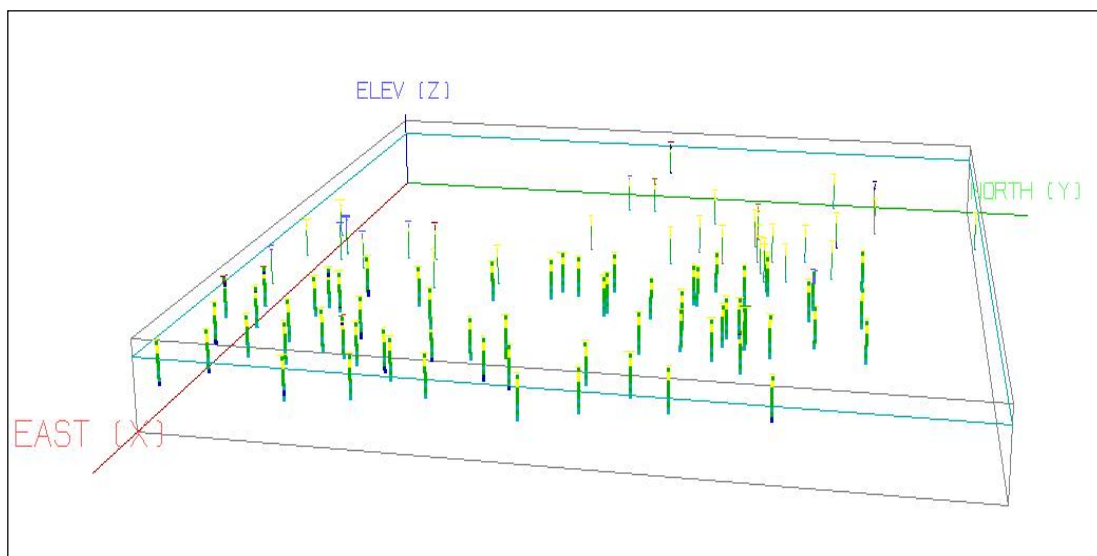


Figura 33 - Sondeos SPT -Tridimensional

La Figura 34 muestra el modelo geológico tridimensional del área de estudio.

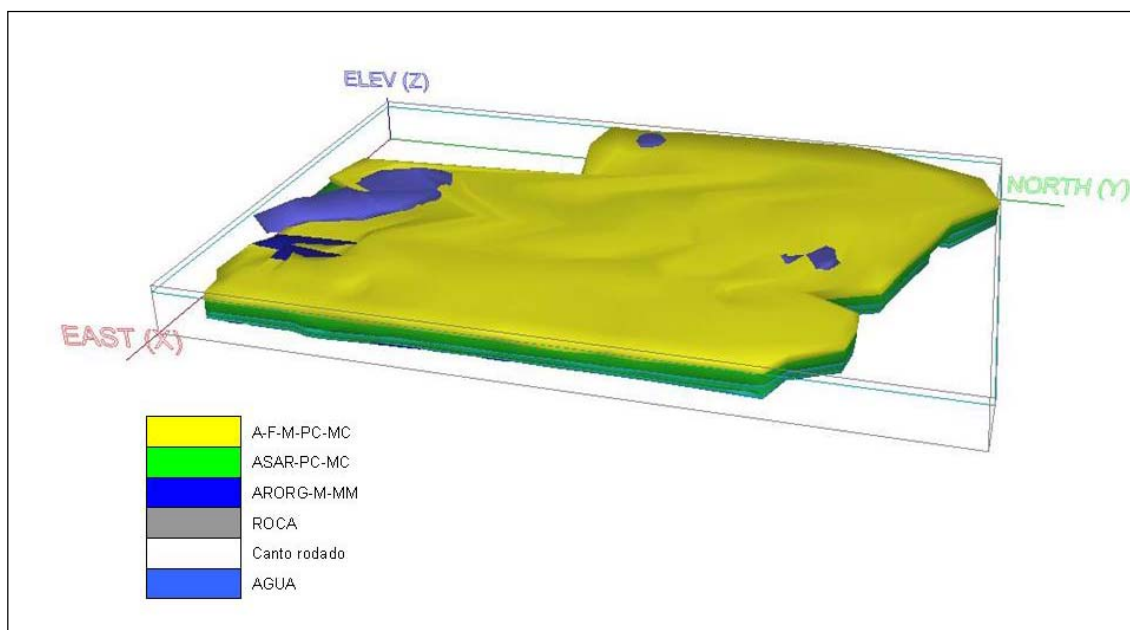


Figura 34 - Modelo Geológico Tridimensional del Área de Estudio

## **Modelamiento Geológico Numérico**

### **Modelamiento Numérico**

Se trata del proceso que subdivide los sólidos geológicos elaborados en el modelaje geométrico en bloques de dimensiones constantes en cada dirección (norte-sur, este-oeste, vertical). Al conjunto de todos los bloques se le denomina modelo de bloques y es muy utilizado en geoestadística.

### **Grilla de Bloques**

Los modelos o grillas de bloques se utilizan mucho en depósitos metálicos, no metálicos y depósitos cuaternarios. El depósito se subdivide en paralelepípedos con una o dos dimensiones variables dependiendo del tipo de trabajo.

El primer modelo de bloques se utilizó a inicio de los años 60 por la Kennecott Koper Corporation en un depósito de pórfido de cobre masivo. El segundo tipo de modelo se desarrolló en 1968 cuando nace la necesidad de juntar numerosos bloques regulares de desmonte en uno solo.

Cada uno de los bloques debe contener toda la información necesaria para las fases de avance del proyecto. La determinación de las dimensiones óptimas de un bloque depende principalmente de:

- Continuidad geológica del depósito.
- Tamaño del muestreo y espaciamiento.
- Capacidad de las máquinas de muestreo.
- Tamaño de la operación.
- Límites propios del software o del computador.

Estos modelos principalmente se desarrollaron para observar la distribución espacial de los valores de elementos económicos, además recientemente se han utilizado para modelar formas de unidades geológicas, unidades geotécnicas y acuíferos de agua subterránea.

Los modelos pueden ser ortogonales o con rotación como se muestra en la Figura 35.

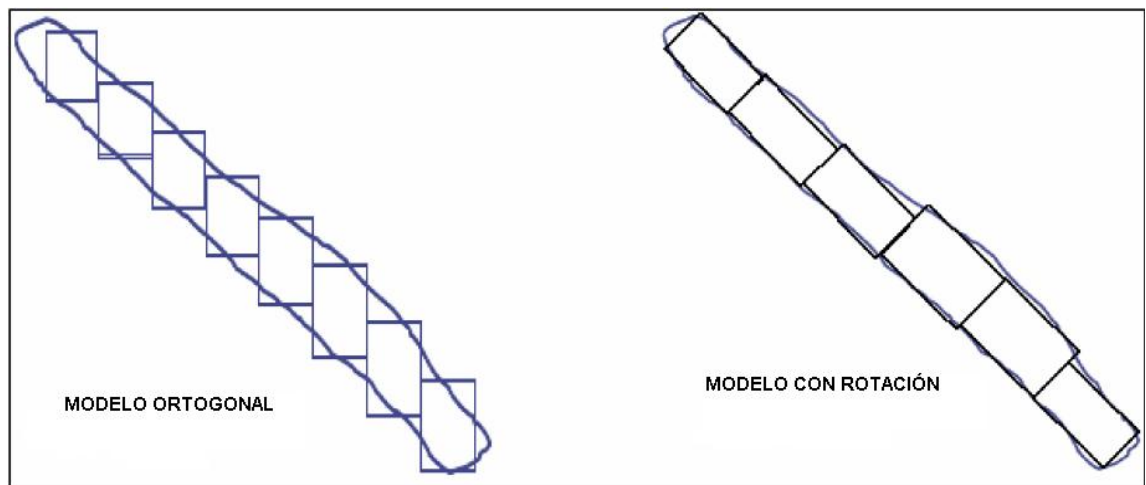


Figura 35 - Tipos de Modelos de Bloques

### Tamaño del Bloque

El bloque ortogonal unitario es presentado en la Figura 36.

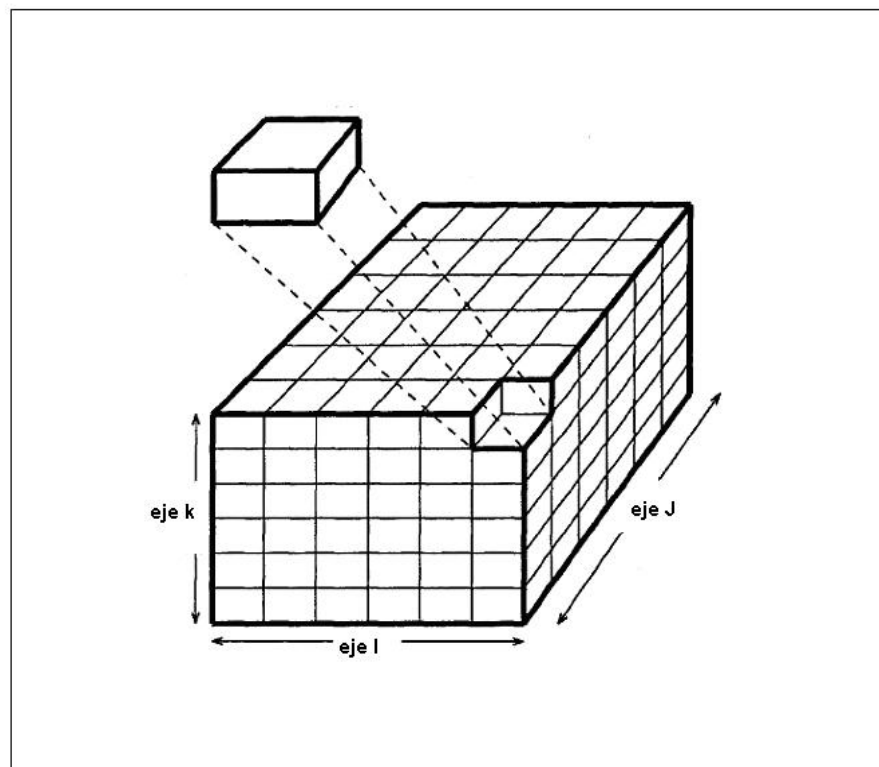


Figura 36 - Bloque Ortogonal Unitario

### Metodología del Modelamiento Numérico

La Figura 37 y la Figura 38 muestran el procedimiento inicial para la estimación. En la primera parte del proceso se realiza el análisis estadístico de cada tipo de suelo, en la segunda se determinan los parámetros variográficos y finalmente se realiza la previsión de los valores del N° de golpes (SPT) por tipo de suelo.

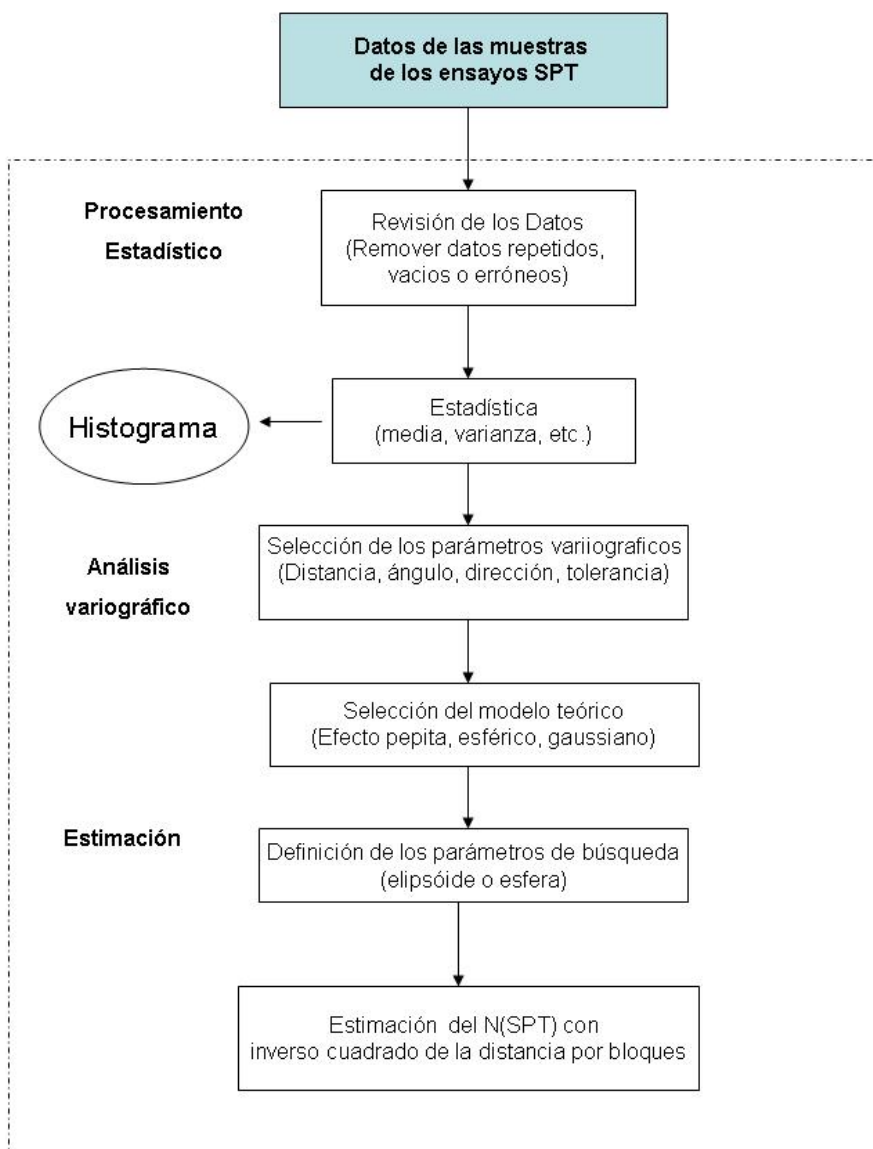


Figura 37 - Procedimiento para la Evaluación Numérica



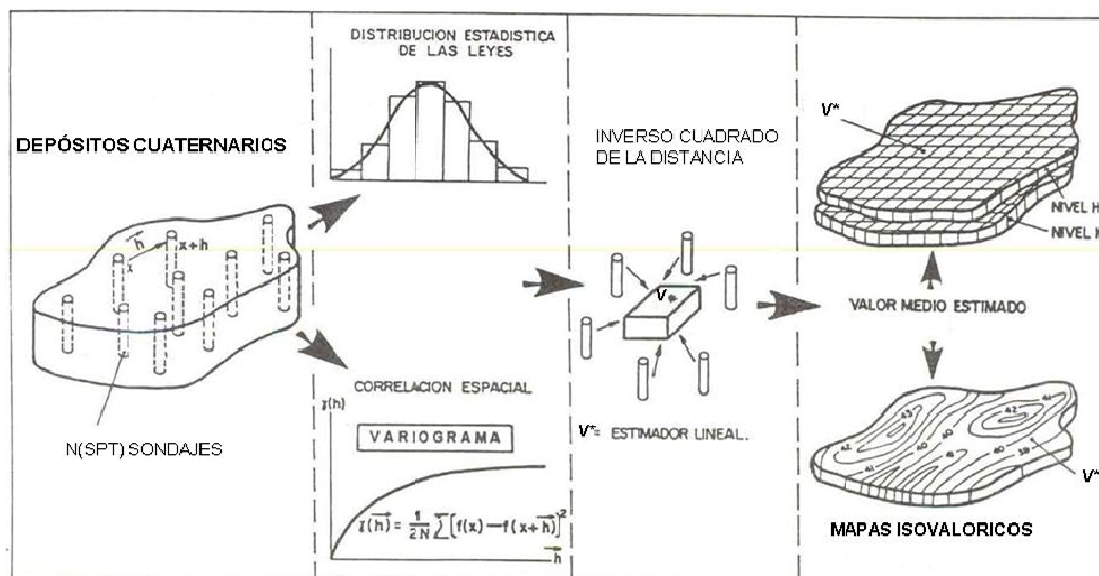


Figura 38 - Diagrama Esquemático del Modelamiento Numérico

## Vecindad

Visto que todos los cálculos producidos de la geoestadística usando semi-variogramas son funciones principalmente de distancias específicas, entonces la vecindad usada en la estimación se vuelve un punto de extrema importancia. Varios son los métodos que se pueden utilizar, cada uno con ventajas y desventajas.

## Volumen de Búsqueda

La forma del volumen de búsqueda más utilizado es la elipse centrada en el punto central del bloque que va ser estimado. Sus ejes y orientación son definidos por la anisotropía del esquema de continuidad espacial.

El elipsoide es construido a partir de los variogramas direccionales. Estos determinan la zona de influencia en un proceso de llenado de los bloques, también ayudan a identificar regiones con valores parecidos (ver Figura 39).

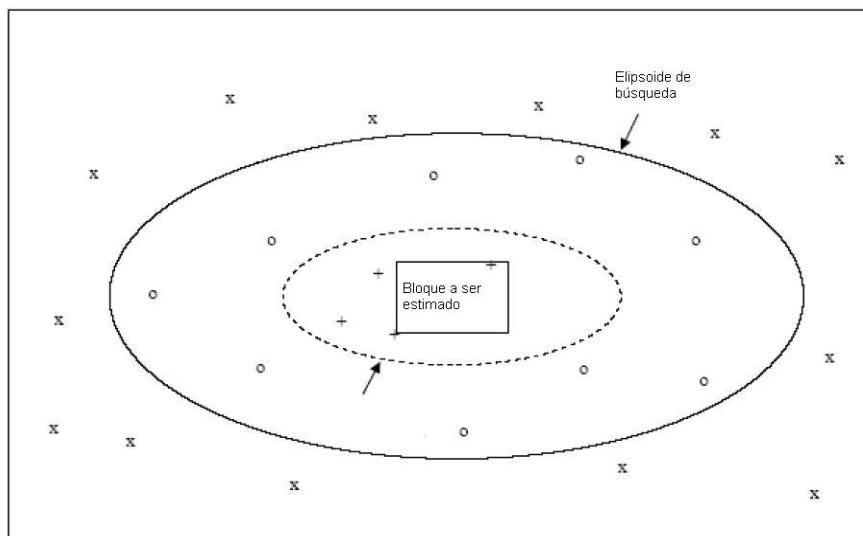


Figura 39 - Volumen de Búsqueda Visto en el Plano

### Número de Muestras

Depende directamente del tamaño del bloque y del tamaño del volumen de búsqueda. Se define el número mínimo de muestras que necesita la estimativa de un bloque y el óptimo número de muestras por sector (en el caso de usar el método de los octantes).

### Modelo de Bloques de las Unidades Geotécnicas

Las capas de suelo fueron discretizadas usando sólidos irregulares cuyos ejes son perpendiculares entre sí. Estos paralelepípedos poseen dimensiones similares en el eje X (Este-Oeste) y en el eje Y (Norte-Sur).

Las características principales de estos paralelepípedos (modelos de bloques ortogonales) se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 9 - A-F-M-PC-MC

<b>Eje</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>Dimensión Unitaria (m)</b>	<b>N° Bloques</b>
X	7455305	7455660	365	5	73
Y	555295	555790	495	5	99
Z	-18	5	23	1	23

Tabla 10 - ASAR-PC-MC-2A

<b>Eje</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>Dimensión Unitaria (m)</b>	<b>N° Bloques</b>
X	7455306	7455666	360	5	72
Y	555296	555787	491	5	99
Z	-22.5	0.5	23	1	23

Tabla 11 - ARORG-M-MM-3A

<b>Eje</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>Dimensión Unitaria (m)</b>	<b>N° Bloques</b>
X	7455305	7455670	365	5	73
Y	555296	555787	491	5	99
Z	-23	-6	17	1	17

Tabla 12 - ASAR-PC-MC-2B

<b>Eje</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>Dimensión Unitaria (m)</b>	<b>N° Bloques</b>
X	7455305	7455670	365	5	73
Y	555296	555787	491	5	99
Z	-23	-6	17	1	17

Tabla 13 - ARORG-M-MM-3B

<b>Eje</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>Dimensión Unitaria (m)</b>	<b>N° Bloques</b>
X	7455305	7455670	365	5	73
Y	555296	555787	491	5	99
Z	-26	-7	23	1	23

#### 4.1.2. Propiedades y Parámetros de Resistencia del Suelo

En un proyecto de diseño de una cimentación se distinguen tres fases fundamentales (ver Figura 40):

La primera fase es la recolección de datos, el primer conjunto de datos: el tipo de estructura, la situación de los pilares y las cargas previstas. El segundo conjunto de datos se refiere al terreno y se recopilarán en un informe geotécnico; en particular habrá que considerar la resistencia del terreno al esfuerzo cortante, su peso específico y su deformabilidad. En cuanto a la resistencia, está vendrá dada en términos del ángulo de rozamiento interno y la cohesión en el caso de suelos arenosos y mixtos, o mediante la resistencia al corte sin drenaje en el caso de suelos arcillosos.

La segunda fase es la determinación de las tensiones de hundimiento del suelo y de las presiones admisibles. La tercera fase corresponde al diseño estructural, es decir el tamaño y forma de las cimentaciones.

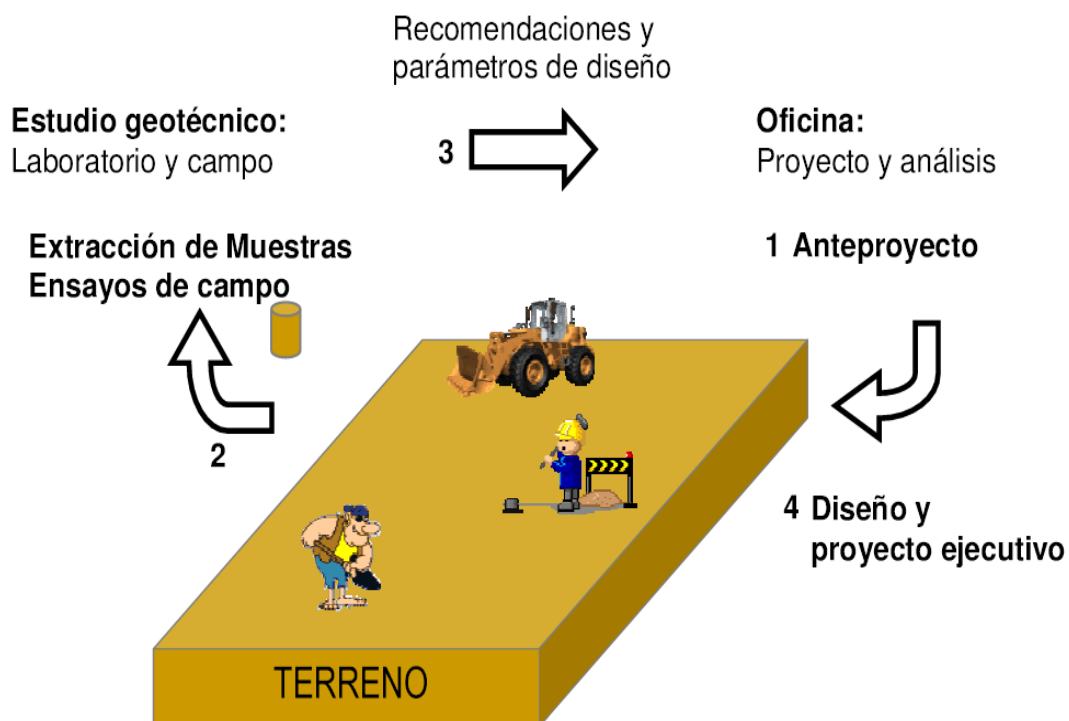


Figura 40 - Actores que Intervienen en un Proyecto de Cimentación

Los depósitos cuaternarios estudiados se clasifican geotécnicamente según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como:

Tabla 14 - Clasificación Geotécnica de los Depósitos Cuaternarios SUCS

<b>Código litológico</b>	<b>Clasificación Geotécnica (SUCS)</b>	<b>Descripción</b>
A-F-M-PC-MC	SW	Arena limpias con pocos finos o sin ellos. Arenas bien graduadas.
ASAR-PC-MC	SM	Arena limosas, arenas con cantidad de finos apreciable. Mezcla de arena y limo mal graduado.
ARORG-M-MM	OH	Arcilla orgánica de plasticidad media a alta.

Las relaciones empíricas son utilizadas de acuerdo al tipo de suelo y a su clasificación geotécnica.

Para trabajar a favor de la seguridad, en el presente trabajo se considera que el nivel freático se encuentra al mismo nivel de la superficie del terreno.

#### **Caso I. A-F-M-PC-MC**

Al tratarse de suelos granulares se considera la densidad como un parámetro importante en relación a la resistencia del suelo. Un suelo bien graduado, posee partículas de muchos tamaños distintos, así, los granos medianos pueden ocupar los poros de las partículas más gruesas, las partículas mas finas ocupan los espacios entre las medianas, y así de forma sucesiva. Esta posibilidad da lugar a que en un suelo bien graduado se pueda alcanzar una estructura más densa y mas resistente que en un suelo uniforme.

Para el cálculo de la densidad relativa en función del N° de golpes (SPT) en suelos granulares se considera la relación propuesta por Hunt que se muestra en la tabla 03.

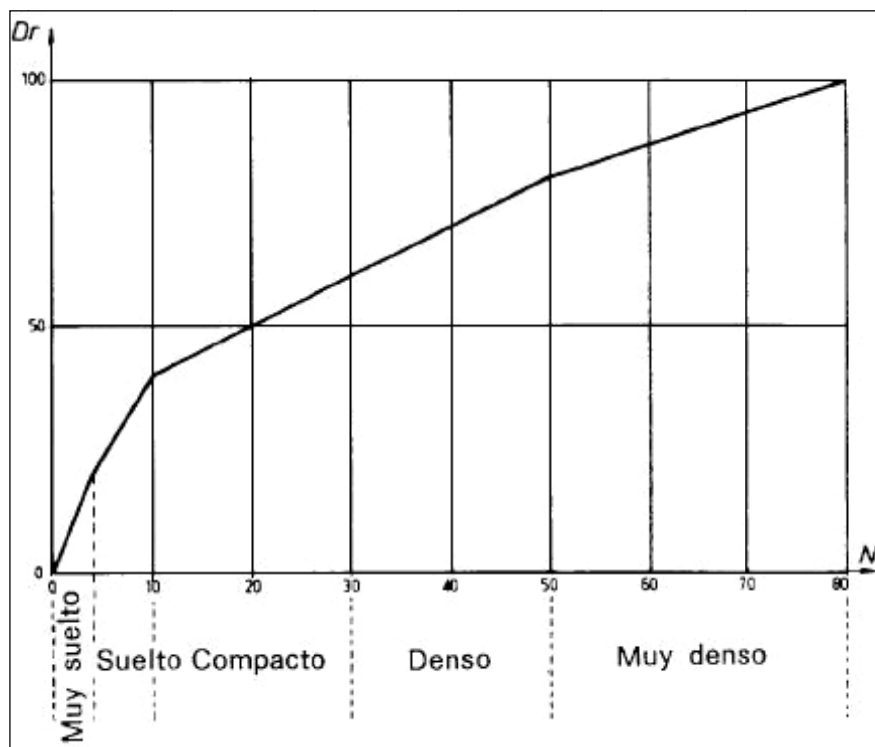


Figura 41 - Relación entre Densidad Relativa y el N° de Golpes (SPT)

Se utilizará la expresión propuesta por Meyerhof (1956) para suelos arenosos, para la obtención del ángulo de rozamiento interno presentada en la ecuación (30), definida en la página 52.

$$\Phi' = 30 + 0.15 Dr \text{ (< 5\% arena fina y limo)}$$

donde:

$Dr$  = densidad relativa (%).

Por tratarse de una arena limpia presenta una cohesión que tiende a considerarse nula, por tanto se tiene  $C' = 0$ .

### **Caso II. ASAR-PC-MC**

Se trata de un suelo mixto con presencia de arena y limo. Para este suelo se utilizará la expresión combinando la ecuación de Schmertmann para valores de  $N$ (SPT) bajos, con la regresión logarítmica obtenida para facies españolas de suelos mixtos para valores de  $N^\circ$  de golpes (SPT) superiores a 25, obteniéndose la nueva ecuación (31) según el estudio realizado por ASG Geotecnia y Sondeos Geotest

(Parra & Ramos), que recopilaron información de diferentes correlaciones existentes para la obtención de parámetros mecánicos de resistencia y deduciendo la ecuación (31), definida en la página 52:

$$\Phi' = 5.35 \ln N(\text{SPT}) + 14.44$$

Los valores de ángulo de rozamiento obtenidos por la ecuación N° XX son conservadores y se adaptaría mejor a suelos de carácter mixto, el alto contenido en finos reduce sustancialmente el ángulo de rozamiento.

Para el caso de suelos mixtos se va considerar la ecuación N° XX según el estudio realizado por ASG Geotecnia y Sondeos Geotest (Parra & Ramos), que aportaron la ecuación (33), definida en la página 52:

$$C_u = 0,22 \ln N(\text{SPT}) - 0,40$$

### **Caso III. ARORG-M-MM**

Al tratarse de un suelo arcilloso se considera a la plasticidad como una propiedad importante en el comportamiento de las arcillas. Este material presenta una plasticidad media a alta, para este tipo de arcillas debe considerarse la posibilidad de reducción de la resistencia debido a su elevada plasticidad (ver Figura 42).

En los terrenos cohesivos, las correlaciones basadas sobre los resultados del ensayo SPT sólo deben considerarse orientativos. En la Tabla 4 se presentan relaciones entre el N° de golpes (SPT) y la resistencia a la compresión simple según Hunt (1984).

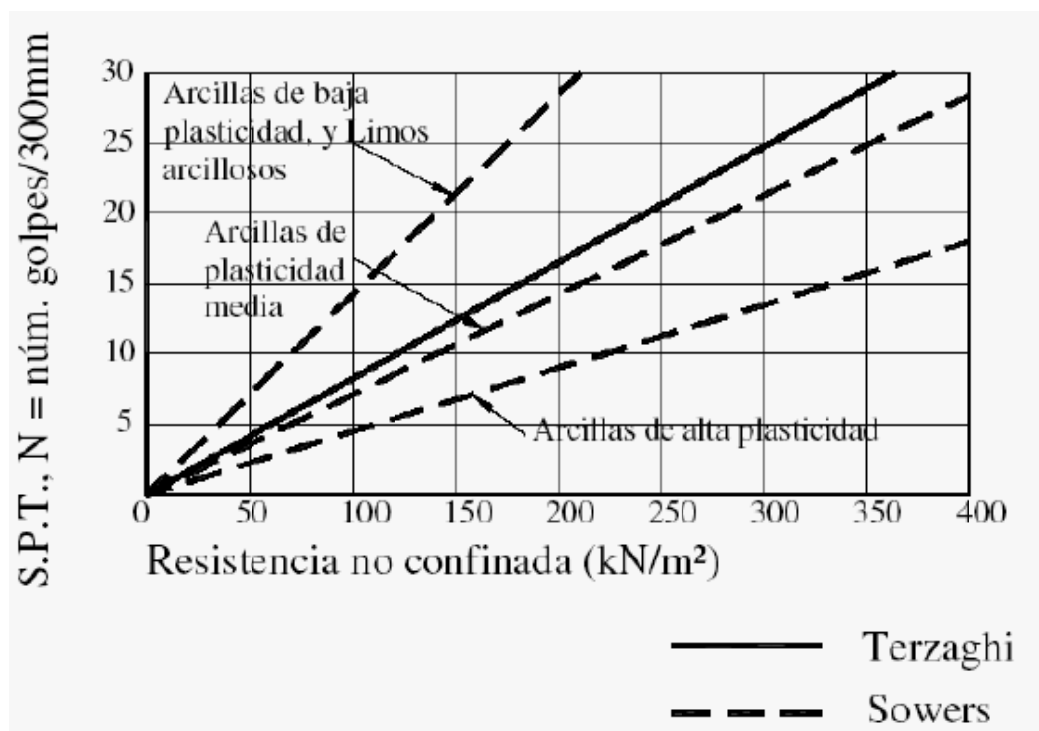


Figura 42 - Relación entre el N° de Golpes (SPT) y la Resistencia en Arcillas.

## 4.2. Estadística de los Ensayos SPT

La ejecución de los análisis estadísticos básicos se presenta a continuación:

### 4.2.1. Estadística Descriptiva

Los datos obtenidos en ensayos de SPT se describen a través de estadísticas que son útiles para la caracterización de las distribuciones de frecuencia y realización de inferencias sobre la población.

La litología de las muestras obtenidas son: A-F-M-PC-MC, ASAR-PC-MC y ARORG-M-MM y las medidas de localización, dispersión y forma son: la media



aritmética, la mediana y la moda; la desviación estándar, la varianza y el coeficiente de variación.

Tabla 15 - Estadística Descriptiva de las Diferentes Litologías

Código Litológico	Variable	N° muestras	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Varianza	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
A-F-M-PC-MC	N(SPT)	433	2	96	12.06	10	7	82.22	9.067	75.18
ASAR-PC-MC	N(SPT)	880	0	96	10	6	5	153	12	124
ARORG-M-MM	N(SPT)	353	0	83	8.89	5	2	137.9	11.74	132.1

En las Figura 43, Figura 44 y Figura 45 se aprecia que el bajo valor de los parámetros estadísticos de la litología con mayor contenido de arcilla indica que la resistencia de este suelo es menor comparado con los otros materiales geotécnicos. Esta característica es propia de las arcillas con contenido de materia orgánica, presentan una menor resistencia a la penetración si se compara con suelos granulares o con suelos arcillosos sin contenido de materia orgánica.

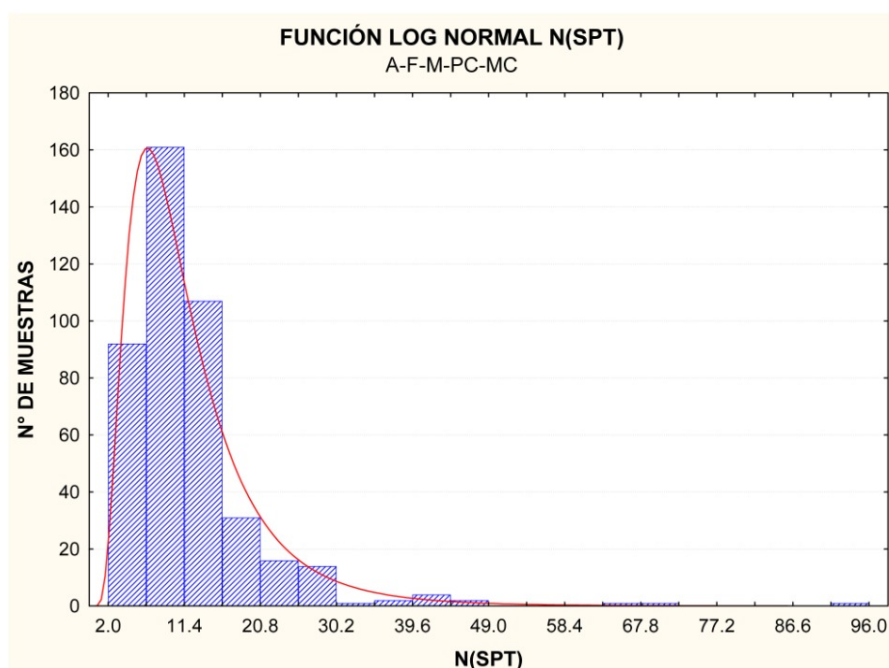


Figura 43 - Histograma de Distribución Exponencial de las Muestras A-F-M-PC-MC

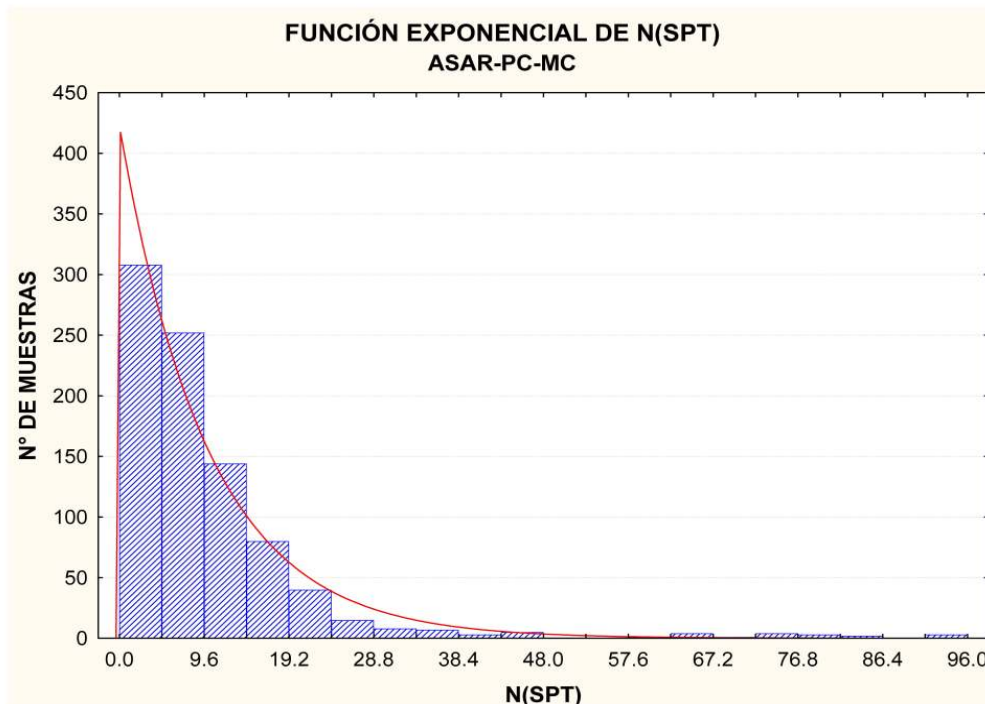


Figura 44 - Histograma de Distribución Exponencial de las Muestras ASAR-PC-MC

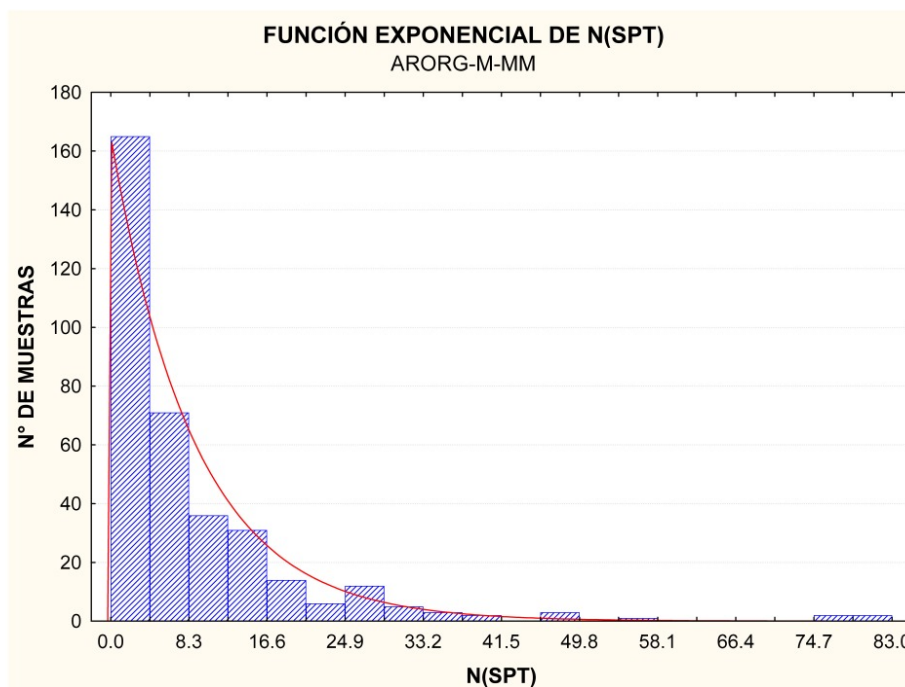


Figura 45 - Histograma de Distribución Exponencial de las Muestras ARORG-M-MM

### Diagramas de Dispersión de Variables (Scatter Plot)

Estos gráficos ayudan a comprender como se distribuye el N° de golpes (SPT) de cada capa de suelo con respecto a la profundidad. Como se puede apreciar en la Figura 46, Figura 47 y Figura 48 el coeficiente de Variabilidad del estrato A-F-M-PC-MC al ser menor, muestra una población más homogénea que las otras dos unidades geotécnicas (ASAR-PC-MC y ARORG-M-MM).

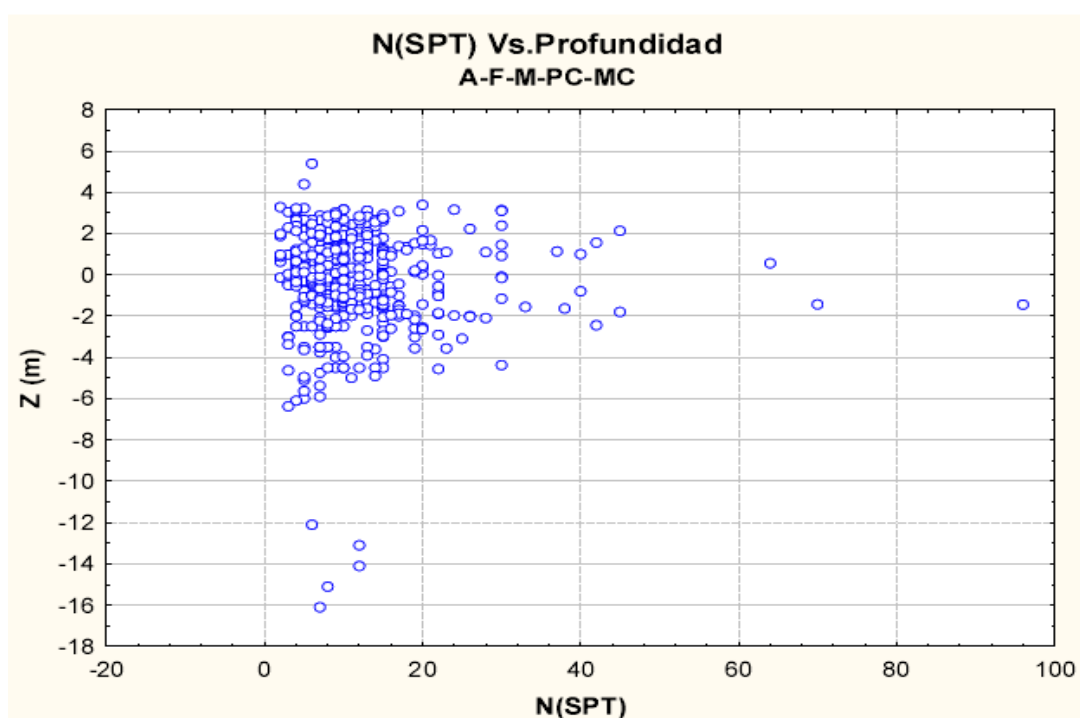


Figura 46 - Diagrama de Dispersión de A-F-M-PC-MC

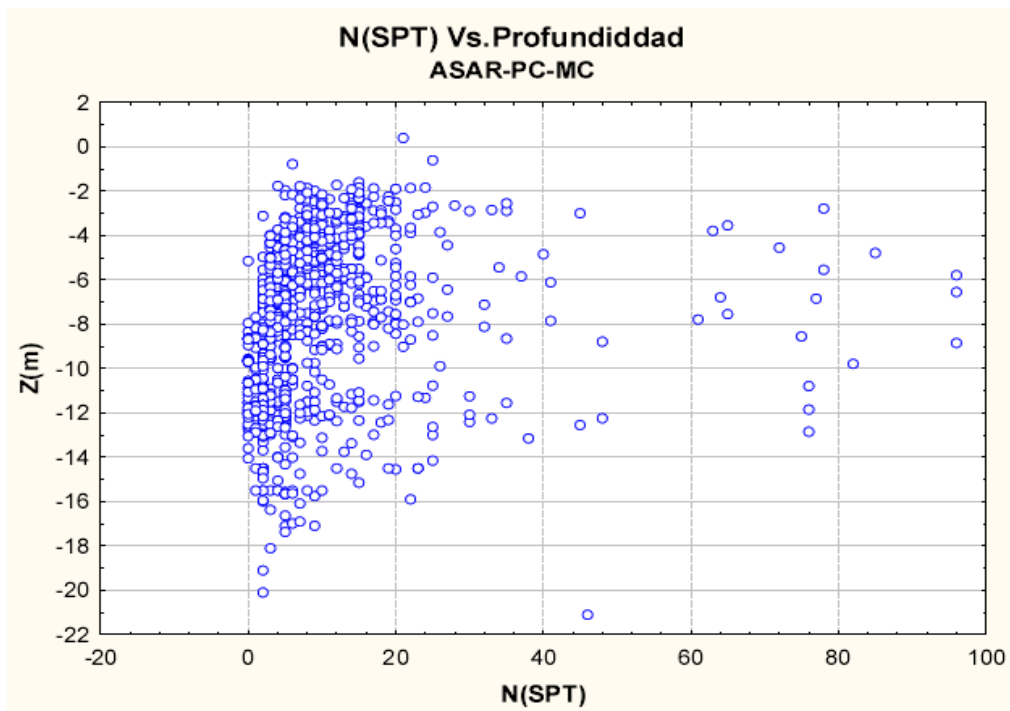


Figura 47 - Diagrama de Dispersión de ASAR-PC-MC

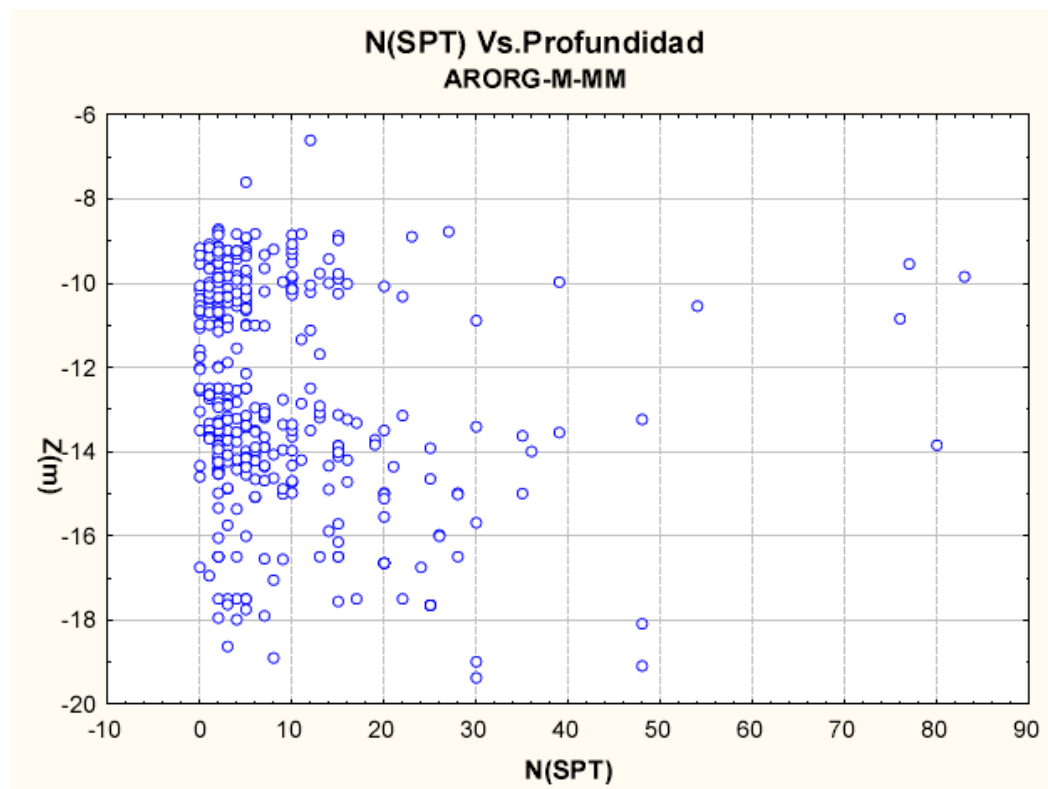


Figura 48 - Diagrama de Dispersión de ARORG-M-MM

### 4.3. Geoestadística y Variabilidad Espacial de los Parámetros de Resistencia del Subsuelo

El objetivo de la geoestadística es estimar o predecir el valor de una variable que no se conoce, a partir de escasa información conocida. En el presente trabajo, se utilizaron los datos obtenidos de los ensayos SPT efectuados en la zona de Angra para estimar el número de golpes SPT en zonas no ensayadas. Para ello se utilizó la principal herramienta de la geoestadística: “El variograma”.

#### 4.3.1. Cálculo de los Variogramas Direccionales por Litología

Se decidió calcular los variogramas direccionales en las direcciones Norte-Sur, Norte 45°, Este-Oeste, Norte 135° y en la dirección vertical para cada tipo de litología. Las direcciones y los parámetros utilizados se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 16 - Dirección de los Variogramas

Número de variograma direccional	Dirección
1	Omnidireccional
2	N
3	N45°
4	E-O
5	N135°
6	Vertical

Tabla 17 – Parámetros de Variogramas Horizontales

Parámetros de variogramas horizontales	
Lag (m)	10
Intervalos	12
Spread ángulo	45°

Tabla 18 - Parámetros de Variogramas Verticales

<b>Parámetros de variogramas verticales</b>	
Lag (m)	1
Intervalos	60
Spread ángulo	45°

Lag o distancia (h) del variograma y el número de intervalos está directamente relacionado con la distancia entre las muestras. En este trabajo se va a determinar el Lag en la dirección horizontal y el Lag en la dirección vertical debido a la potencia de los horizontes en la dirección vertical.

El Lag del variograma en la dirección horizontal es 10m (esta distancia es un intervalo), en este caso en particular se ha colocado el parámetro de 12 intervalos como máximo (rango máximo 120m).

El Lag del variograma en la dirección vertical es 1m, en este caso en particular se ha colocado el parámetro de 60 intervalos como máximo (rango máximo 60m).

#### **4.3.2. Modelamiento de variogramas Experimentales**

El objetivo de este análisis es buscar un método teórico de variograma que sea parecido al variograma experimental. Esta etapa de modelamiento, llamado “análisis estructural” o “análisis variográfico”, es la fase esencial en un estudio geoestadístico, obteniéndose malos resultados en caso de realizar un mal modelamiento.

En el presente trabajo, el modelo Esférico o de Matheron ha sido utilizado para modelar los variogramas omnidireccionales y los variogramas direccionales experimentales.

## Modelamiento de Variogramas Omnidireccionales

Se modelarán los variogramas omnidireccionales para obtener el valor del efecto pepita en cada litología (ver Figura 49, Figura 50 y Figura 51).

La Tabla 19 muestra las características principales del modelamiento variográfico de los variogramas omnidireccionales experimentales calculados a partir de las muestras.

Tabla 19 - Modelamiento de los variogramas omnidireccionales

Código Litológico	Modelo	Meseta	Alcance (m)	Efecto Pepita
A-F-M-PC-MC	Esférico	1942.5	34.2	489.4
ASAR-PC-MC	Esférico	136.7	13.5	61.2
ARORG-M-MM	Esférico	162.4	31.9	20.8

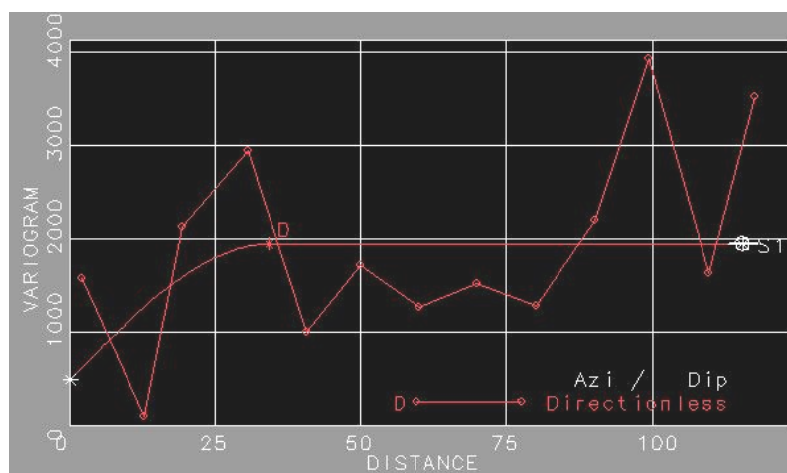


Figura 49 - Variograma Omnidireccional A-F-M-PC-MC

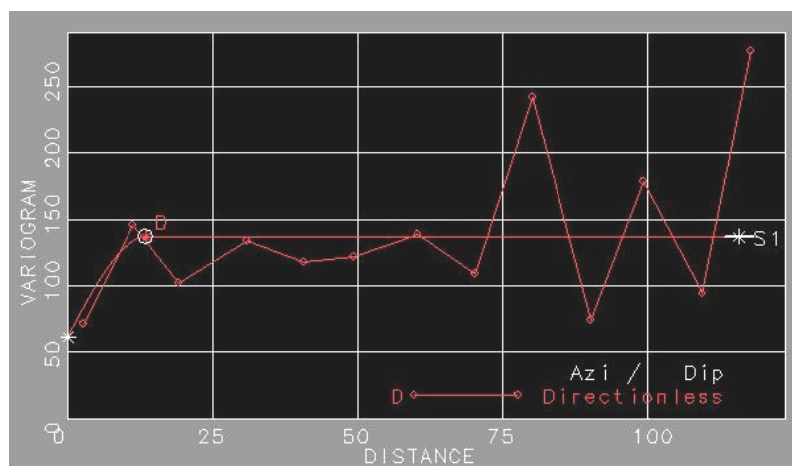


Figura 50 - Variograma Omnidireccional ASAR-PC-MC

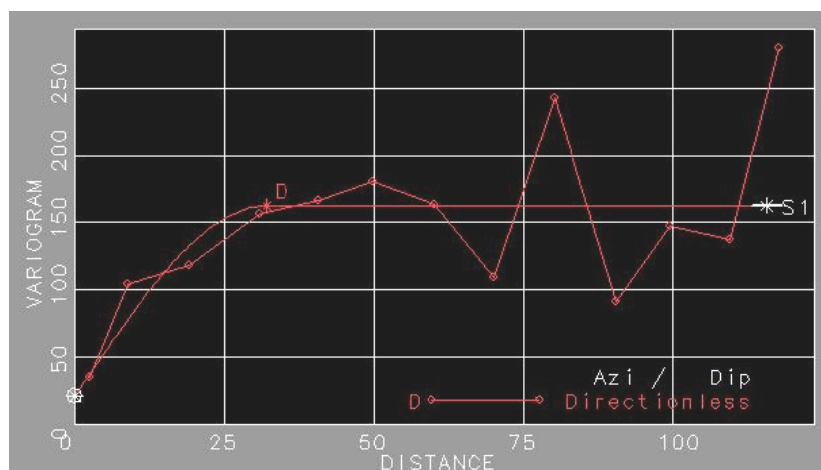


Figura 51 - Variograma Omnidireccional ARORG-M-MM

### Modelamiento de Variogramas Direccionales

A continuación se muestran los variogramas direccionales modelados para las diferentes litologías.

Los modelos de los variogramas direccionales consideran el efecto pepita encontrado en los variogramas omnidireccionales

La Tabla 20 muestra las características principales de modelamiento variográfico de los variogramas experimentales direccionales.



Tabla 20 - Modelamiento de los Variogramas Direccionales

Código Litológico	Dirección	Modelo	Meseta	Alcance (m)	Pepita
A-F-M-PC-MC	N	Esférico	31.01	28.1	489.4
	N45°	Esférico	15.11	50	489.4
	N90°	Esférico	1285.2	31.5	489.4
	N135°	Esférico	2680.3	19.3	489.4
	Vertical	Esférico	1460.4	1.2	489.4
ASAR-PC-MC	N	Esférico	106.2	20.9	61.2
	N45°	Esférico	151.1	13.5	61.2
	N90°	Esférico	151.1	34.4	61.2
	N135°	Esférico	129.8	21.2	61.2
	Vertical	Esférico	177.2	5.2	61.2
ARORG-M-MM	N	Esférico	113	24.7	20.8
	N45°	Esférico	204.4	13.7	20.8
	N90°	Esférico	180.6	33.3	20.8
	N135°	Esférico	189.7	21.4	20.8
	Vertical	Esférico	49.1	6.3	20.8

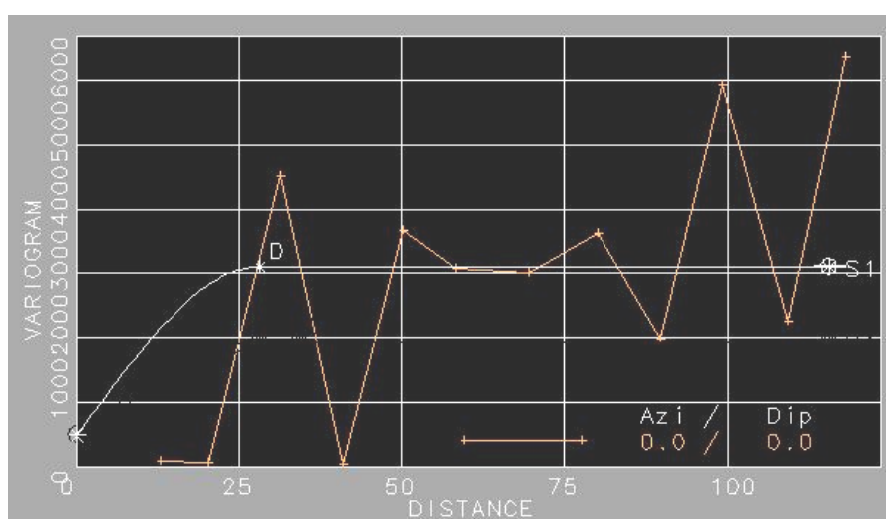


Figura 52 - Variograma Direccional: Norte A-F-M-PC-MC

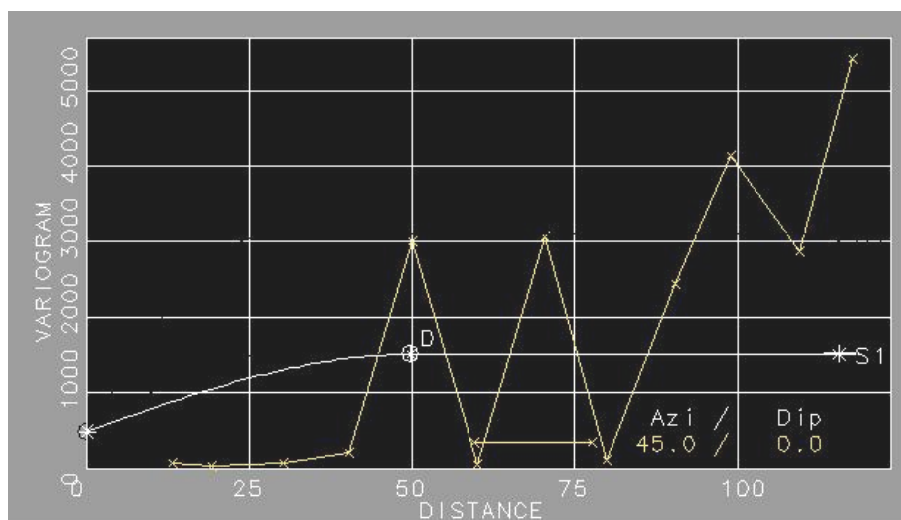


Figura 53 - Variograma Direccional: N 45° A-F-M-PC-MC

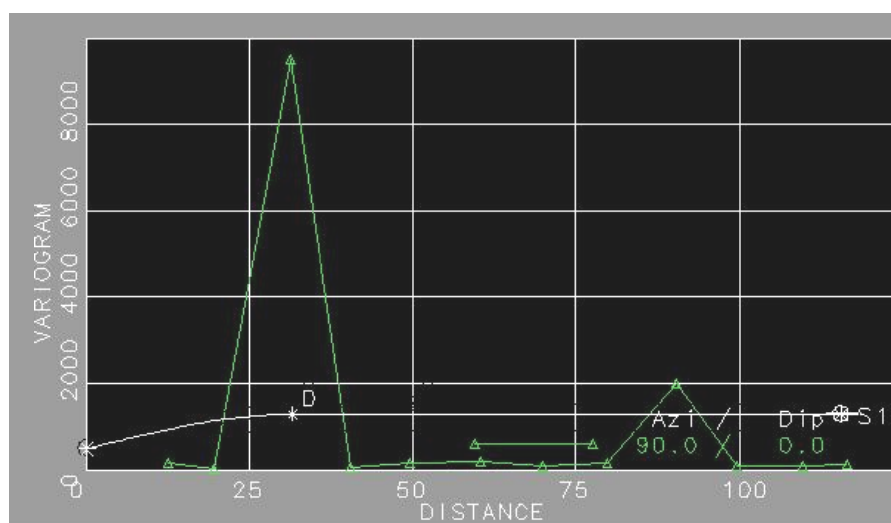


Figura 54 - Variograma Direccional: N 90° A-F-M-PC-MC

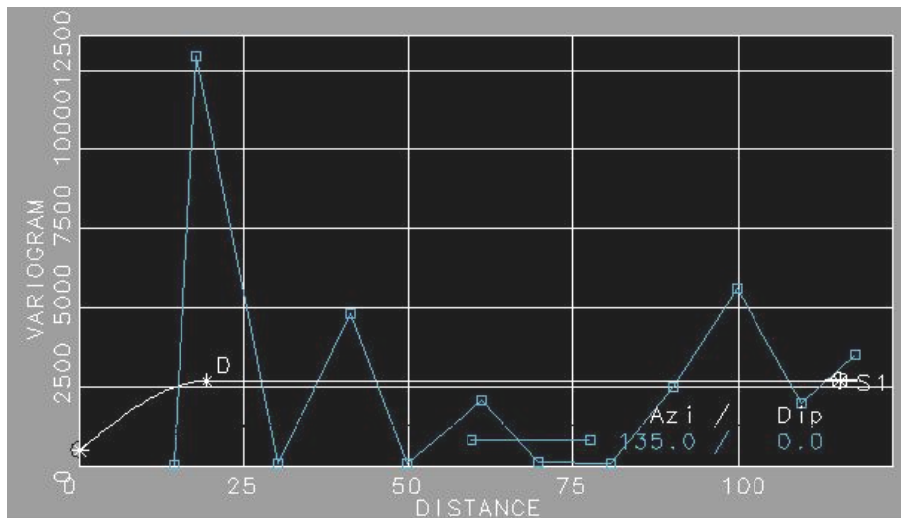


Figura 55 - Variograma Direccional: N 135° A-F-M-PC-MC

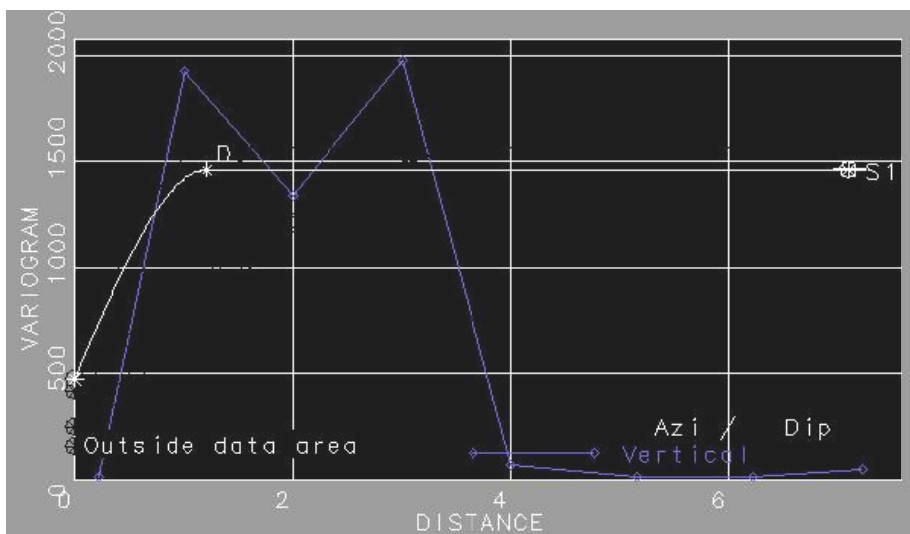


Figura 56 - Variograma Direccional: Vertical A-F-M-PC-MC

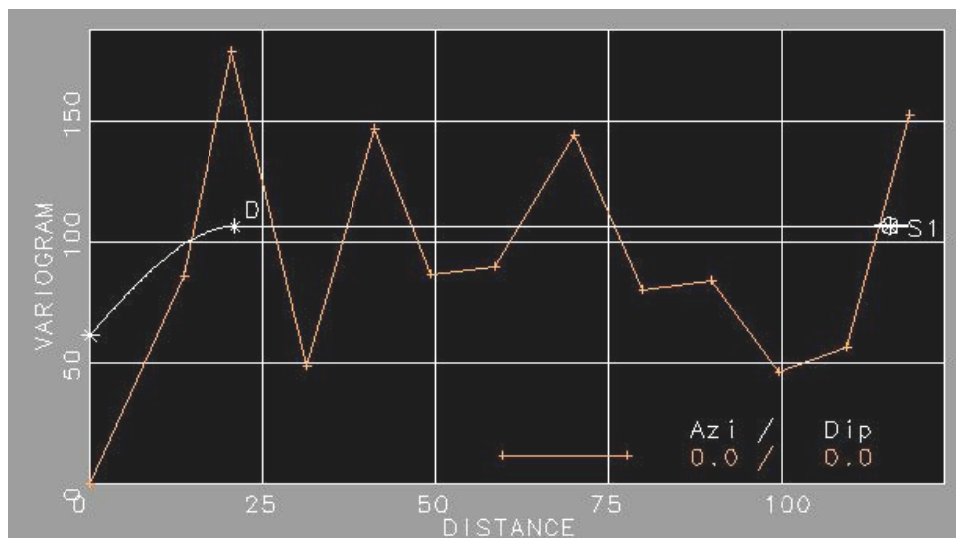


Figura 57 - Variograma Direccional: Norte ASAR-PC-MC

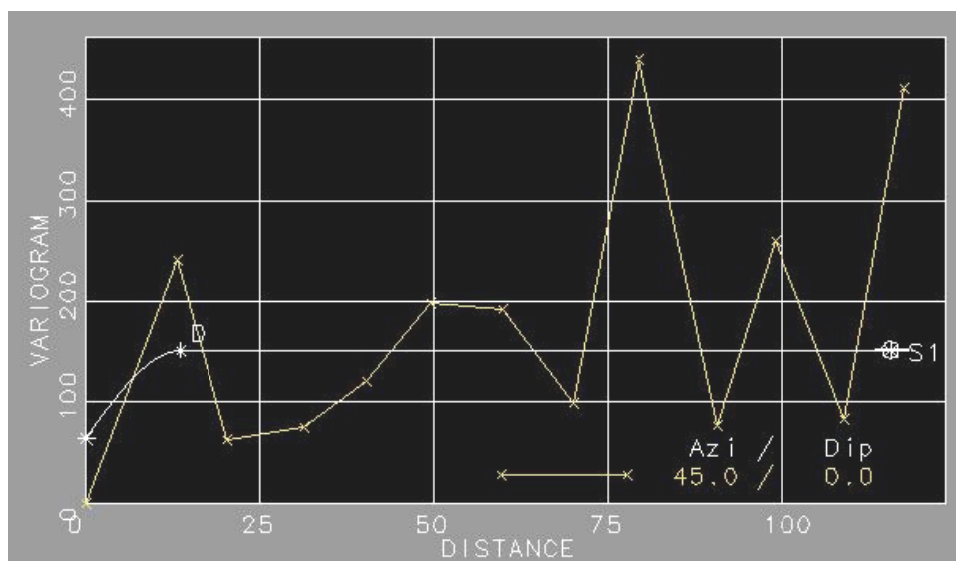


Figura 58 - Variograma Direccional: N 45° ASAR-PC-MC

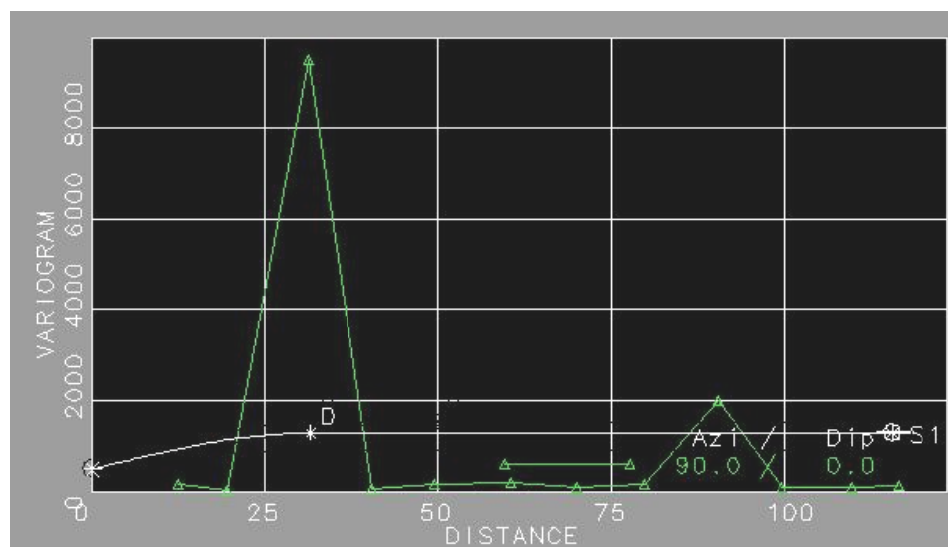


Figura 59 - Variograma Direccional: N 90° ASAR-PC-MC

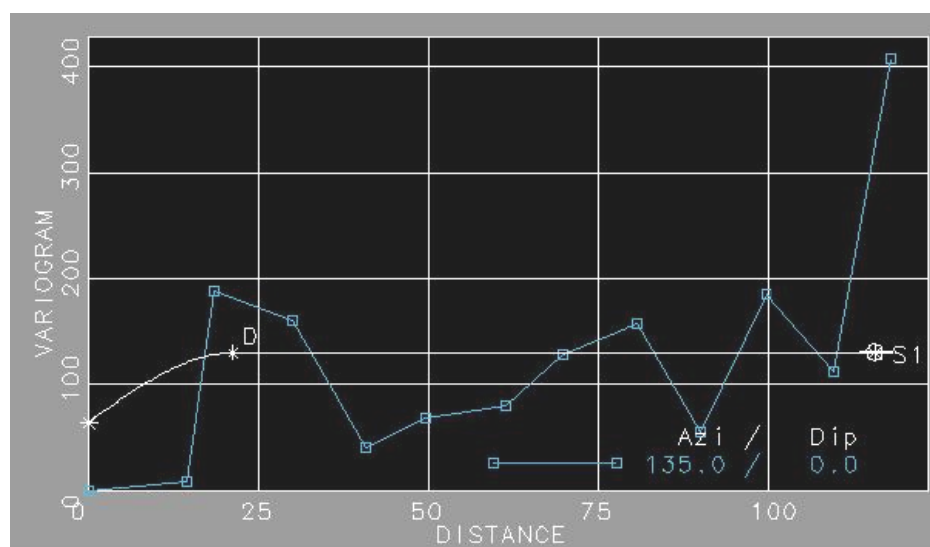


Figura 60 - Variograma Direccional: N 135° ASAR-PC-MC

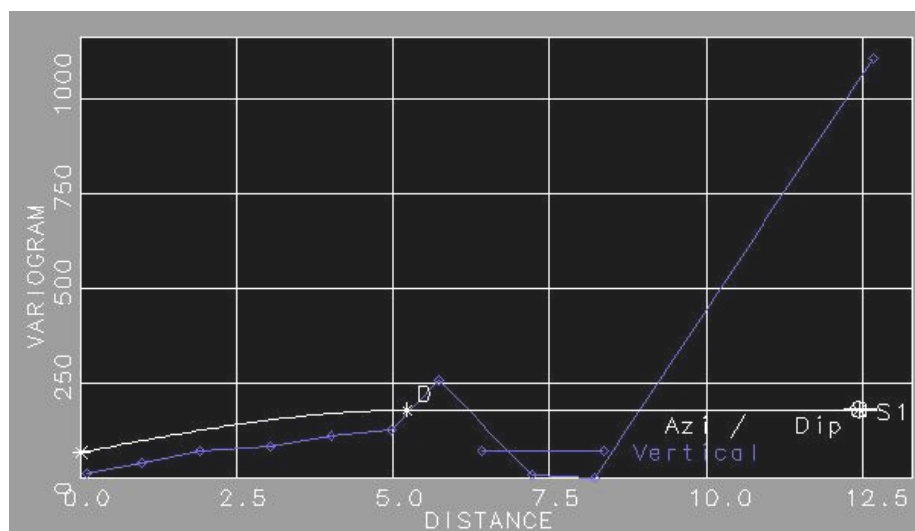


Figura 61 - Variograma Direccional: Vertical ASAR-PC-MC

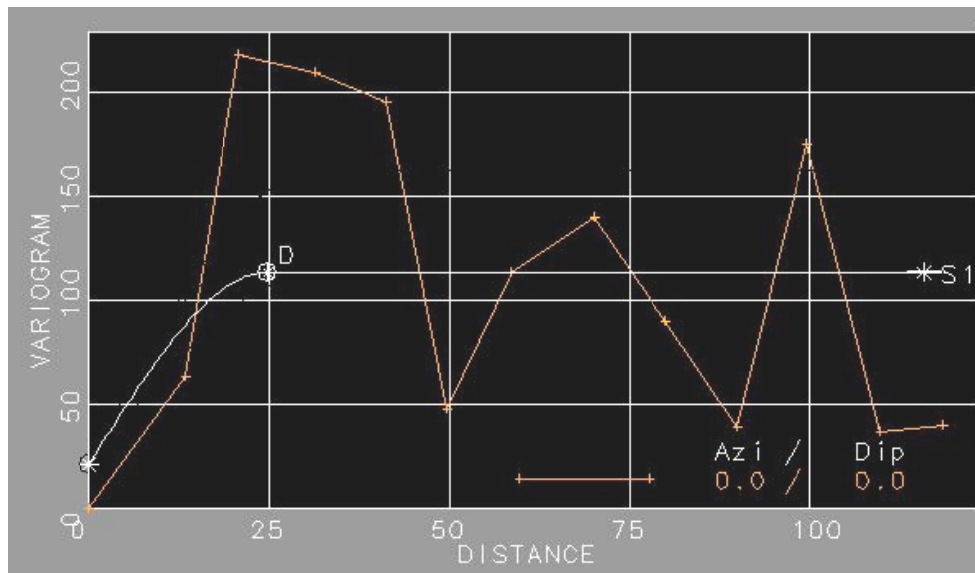


Figura 62 - Variograma Direccional: Norte ARORG-M-MM

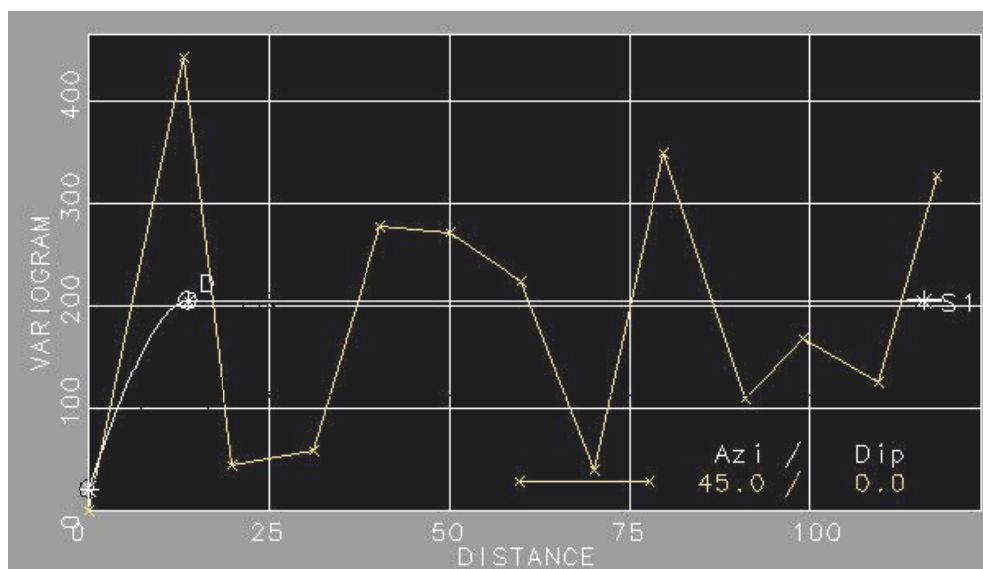


Figura 63 - Variograma Direccional: N 45° ARORG-M-MM

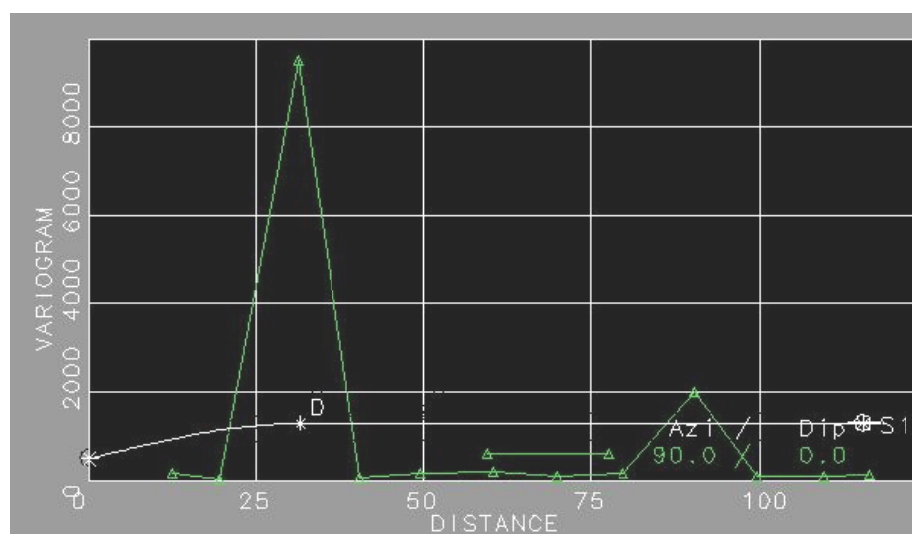


Figura 64 - Variograma Direccional: N 90° ARORG-M-MM

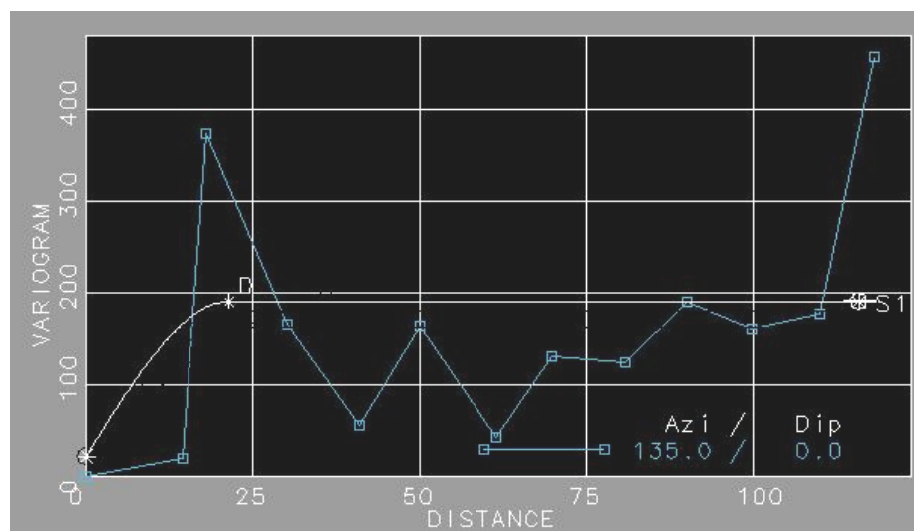


Figura 65 - Variograma Direccional: N 135° ARORG-M-MM

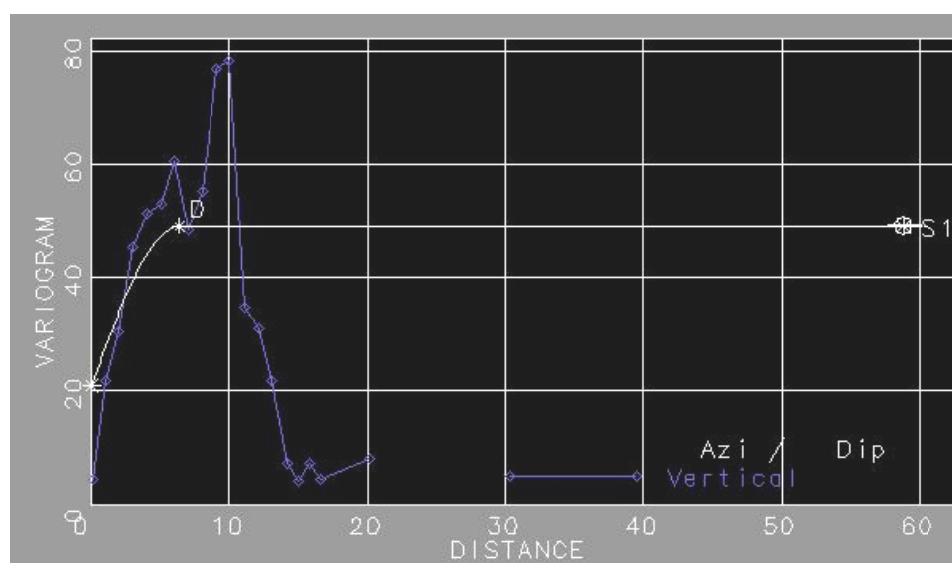


Figura 66 - Variograma Direccional: Vertical ARORG-M-MM



### 4.3.3. Obtención del Elipsoide de Influencia

El elipsoide de influencia es construido a partir de los variogramas direccionales.

El elipsoide de influencia es determinado a partir del variograma de máximo alcance y de los variogramas trazados en direcciones perpendiculares entre sí.

En las tablas siguientes se puede observar los ejes del elipsoide de influencia en las diferentes litologías.

El eje X' es el mayor de los ejes de la elipsoide, Y' es el eje intermedio y Z' es el menor de los ejes de la elipsoide.

Tabla 21 - Parámetros del Elipsoide de Influencia A-F-M-PC-MC

<b>Código Litológico</b>	<b>Eje</b>	<b>Dirección</b>	<b>Alcance (m)</b>
A-F-M-PC-MC	X'	N 45°	50
	Y'	N 135°	19.3
	Z'	Vertical	1.2

Tabla 22 - Parámetros del Elipsoide de Influencia ASAR-PC-MC

<b>Código Litológico</b>	<b>Eje</b>	<b>Dirección</b>	<b>Alcance (m)</b>
ASAR-PC-MC	X'	N 90°	34.4
	Y'	N	20.9
	Z'	Vertical	5.2

Tabla 23 - Parámetros del Elipsoide de Influencia ARORG-M-MM

Código Litológico	Eje	Dirección	Alcance (m)
ARORG-M-MM	X'	N 90°	33.3
	Y'	N	24.7
	Z'	Vertical	6.3

La Figura 67, Figura 68 y Figura 69 muestran los elipsoides de búsqueda de los diferentes depósitos geológicos.

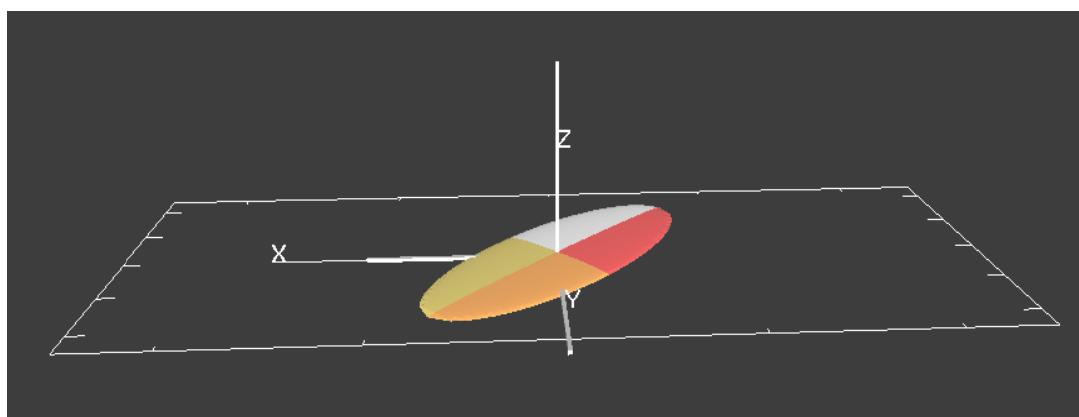


Figura 67 - Elipsoide de Búsqueda A-F-M-PC-MC

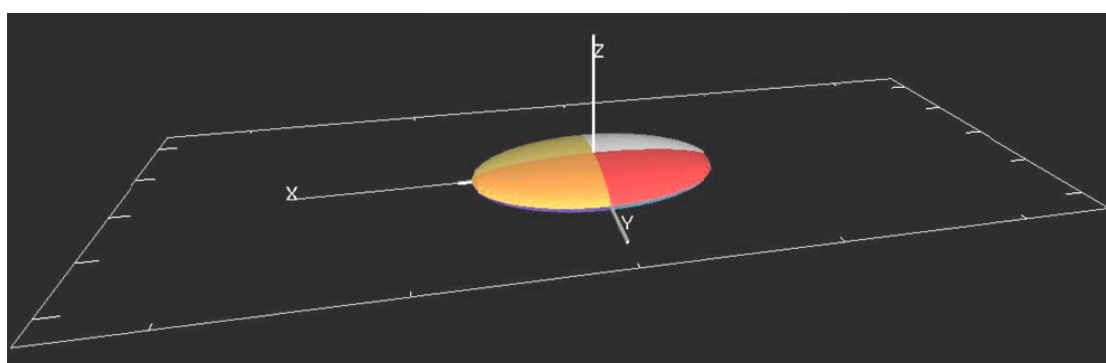


Figura 68 - Elipsoide de Búsqueda ASAR-PC-MC

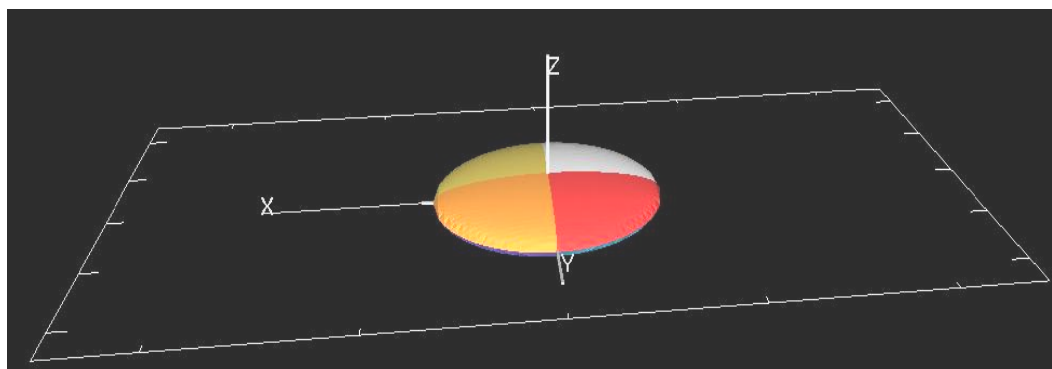


Figura 69 - Elipsoide de Búsqueda ARORG-M-MM

#### 4.4. Análisis de los Resultados

En la Figura 70 se observa las direcciones principales de los aportes de sedimentos en el proceso de formación de las unidades geotécnicas, que evidencian que los mayores aportes fueron dados por material coluvial. Material aportado directamente por taludes de rocas erosionados, dando origen a la formación del depósito arenoso A-F-MC-PC (la flecha roja dirigida hacia el mar indica la dirección de aporte). Otro gran agente de aporte de sedimentos es el mar, que invadió el continente mediante los procesos de transgresión y regresión marina que dieron origen a la formación de los depósitos arenosos-limosos y el depósito de arcillas con contenido orgánico (flecha amarilla). Los sedimentos marinos fueron depositados paralelos a la línea de costa (las flechas amarillas indican aproximadamente la dirección de estos aportes). Cabe recordar que estas direcciones principales fueron calculadas a partir del modelamiento variográfico y coinciden con las características geológicas de estos depósitos.



Figura 70 – Direcciones Principales (NE y EW) de los aportes de Sedimentos en el Proceso de Formación de las Unidades Geotécnicas

En la Tabla 24 se resume la variación de la resistencia en las diferentes litologías de acuerdo al rango de N° Golpes de SPT de los depósitos, con respecto a su profundidad en metros, obtenidos a partir de la interpretación de los planos isovalóricos presentados en el anexo 1. A partir de estos resultados y utilizando las correlaciones empíricas para suelos se obtienen los parámetros geotécnicos ( $c$ ,  $\phi$ ,  $q_u$ ), que permiten determinar la resistencia del terreno para fines de construcción civil. Estos resultados se presentan en la Tabla 25.

A partir de los resultados presentados en la Tabla 25 se encuentra que el área (de alrededor  $8500\text{m}^2$ ) con los mejores parámetros de resistencia está delimitada por los siguientes puntos:

- A. 7455374N / 555659E
- B. 7455453N / 555659E
- C. 7455453N / 555555E
- D. 7455374N / 555555E

Tabla 24 – Resultados de Resistencia a partir de Planos Isovalóricos

<b>Nº Plano</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Rango Nº Golpes SPT</b>	<b>Resistencia</b>
1	2.50	4-30	A-F-M-MC-PC de resistencia baja a media.
2	1.50	4-30	A-F-M-MC-PC de resistencia baja a media.
3	0.50	4-30	A-F-M-MC-PC de resistencia baja a media.
4	-1.50	4-30 0-10	Predominio de A-F-M-MC-PC de resistencia media con intercalaciones de ASAR-PC-MC de resistencia baja.
5	-2.50	4-30 0-10	Predominio de A-F-M-MC-PC de resistencia media, intercalada con ASAR-PC-MC de resistencia baja.
6	-3.50	4-30 4-30	Predominio de ASAR-PC-MC de resistencia media, intercalada con A-F-M-PC-MC resistencia media.
7	-4.50	0-10 4-30	Predominio de ASAR-PC-MC de resistencia baja, intercalada con A-F-M-PC-MC de resistencia media.
8	-5.50	4-30 0-10	Predominio de ASAR-PC-MC de resistencia baja a media, intercalada con A-F-M-PC-MC baja resistencia.
9	-6.50	0-10 0-10	Predominio de ASAR-PC-MC de resistencia baja, intercalada con A-F-M-PC-MC baja resistencia.
10	-7.50	0-10 0-10 4-8	Predominio de ASAR-PC-MC resistencia baja, intercalada con A-F-M-PC-MC de baja resistencia y aparición de ARORG-M-MM de baja resistencia.
11	-8.50	0-10 2-8 0-4	Predominio de ASAR-PC-MC de baja resistencia, intercalada con ARORG-M-M de resistencia baja y A-F-M-MC-PC de baja resistencia.
12	-9.50	4-8 0-10 0-4	Predominio de ARORG-M-M de baja resistencia, intercalada con ASAR-PC-MC y A-F-M-MC-PC de baja resistencia.
13	-10.50	4-30 0-10 0-4	Predominio de ARORG-M-M de resistencia media, intercalada con ASAR-PC-MC y A-F-M-MC-PC de baja resistencia.
14	-11.50	4-8 0-10	ASAR-PC-MC de baja resistencia, intercalada con ARORG-M-M de baja resistencia

Nº Plano	Profundidad (m)	Rango Nº Golpes SPT	Resistencia
15	-12.50	0-10 0-15	Predominio de ASAR-PC-MC de baja resistencia, intercalada con ARORG-M-M de baja resistencia.
16	-13.50	0-15 0-10	Predominio de ARORG-M-M de baja resistencia intercalada con ASAR-MC-PC de baja resistencia.
17	-14.50	0-15 0-10	Predominio de ARORG-M-M de baja resistencia intercalada con ASAR-MC-PC de baja resistencia.
18	-15.50	0-15 0-10	Predominio de ARORG-M-M de baja resistencia intercalada con ASAR-MC-PC de baja resistencia.
19	-16.50	0-15 0-10	Predominio de ARORG-M-M de baja resistencia intercalada con ASAR-MC-PC de baja resistencia.
20	-17.50	0-15 0-10	Predominio de ARORG-M-M de baja resistencia intercalada con ASAR-MC-PC de baja resistencia

Tabla 25 – Parámetros Geotécnicos Obtenidos a partir de Correlaciones Empíricas

Nº Plano	Correlación	Interpretación
1	$\rho_r = 0.15 - 0.65$ , $\Phi = 30.1$	Arena medianamente densa a densa
2	$\rho_r = 0.15 - 0.65$ , $\Phi = 30.1$	Arena medianamente densa a densa
3	$\rho_r = 0.15 - 0.65$ , $\Phi = 30.1$	Arena medianamente densa a densa
4	$\rho_r = 0.15 - 0.65$ , $\Phi = 30.1$	Arena medianamente densa a densa
	$\Phi = 14 - 27$ , $C_u = 0 - 0.1$	Arena limosa floja a medianamente densa
5	$\rho_r = 0.15 - 0.65$ , $\Phi = 30.1$	Arena medianamente densa a densa
	$\Phi = 14 - 27$ , $C_u = 0 - 0.1$	Arena limosa floja a medianamente densa
6	$\Phi = 22-43$ , $C_u = 0-0.34$	Arena limosa medianamente densa a densa
	$\rho_r = 0.15 - 0.65$ , $\Phi = 30.1$	Arena medianamente densa a densa
7	$\Phi = 14 - 27$ , $C_u = 0 - 0.1$	Arena limosa floja a medianamente densa
	$\rho_r = 0.15 - 0.65$ , $\Phi = 30.1$	Arena medianamente densa a densa

N° Plano	Correlación	Interpretación
8	$\Phi = 22-43$ , $C_u = 0.34$	Arena limosa medianamente densa a densa
	$pr = 0.15 - 0.35$ , $\Phi = 30.1$	Arena de muy floja a floja
9	$\Phi = 14 - 27$ , $C_u = 0 - 0.1$	Arena limosa floja a medianamente densa
	$pr = 0.15 - 0.35$ , $\Phi = 30.1$	Arena de muy floja a floja
10	$\Phi = 14 - 27$ , $C_u = 0 - 0.1$	Arena limosa floja a medianamente densa
	$pr = 0.15 - 0.35$ , $\Phi = 30.1$	Arena de muy floja a floja
	$\gamma_{sat} = 1.76-1.92 \text{ g/cm}^3$ , $q_u = 0.5-1$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	Arcilla de consistencia media
11	$\Phi = 14 - 27$ , $C_u = 0 - 0.1$	Arena limosa floja a medianamente densa
	$\gamma_{sat} = 1.60-1.92 \text{ g/cm}^3$ , $q_u = 0.25-1$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	Arcilla de consistencia blanda a media
	$pr = 0.15 - 0.35$ , $\Phi = 30.1$	Arena de muy floja a floja
12	$\gamma_{sat} = 1.76-1.92 \text{ g/cm}^3$ , $q_u = 0.5-1$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	Arcilla de consistencia media
	$\Phi = 14 - 27$ , $C_u = 0 - 0.1$	Arena limosa floja a medianamente densa
	$pr = 0.15 - 0.35$ , $\Phi = 30.1$	Arena de muy floja a floja
13	$\gamma_{sat} = 1.76-2.24 \text{ g/cm}^3$ , $q_u = 0.5-4$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	Arcilla de consistencia media a rígida
	$\Phi = 14 - 27$ , $C_u = 0 - 0.1$	Arena limosa floja a medianamente densa
	$pr = 0.15 - 0.35$ , $\Phi = 30.1$	Arena de muy floja a floja
14	$\Phi = 22 - 26$ , $C_u = 0 - 0.05$	Arena limosa floja
	$\gamma_{sat} = 1.44-1.92 \text{ g/cm}^3$ , $q_u = 0-1$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	Arcilla de consistencia muy blanda a media
15	$\Phi = 14 - 27$ , $C_u = 0 - 0.1$	Arena limosa floja a medianamente densa
	$\gamma_{sat} = 1.44-2.08 \text{ g/cm}^3$ , $q_u = 0-2$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	Arcilla de consistencia muy blanda a rígida

N° Plano	Correlación	Interpretación
16	$\gamma_{sat} = 1.44-2.08 \text{ g/cm}^3$ , $q_u = 0-2 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$	Arcilla de consistencia muy blanda a rígida
	$\Phi = 14 - 27$ , $C_u = 0 -0.1$	Arena limosa floja a medianamente densa
17	$\gamma_{sat} = 1.44-2.08 \text{ g/cm}^3$ , $q_u = 0-2 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$	Arcilla de consistencia muy blanda a rígida
	$\Phi = 14 - 27$ , $C_u = 0 -0.1$	Arena limosa floja a medianamente densa
18	$\gamma_{sat} = 1.44-2.08 \text{ g/cm}^3$ , $q_u = 0-2 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$	Arcilla de consistencia muy blanda a rígida
	$\Phi = 14 - 27$ , $C_u = 0 -0.1$	Arena limosa floja a medianamente densa
19	$\gamma_{sat} = 1.44-2.08 \text{ g/cm}^3$ , $q_u = 0-2 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$	Arcilla de consistencia muy blanda a rígida
	$\Phi = 14 - 27$ , $C_u = 0 -0.1$	Arena limosa floja a medianamente densa
20	$\gamma_{sat} = 1.44-2.08 \text{ g/cm}^3$ , $q_u = 0-2 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$	Arcilla de consistencia muy blanda a rígida
	$\Phi = 14 - 27$ , $C_u = 0 -0.1$	Arena limosa floja a medianamente densa



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones y las recomendaciones para los trabajos futuros en esta línea de investigación.

Los materiales geológicos del área son de tipo sedimentario, producidos a partir de la erosión y deposición marina. En el área se encuentran arenas finas a medias, arena limosa con arcilla y arcilla orgánica. La primera de ellas formada por aportes continentales y marinos y las dos últimas formadas exclusivamente a partir de aportes marinos.

A partir de la información geológica obtenida de los 111 sondeos (SPT) se elaboraron 17 secciones verticales con dirección Norte sur, las cuales permiten realizar la interpretación geológica del área. Posteriormente, se obtuvieron cinco sólidos que representan las cinco capas de suelos de la zona de estudio. Estos sólidos fueron discretizados en pequeños paralelepípedos a través de modelos de bloques ortogonales.

Las distribuciones estadísticas de los valores del Número de Golpes SPT de los depósitos cuaternarios indican que los horizontes de suelo ASAR-PC-MC y ARORG-M-MM presentan distribuciones asimétricas desviadas hacia el lado izquierdo, con coeficientes de variación relativamente altos. Este tipo de

comportamiento puede reflejar la ocurrencia de algunos valores puntuales dispersos por el área de estudio con elevada resistencia a la penetración.

A partir de los Planos litológicos isovalóricos se determinó la presencia de depósitos cuaternarios de granulometría fina y con contenido de materia orgánica de baja resistencia a partir de 7.5m de profundidad.

El cálculo y el modelamiento de los variogramas sirvieron para determinar las direcciones de máximo alcance del elipsoide de búsqueda, necesario para la aplicación del método del inverso cuadrado de la distancia. En el horizonte de suelo A-F-M-PC-MC la dirección de máximo alcance es N45°E, en tanto que en los horizontes de suelos ASAR-PC-MC y ARORG-M-MM la dirección de máximo alcance es E-W, coincidiendo con las direcciones de los procesos geológicos que dieron origen a estos depósitos.

El método del inverso cuadrado de la distancia permite realizar la previsión del valor de Número de Golpes SPT en lugares no ensayados. A partir de esta previsión se elaboraron mapas isovalóricos de distribución de Número de Golpes SPT para cada tipo de suelo.

Se obtuvieron parámetros de resistencia mecánica para cada horizonte de suelo a partir de las correlaciones empíricas básicas. En el horizonte de suelo denominado A- F-M-PC-MC se usó la correlación de Hunt a fin de obtener la densidad relativa, y la correlación de Meyerhof en el cálculo del ángulo de rozamiento interno. Para el horizonte de suelo denominado ASAR-PC-MC se utilizó la correlación propuesta por Parra y Ramos, a fin de obtener el ángulo de rozamiento interno y la cohesión no drenada. Para el horizonte de suelo denominado ARORG-M-MM se utilizó la correlación de Hunt, para el cálculo de la resistencia no drenada y el peso específico saturado.

Los parámetros de resistencia mecánica de los depósitos cuaternarios que han sido determinados por correlaciones empíricas, deben ser utilizados para el cálculo del factor de seguridad en estudios de estabilidad de taludes y de cimentaciones.

Se recomienda realizar las obras civiles que requieran un mayor factor de seguridad en la zona con los mejores parámetros de resistencia del terreno (delimitada en el capítulo anterior).

Se sugiere realizar un análisis de estabilidad de taludes y/o cimentaciones utilizando Softwares especializados, que permitan tomar en consideración espacial de los parámetros geotécnicos.

## BIBLIOGRAFIA

- ❑ Braja, M. D. (2006), **Principios de Ingeniería de Cimentaciones**, quinta edición, Thomson.
- ❑ Canchaya, S. (2003), **Como Optimizar los Métodos Tradicionales de Estimación de Reservas con el Análisis Variográfico Geoestadístico**, Graduación de ingenieros Geólogos – UNI - Perú, pp 2-13.
- ❑ CPRM (2001), **Geología do estado do Río de Janeiro**, Serviço Geológico do Brasil.
- ❑ Da Nóbrega, H. (2003), **Caracterização geotécnica do subsolo da porção Nordeste do Município de Fortaleza (CE) com Base em Geoestatística**. Dissertação de mestrado – São Carlos-SP.
- ❑ Dávila J. (1995), **Diccionario Geológico**. INGEMMET
- ❑ De Sousa, P. (2002), **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. Oficina de Textos, 2da edición.
- ❑ Dos Santos, A.; Alves, S. (2004), **Geologia de Engenharia**.
- ❑ Heilbron, M. (1993), **Evolução tectono-metamórfica da seção Bom Jardim de Minas, MG, e Barra do Piraí, RJ, Setor Central da Faixa Ribeira**. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 268 p.
- ❑ Folle D.; Leite J.; Renard D.; Koppe J.; Zingano A.(2008), **3-D soil-resistance maps in the presence of a strong vertical trend**. Engineering Geology Journal
- ❑ González de Vallejo, L. (2002). **Ingeniería Geológica**. Prentice Hall.

- ❑ Gutiérrez, J. (2007). **Modelamiento geológico y evaluación de recursos da mina SIDERNIVIN- Perú.** Tesis de ingeniero - UNI - PERU.
- ❑ Gutiérrez, J. (2009), **Variabilidade Espacial do Parâmetro Geomécânico RQD no Depósito Mineral Animas-Peru.**
- ❑ Hack R.; Orlic B.; Ozmutlu S.; Zhu S. (2006), **Three and more dimensional modelling in geo-engineering**
- ❑ Houlding S. (1994), **3D Geoscience Modeling.** Springer.
- ❑ Hunt, R. E. (1984), **Geotechnical Engineering Investigation Manual.** McGraw-Hill Book Co. New York.
- ❑ Ingeniería del Terreno (2002). **IngeoTer 1.**
- ❑ Lambe, W.; Whitman R. (2001), **Mecánica de suelos.** Limusa.
- ❑ León W.; Sánchez A., **Importancia de la Clasificación Litoestratigráfica y su Implicancia en el Cartografiado Geológico del Territorio Peruano,** INGEMMET.
- ❑ Marín, A. (2003), **Apuntes de aula del curso Geoestadística I.** UNI-PERU.
- ❑ Martínez, A. (1990), **Geotecnia para Ingenieros – Principios Básicos.** UNI-CONCYTEC.
- ❑ Mendes, R.; Lorandi, R. (2008), **Analysis of spatial variability of SPT penetration resistance in collapsible soils considering water table depth.** Engineering Geology Journal.
- ❑ Meyerhof, G. G. (1956), **Penetration Test and Bearing Capacity of Cohesionless Soils.**
- ❑ Meyerhof, G.; Hanna, A. M. (1978), **Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Layered Soil Under Inclined Load.**
- ❑ Ministério de Minas e Energia – Serviço Geológico do Brasil (2001), **Geologia do Estado de Rio de Janeiro.**
- ❑ Ortigão, J. (1995), **Introdução a Mecânica dos Solos dos Estados Críticos.** Editorial LTC – Livros técnicos y científicos.

- ❑ Parra, F. & Ramos, L. **Obtención de Parámetros Geomecánicos a partir de Ensayos a Penetración Dinámica continua en Suelos Mixtos Cohesivos-Granulares.** ASG – Geotecnia.
- ❑ Rodrigues, S. (1999), **Estudo Geoestatístico do Subsolo da Usina Nuclear Angra 2, Río de Janeiro.** Dissertação de Mestrado. PUC-RIO.
- ❑ Romanel, C. (2007), **Apostila do Curso Geoestadística.** PUC - Rio de Janeiro.
- ❑ Romanel, C. (2007), **Apostila do Curso Mecânica dos solos.** PUC - Rio de Janeiro.
- ❑ Sandroni S. (1980), **Tensões em Maciços Terrosos.** PUC – Rio de Janeiro.
- ❑ Schmertman, J.H. (1977), **Interpreting the Dynamics of the Standar Penetretion Test.** Estados Unidos de Norteamérica.
- ❑ Schultze, E.; Melzer, K.J. (1965), **The determination of the density and the modulus of compressibility of non-cohesive soil by soundings.**
- ❑ Skempton, W., **Effective Stress in Soils, Concrete and Rocks.** Imperial College University of London.
- ❑ Suarez, J., **Análisis Geotécnico - Tomo I.**
- ❑ Tarbuck, E. & Lutgens F. (1999), **Ciencias de la tierra.** Editorial Prentice Hall.
- ❑ Terzagui, K.; Peck, R. (1948), **Soil Mechanics in Engineering Practice.** Ed. John Wiley and Sons, New York.
- ❑ Villanueva, A. (2000) **Apostilla Geoestadística I,** Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Perú.