

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.

La metodología para generar el mapa de susceptibilidad al deslizamiento comprendió los siguientes 4 pasos:

- 1) Recopilación de registros con los valores de las propiedades geotécnicas de las unidades geológicas del área de estudio, para generar la base de datos que se utilizará para caracterizar geotécnicamente las unidades geológicas de la misma área;
- 2) Complementación de los valores de las propiedades geotécnicas de los registros recopilados para la base datos. Esta complementación de datos no incluye una realización de pruebas de laboratorio debido a que se necesita una gran cantidad de pruebas triaxiales para cubrir el área de estudio, esto no fue factible debido a la limitante del tiempo;
- 3) Generación de los mapas de la caracterización geotécnica con los valores de cohesión, ϕ y peso específico de las unidades geológicas, haciendo uso de las herramientas de SIG; y
- 4) Generación del mapa de susceptibilidad por deslizamientos de tierra, utilizando el mapa generado de la caracterización geotécnica de las unidades geológicas y herramientas de SIG.

A continuación se detallan cada uno de los pasos utilizados.

3.1. Recopilación de los valores de las propiedades geotécnicas de las unidades geológicas para el AMSS.

Para cada registro fue necesario recopilar valores obtenidos a partir de pruebas triaxiales y SPT. Dentro de la información recopilada se tiene:

- Coordenadas geográficas del lugar de elaboración de la prueba.
- Ubicación de los registros.
- Clasificación del tipo de suelo.
- Valor del ángulo de fricción interno del suelo (ϕ).
- Valor de cohesión o cohesión aparente del suelo (c).
- Valor de peso específico (γ_d).
- Valor de golpes para la prueba de penetración estándar (N).

Para la recopilación de estos valores se consultaron trabajos de graduación, publicaciones, resultados de pruebas de laboratorios de suelos, documentos de Internet, etc. Se identificaron diferentes instituciones o laboratorios que facilitaron la información requerida, estas se muestran en la tabla 3.1.

Instituciones o laboratorios	Contacto
Laboratorio de suelos y materiales, Francés Cansino SA de CV (FC)	Ing. Francés Fadón
Laboratorio de mecánica de suelos, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.	Ing. José Cepeda
Laboratorio de mecánica de suelos, Universidad de El Salvador.	Ing. Rodolfo Nosiglia

Tabla 3.1 Instituciones o laboratorios a consultados para la recopilación de información.

Luego de recopilar los registros, se tabularon los valores para así generar la base de datos; dicha base fue la fuente de información para la generación del mapa de caracterización de las propiedades geotécnicas de las unidades geológicas del área de estudio. La información obtenida para cada registro se tabuló siguiendo el formato de la tabla 3.2, y se almacenó en un archivo llamado "Base de batos.xls".

Longitud	Latitud	Ubicación	Tipo de suelo	ϕ (°)	c (ton/m ²)	γ_d (lb/pie ³)	N
----------	---------	-----------	---------------	------------	-------------------------	-----------------------------------	---

Tabla 3.2. Formato de presentación de base de datos.

3.2. Complementación de la base datos.

Algunos de los registros recopilados no se obtuvieron con toda la información indicada en la tabla 3.2, es decir, no se logró obtener el valor exacto de las coordenadas, el valor de ϕ , etc; por lo que se completó la información del registro de acuerdo a los siguientes casos.

Registro que no poseían coordenadas geográficas.

Para los registros en los que no se reportó la ubicación geográfica exacta y se conocía solamente una vaga referencia (por ejemplo el nombre de la colonia, bloque, zona, comunidad, etc. en donde se realizó la prueba), se procedió a ubicar un punto al centro del área de referencia, siempre y cuando ésta no fuese mayor de 10,000.00 m² y se ubicase dentro de una misma unidad geológica. Los registros que no cumplieron estos requisitos, fueron descartados.

La ubicación se hizo con la ayuda de la imagen del cuadrante 1:25000 del IGN utilizado en el trabajo de graduación "Sistemas de información geográfica en el manejo de peligros naturales", [Brizuela, B y Menjívar, L. 2002].

Registro que no poseían valor del ángulo de fricción (ϕ).

Se utilizaron 2 correlaciones empíricas para obtener el valor de ϕ ; la primera es entre la resistencia a la penetración estándar (N) y el ángulo de fricción; siguiendo los lineamientos presentados en los trabajos de graduación "Correlación de la resistencia a la penetración estandar (SPT) y el ángulo de fricción interna de los suelos, parte I", [Estrada et al, 1990], "Correlación de la resistencia a la penetración estandar (SPT) y el ángulo de fricción interna de los suelos, parte II", [Alas et al, 1992]; y por Lambe, R. y Whitman, R., [1974]; los autores mencionados utilizan la correlación elaborada por Peck, Hanson y Thornburn que se observa en la figura 3.1. Lambe y Whitman indican que: "Necesariamente, una correlación de este tipo es sólo aproximada. El ángulo de fricción real puede variar en $\pm 3^\circ$, o incluso más respecto al valor dado por la curva. La relación es aplicable con profundidades de cobertura hasta 12 m, siendo conservadora para mayores profundidades". Esta correlación se utilizó para completar la información de los registros que no contaban con el valor de ϕ , pero sí con el valor de N.

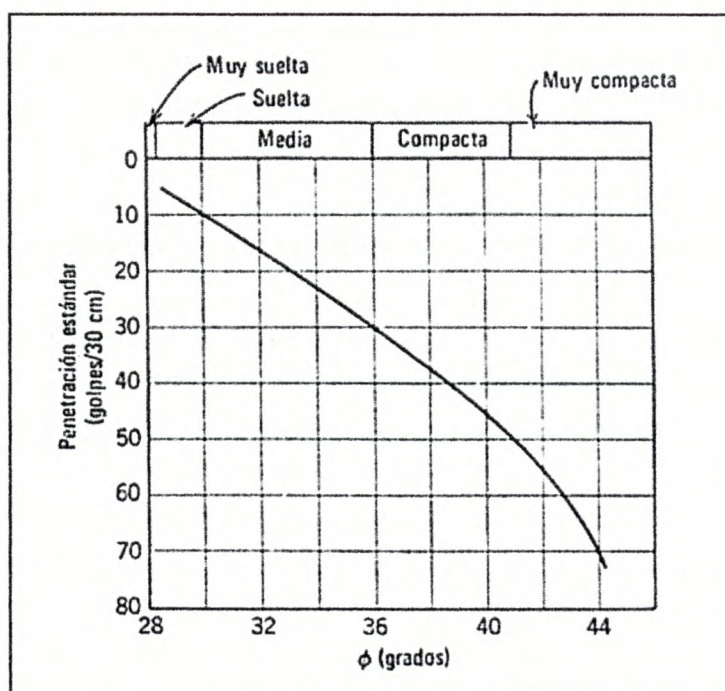


Figura 3.1. Correlación entre el ángulo de fricción y el valor N según Peck, Hanson y Thornburn, 1953. [Lambe, T. y Whitman, R., 1974].

La segunda correlación empírica utilizada es sugerida por el Departamento de Marina de los Estados Unidos en el año de 1971, [Das, B., 2001] y se muestra en la figura 3.2. Esta correlación es entre el valor del peso específico del suelo, la clasificación del tipo de suelo y el valor de ϕ ; y se utilizó para completar la información de los registros que no contaban con el valor de ϕ .

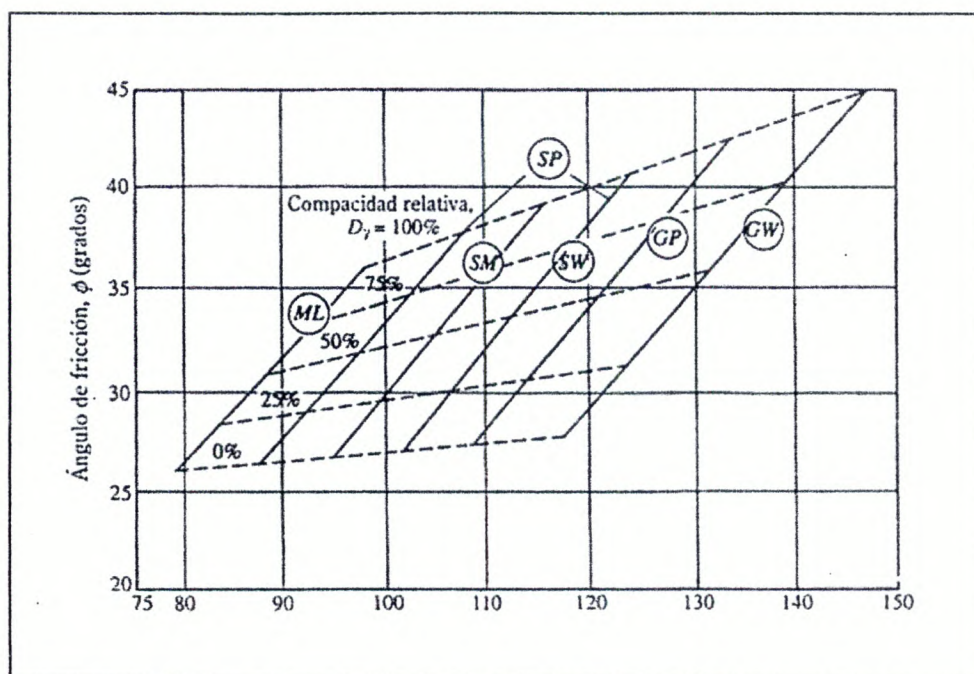


Figura 3.2. Correlación entre el valor de peso específico, la clasificación del tipo de suelo de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el ángulo de fricción y el valor N. [Das, B., 2001].

3.3. Generación del mapa de caracterización geotécnica de las unidades geológicas.

El procedimiento utilizado para obtener el mapa de caracterización geotécnica de las unidades geológicas del AMSS, tuvo las siguientes etapas:

1. Generación del mapa de ubicación de registros, utilizando la base de datos generada en los apartados 3.1 y 3.2.
2. Análisis estadístico de los valores de las propiedades geotécnicas de los registros. Los parámetros estadísticos obtenidos son: la media aritmética, desviación estándar, valor mínimo y máximo, conteo y rango.
3. Generación del mapa de caracterización geotécnica de las unidades geológicas del AMSS.

Generación del mapa de ubicación de registros.

Se trabajó con los registros que poseían coordenadas geográficas conocidas, y se realizaron los siguientes pasos:

1. El archivo "Base de datos.xls" creado en el apartado 3.1 se abrió en Microsoft Excel y posteriormente se guardó con la extensión .dbf (DBF 4, dBase IV, extensión utilizada por el programa Arc View), y se ubicó en la carpeta llamada "Base de Datos".
2. Se inició el programa Arc View, y en la ventana de proyecto se seleccionó el icono de tablas, al hacer esto se activaron las opciones para crear una nueva tabla, abrir una tabla existente o añadir una tabla al proyecto. Se seleccionó la opción "Add Table" (Añadir tabla) y se cargó el archivo "Base de datos.dbf"; al hacer esto se generó una tabla en el programa en la que aparecieron los campos tal como en la base de datos de Microsoft Excel. Ver Figuras 3.3. y 3.4.

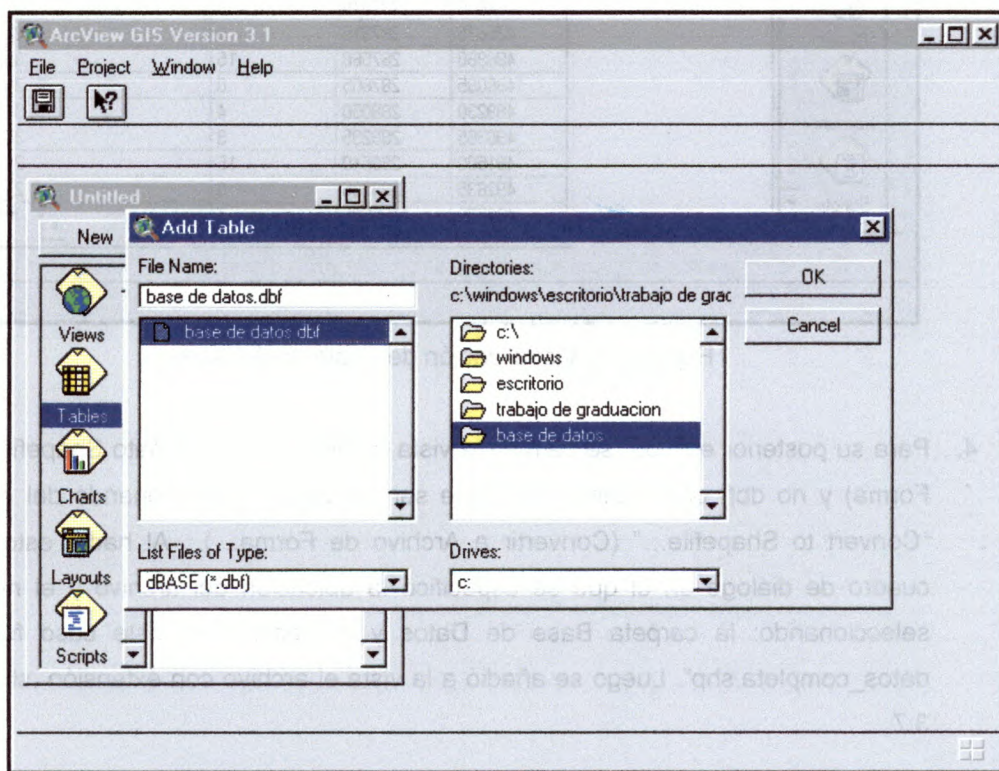


Figura 3.3. Selección de archivo con formato DBF.

3. Se seleccionó el icono View de la tabla de proyectos y se hizo clic en el botón "New", al hacer esto se abrió una nueva vista. Con la vista seleccionada, del menú View se tomó la opción Add Event Theme (Agregar tema de eventos) y se abrió un cuadro de diálogo en el que se especificó la tabla de datos a graficar y el campo utilizado para el valor de X y Y. La tabla que se seleccionó fue "Base de datos. dbf", el campo para el eje X fué el valor de Longitud y para el eje Y el de Latitud, como se muestra en la figura 3.5. Al hacer esto se creó un tema en la vista, el que tuvo que ser seleccionado para observar los puntos tal y como se muestra en la Figura 3.6.

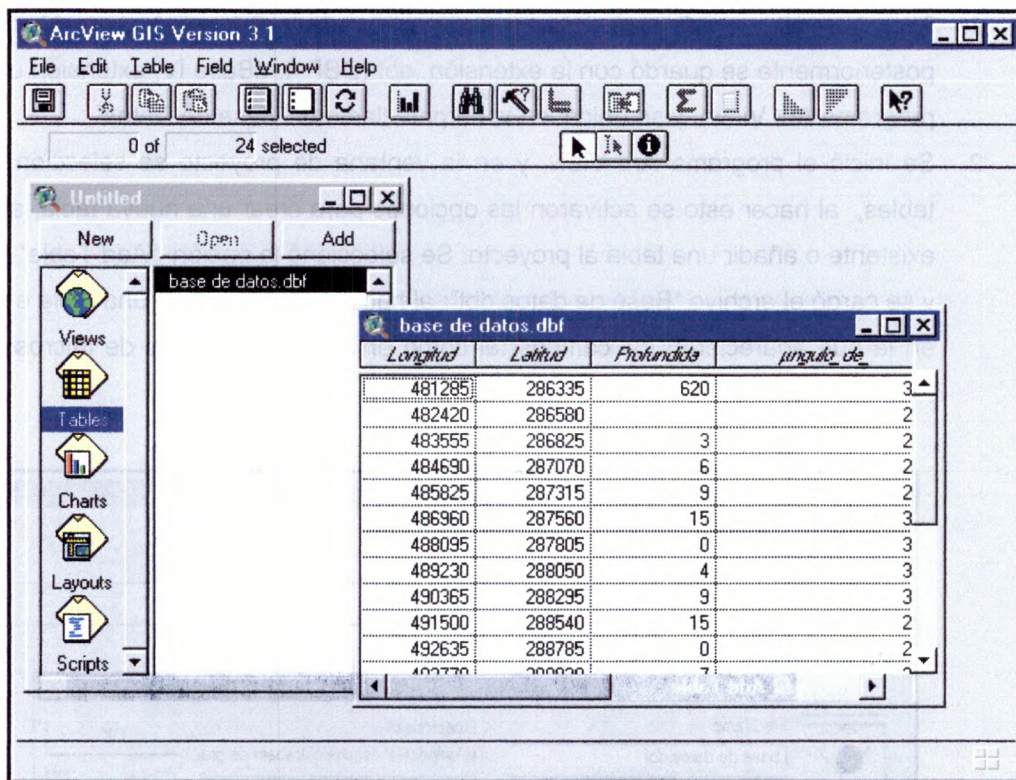


Figura 3.4. Visualización de Tabla en Arc View.

4. Para su posterior edición, se cambió la vista anterior por un formato Shapefile (Archivo de Forma) y no dbf, por lo tanto, tuvo que ser convertida seleccionando del menú Theme: "Convert to Shapefile..." (Convertir a Archivo de Forma...). Al hacer esto se abrió un cuadro de diálogo en el que se especificó la ubicación del archivo y el nuevo nombre seleccionando: la carpeta Base de Datos y el nombre en este caso fue: "Base de datos_completa.shp". Luego se añadió a la vista el archivo con extensión .shp. Ver Figura 3.7.

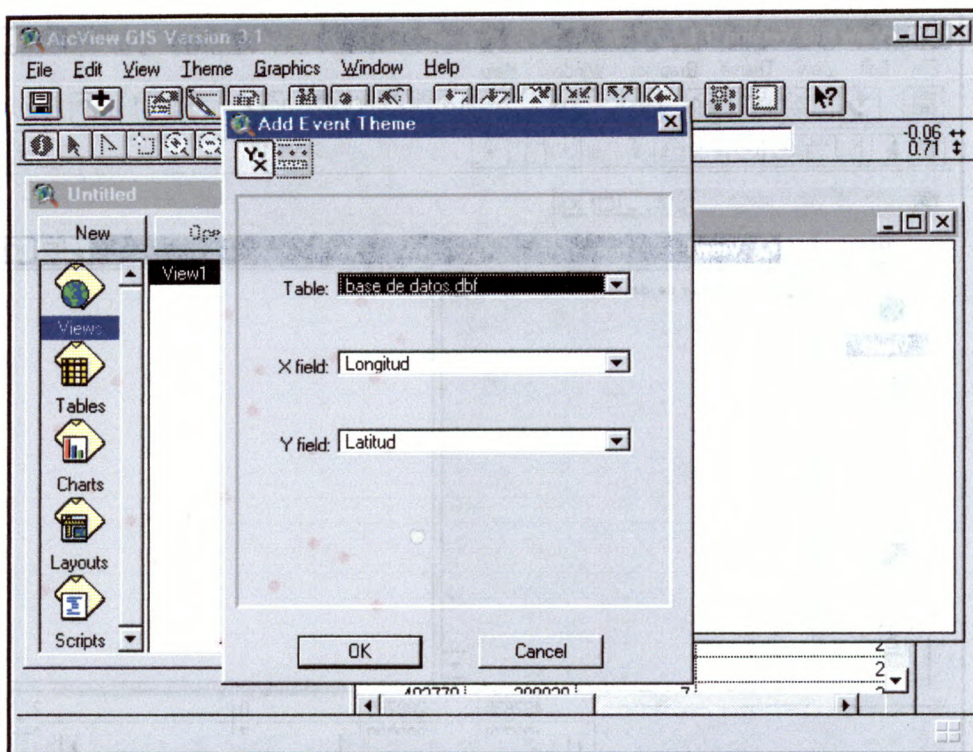


Figura 3.5. Ventana Add Event Theme (Agregar un tema de eventos).

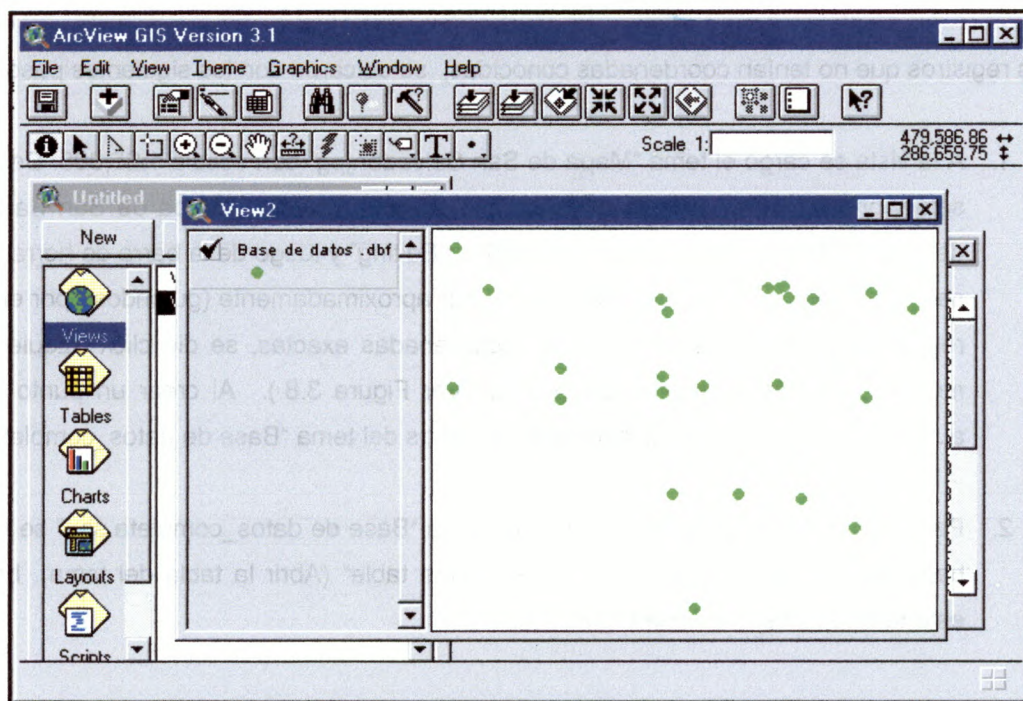


Figura 3.6. Visualización de dispersión de datos.

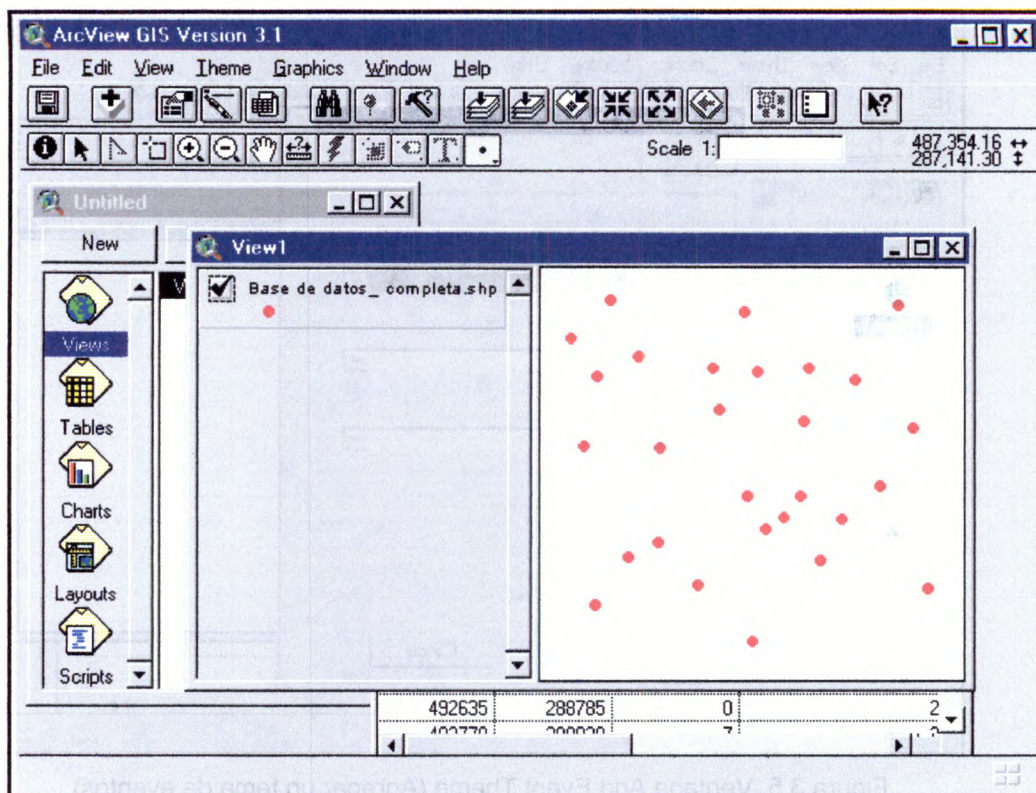


Figura 3.7. Visualización de tema en formato .shp.

Los registros que no tenían coordenadas conocidas, se ubicaron con los siguientes pasos:

1. A la vista se cargó el tema "Mapa de San Salvador.jpg" con escala 1:25,000. De la vista se seleccionaron los temas "Base de datos_completa.shp" y "Mapa de San Salvador.jpg", del menú Theme, se eligió la opción "Start Editing" y luego de la barra de herramientas se seleccionó el icono "Draw Point" para ubicar aproximadamente (guiándose por el mapa) el registro del que no se conocían las coordenadas exactas, se dió click izquierdo con el mouse para fijar el registro en la vista (Ver Figura 3.8.). Al crear un punto se añadía automáticamente una fila a la tabla de atributos del tema "Base de datos_completa.shp".
2. Para visualizar la tabla de atributos del tema "Base de datos_completa.shp" se eligió de la barra de herramientas el icono "Open theme table" (Abrir la tabla del tema). La tabla de este tema se observa en la Figura 3.9.

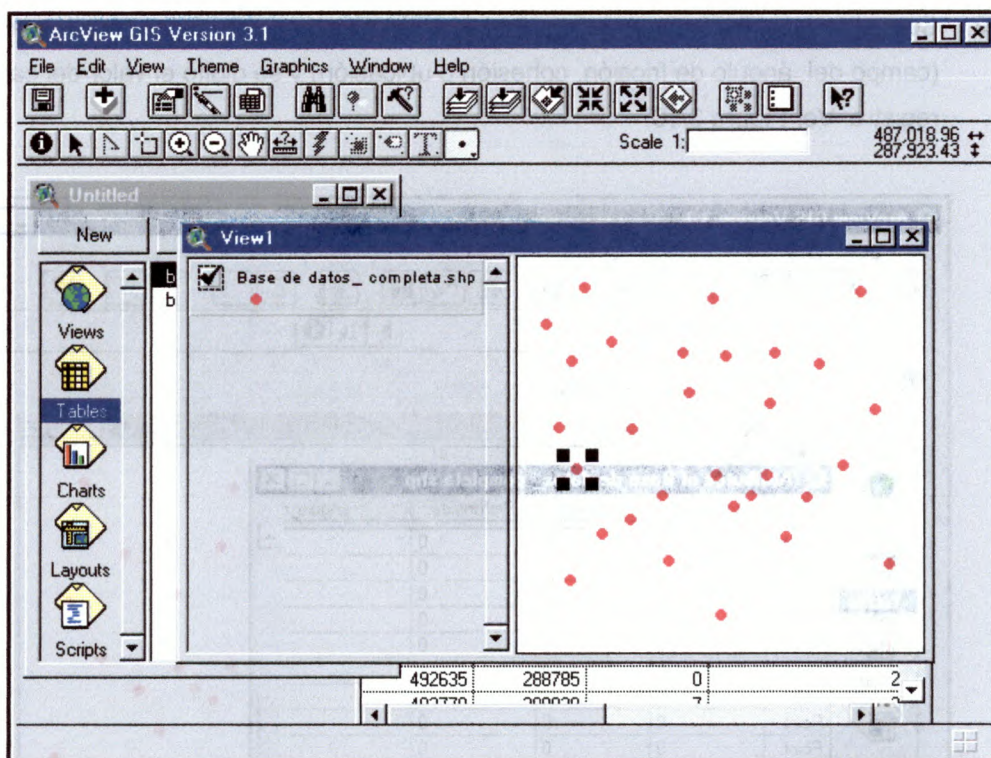


Figura 3.8. Entrada de un registro con coordenadas desconocidas.

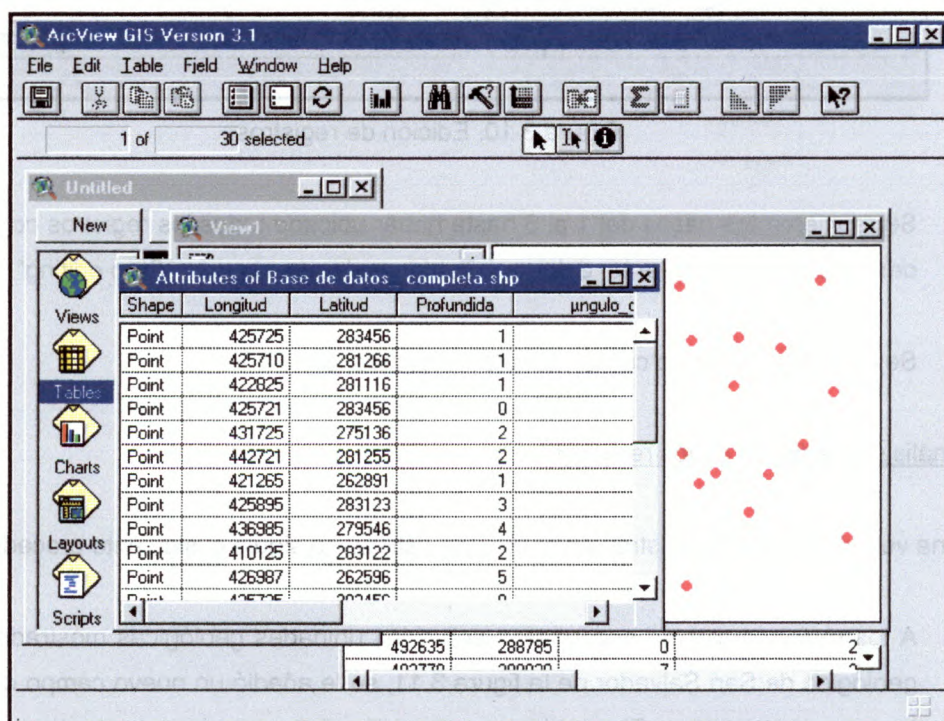


Figura 3.9. Visualización de tabla de atributos del tema Base de datos_Completa.shp.

3. Con el icono "Edit" de la barra de herramientas se posicionó sobre la casilla a editar (campo del: ángulo de fricción, cohesión o ubicación) y se digitó el valor del campo de cada registro. Ver Figura 3.10.

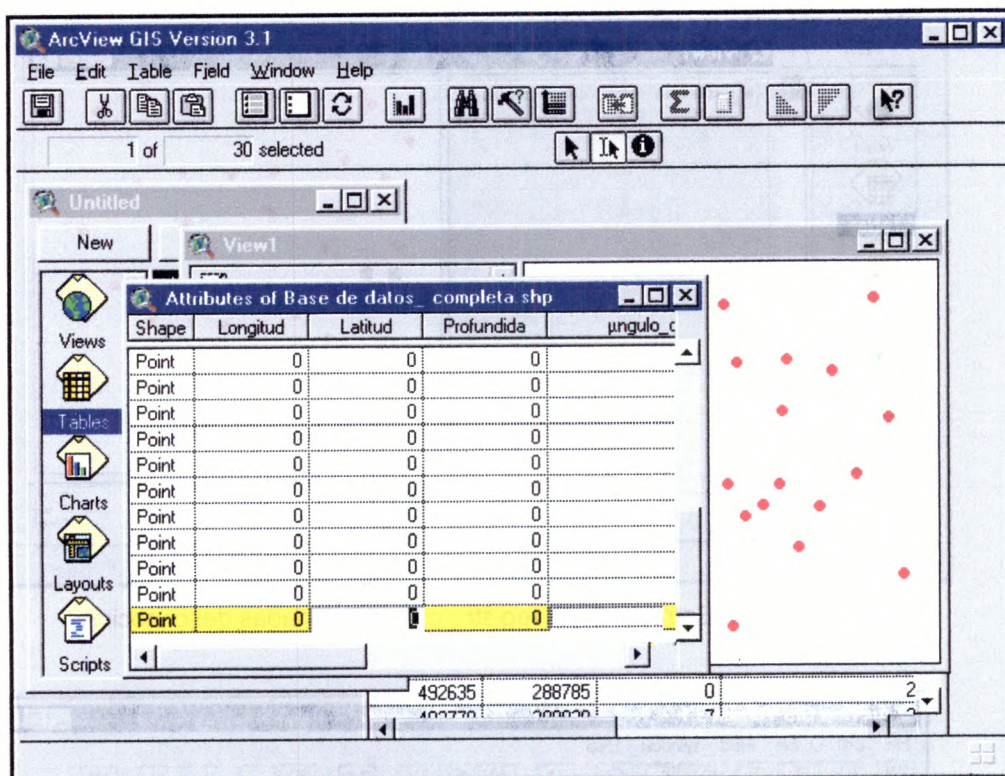


Figura 3.10. Edición de registros.

4. Se repitieron los pasos del 1 al 3 hasta haber ubicado todos los registros con coordenadas desconocidas. Finalmente, del menú Table se eligió la opción "Stop editing".
5. Se guardó el proyecto con el nombre "Registros. apr".

Análisis estadístico de los registros.

Una vez ubicados los registros en el área de estudio se siguió el siguiente procedimiento:

1. A los registros que se encontraron sobre las unidades geológicas mostradas en el mapa geológico de San Salvador de la figura 3.11, se le añadió un nuevo campo con la unidad a la que pertenecen. El archivo se guardó siempre con el nombre de "Base de datos_completa.shp".

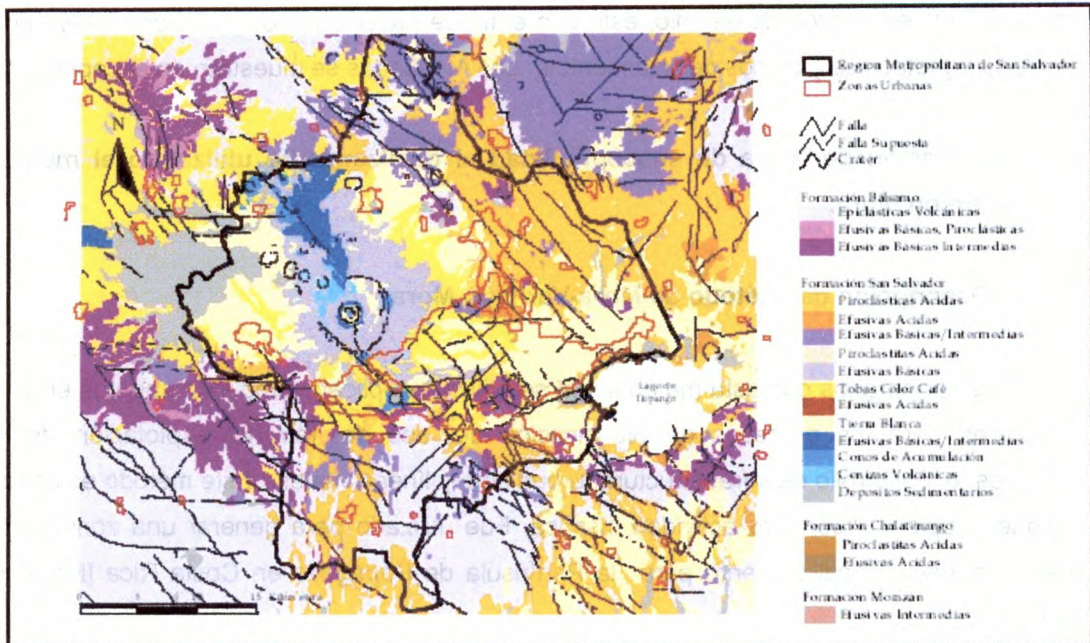


Figura 3.11. Mapa Geológico de la Región Metropolitana de San Salvador. Escala 1:15000 [PRISMA, 1967-1971].

- De la tabla del tema "Base de datos_completa.shp", se seleccionaron los registros de cada una de las unidades geológicas utilizando la herramienta "Pointer" y automáticamente en la tabla de atributos se indicaron los registros.
- De los registros seleccionados de acuerdo a la unidad geológica a la que pertenecen, se hizo un análisis estadístico, se determinó para cada unidad geológica el rango, la media aritmética, desviación estándar y conteo de los valores de cohesión, ángulo de fricción y peso específico.

Los resultados del análisis se muestran en el capítulo 4.

Generación del mapa de caracterización geotécnica.

Una vez definido para cada una de las unidades geológicas el rango de valores del ángulo de fricción y cohesión, se elaboró una tabla resumen de los valores de ángulo de fricción, cohesión y peso específico. De igual manera, se definió para cada unidad el valor de ϕ , c y γ , que representa a cada unidad para caracterizarla. El mapa de caracterización geotécnica elaborado tiene la misma apariencia del mapa geológico. Para brindar una mejor presentación y para hacer una discusión provechosa del mapa, se elaboraron mapas que muestren la variación del ángulo de fricción, cohesión y peso específico. En los mapas generados se ubicaron los deslizamientos ocurridos

hasta el 2001 en el área de estudio, esto con el fin de hacer una comparación relativa entre cada propiedad geotécnica y dichos deslizamientos. Los resultados se muestran en el capítulo 4.

3.4. Generación de mapa de susceptibilidad al deslizamiento utilizando el método Mora Vharson Mora.

3.4.1. Descripción del método de Mora-Varhson-Mora.

Los mapas generados con esta metodología se utilizan y aplican como instrumentos en la toma de decisiones para los procesos de planificación del uso del terreno, explotación de recursos naturales, el desarrollo de infraestructura, urbanismo y líneas vitales. Este método es aceptable en regiones tropicales con alta actividad sísmica. Fue utilizado para generar una zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento para la Península de Papagayo en Costa Rica [Mora, R., et al 1992].

“La metodología permite desarrollar una aproximación del grado de susceptibilidad al deslizamiento de la región estudiada y de los fenómenos que influyen mayormente esta condición”. [Mora, R., et al 1992].

“La combinación de los factores y parámetros se realiza considerando que los deslizamientos ocurren cuando en una ladera, compuesta por una litología determinada, con cierto grado de humedad y con cierta pendiente, se alcanza un grado de susceptibilidad (elementos pasivos). Bajo estas condiciones, los factores externos y dinámicos, como son la sismicidad y las lluvias intensas (elementos activos), actúan como factores de disparo que perturban el equilibrio de la ladera”. [Mora, R., et al 1992].

Se define entonces que el grado de susceptibilidad al deslizamiento es el producto del elemento pasivo y la acción del factor de disparo:

$$H = EP * D \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde:

H: grado de susceptibilidad al deslizamiento.

EP: valor producto de la combinación de los elementos pasivos. Factor de susceptibilidad.

D: valor del factor de disparo o activación.

El factor de susceptibilidad se obtiene de la siguiente ecuación:

$$EP = S_l * S_h * S_p \quad (\text{Ec. 3.2.})$$

donde:

S_l : valor del parámetro de susceptibilidad litológica.

S_h : valor del parámetro de humedad del suelo.

S_p : valor del parámetro del relieve.

El factor de disparo se obtiene de la siguiente manera:

$$D = D_s + D_{II} \quad (\text{Ec. 3.3.})$$

donde:

D_s : valor del parámetro de disparo sísmológico.

D_{II} : valor del parámetro de disparo por lluvia.

Sustituyendo en la ecuación 4.1., se obtiene:

$$H = (S_I * S_h * S_p) * (D_s + D_{II}) \quad (\text{Ec. 3.4.})$$

De la cual se derivan:

$$H_s = D_s * (S_I * S_h * S_p) \quad (\text{Ec. 3.5.})$$

$$H_{II} = D_{II} * (S_I * S_h * S_p) \quad (\text{Ec. 3.6.})$$

donde:

H_s : potencial generador de deslizamientos por sismicidad.

H_{II} : potencial generador de deslizamientos por lluvias.

Para los resultados de la combinación de todos los factores no se puede establecer una escala de valores única, pues los mismos dependen de las condiciones de cada área estudiada. Por lo que se sugiere [Mora, R., et al, 1992] dividir el rango de valores obtenidos, para el área de estudio, en cinco clases de susceptibilidad y asignar los calificativos que se presentan en la tabla 3.3. El calificativo de susceptibilidad es una representación cuantitativa de los diferentes niveles de amenaza, que muestran solamente el rango de amenaza relativa en un sitio en particular y no la amenaza absoluta.

Cabe señalar que este método no considera la existencia de algunos factores externos e internos que se señalan a continuación:

- Factores externos como el aumento de carga sobre el terreno debido a construcciones, los esfuerzos transitorios como vientos o vibraciones debido a maquinaria, la presión lateral debido a presiones hidráulicas.
- Factores internos como el cambio de la presión de poros, el desgaste por la acción atmosférica y la meteorización.

Clase	Calificativo de susceptibilidad al deslizamiento	Características
I	Muy baja	Sectores estables, no se requieren medidas correctivas. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta.
II	Baja	Sectores estables que requieren medidas correctivas menores, solamente en casos especiales. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta.
III	Moderada	No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se mejora la condición del sitio.
IV	Alta	Probabilidad de deslizamientos alta en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Se deben realizar estudios de detalle y medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección.
V	Muy alta	Probabilidad de deslizamiento muy alta en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Se deben realizar estudios de detalle y medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección.

Tabla 3.3. Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento. [Mora, R., et al 1992].

3.4.2. Descripción de los factores de susceptibilidad del método de Mora-Vahrson-Mora para el área de estudio.

Se presenta a continuación los parámetros que intervienen en la evaluación de la amenaza por deslizamientos de tierra propuesto para ser aplicados en el área de estudio, utilizando Sistemas de Información Geográfica. Dicha adaptación está basada en Mora, R., et al [1992].

Elemento pasivo

- Parámetro de la pendiente (S_p).

El parámetro de la pendiente (S_p), utiliza las clases de pendiente de van Zuidam, con las cuales se describen los procesos característicos esperados y las condiciones del terreno. Las clases de

pendientes pueden coincidir con los sectores críticos, donde los procesos de deslizamiento son dominantes. (Ver tabla 3.4.)

Clases de pendientes		Condiciones del terreno	Valor de S_p
(°)	(%)		
0-2	0-2	Planicie, sin denudación apreciable	0
2-4	2-7	Pendiente muy baja, peligro de erosión.	1
4-8	7-15	Pendiente baja, peligro severo de erosión.	2
8-16	15-30	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro de erosión severo.	3
16-35	30-70	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos, (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos.	4
35-55	70-140	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible.	5
>55	>140	Extremadamente fuerte, afloramientos rocosas, procesos denudacionales severos (caída de rocas), cobertura vegetal limitada	6

Tabla 3.4. Clases de pendientes, condiciones del terreno y valoración del parámetro S_p . [Mora, R., et al 1992].

- Parámetro de Susceptibilidad litológica (S_l).

“La composición mineralógica, la capacidad de retención de humedad, los espesores y grado de humedad, el estado de fracturamiento, el ángulo de buzamiento, la posición y variación de los niveles freáticos, etc., influyen claramente en la estabilidad o inestabilidad de las laderas” [Mora, R., et al 1992].

La evaluación de este parámetro se hace tomando en cuenta la evaluación de propiedades geotécnicas de suelos. Se propone utilizar la Tabla 3.5, para obtener el valor de S_l .

Para la valoración del parámetro S_l , se requirió de los valores del ángulo de fricción (ϕ) y la cohesión (c), éstos valores son los utilizados para la caracterización geotécnica de las unidades geológicas del área de estudio.

Se utilizaron además las siguientes consideraciones:

- Cuando se tuvo valores de ángulo de fricción y cohesión que no coincidían en una misma valoración, dominó: para suelos no consolidados el valor de cohesión (c) y para suelos mediana y altamente consolidados el valor de ángulo de fricción (ϕ)
- Cuando se tuvo valores solamente de ángulo de fricción, la valoración del parámetro se hizo utilizando el valor de ϕ .

ϕ (°)	C (KPa)	Descripción	Valoración del parámetro S_1
0-15	0-10	Muy bajo	5
15-20	10-15	Bajo	4
20-25	15-20	Medio	3
25-30	20-25	Alto	2
>30	>25	Muy alto	1

Tabla 3.5. Valoración del parámetro susceptibilidad litológica. [Mora, R., et al 1992].

- Parámetro de humedad del terreno (S_h).

Para estimar el parámetro de susceptibilidad por humedad del suelo, se asignó primeramente los valores que se indican en la tabla 3.6, referente a la precipitación promedio mensual en milímetros. [Brizuela, B. y Menjivar, L., 2002]

Precipitación mensual (mm)	Valor asignado
<125	0
125-250	1
>250	2

Tabla 3.6. Valores asignados a los promedios mensuales de lluvias. [Mora, R., et al 1992].

Luego, a la suma de los valores asignados a los doce meses del año (resultado que varía entre 0 y 24) se le asigna el valor del parámetro, como lo indica la tabla 3.7.

Factor de disparo

- Parámetro de disparo por sismicidad D_s .

El potencial de generación de deslizamientos por actividad sísmica puede correlacionarse con la escala de Intensidad Mercalli-Modificada, así como valores de aceleraciones pico, como lo muestra la tabla 3.8.

Se utilizaron además las siguientes consideraciones:

- Cuando se tuvo valores de ángulo de fricción y cohesión que no coincidían en una misma valoración, dominó: para suelos no consolidados el valor de cohesión (c) y para suelos mediana y altamente consolidados el valor de ángulo de fricción (ϕ)
- Cuando se tuvo valores solamente de ángulo de fricción, la valoración del parámetro se hizo utilizando el valor de ϕ .

ϕ (°)	C (KPa)	Descripción	Valoración del parámetro S_1
0-15	0-10	Muy bajo	5
15-20	10-15	Bajo	4
20-25	15-20	Medio	3
25-30	20-25	Alto	2
>30	>25	Muy alto	1

Tabla 3.5. Valoración del parámetro susceptibilidad litológica. [Mora, R., et al 1992].

- Parámetro de humedad del terreno (S_h).

Para estimar el parámetro de susceptibilidad por humedad del suelo, se asignó primeramente los valores que se indican en la tabla 3.6, referente a la precipitación promedio mensual en milímetros. [Brizuela, B. y Menjívar, L., 2002]

Precipitación mensual (mm)	Valor asignado
<125	0
125-250	1
>250	2

Tabla 3.6. Valores asignados a los promedios mensuales de lluvias. [Mora, R., et al 1992].

Luego, a la suma de los valores asignados a los doce meses del año (resultado que varía entre 0 y 24) se le asigna el valor del parámetro, como lo indica la tabla 3.7.

Factor de disparo

- Parámetro de disparo por sismicidad D_s .

El potencial de generación de deslizamientos por actividad sísmica puede correlacionarse con la escala de Intensidad Mercalli-Modificada, así como valores de aceleraciones pico, como lo muestra la tabla 3.8.

Suma de los valores asignados	calificativo	Valor del parámetro (S_h)
0-4	Muy bajo	1
5-9	Bajo	2
10-14	Medio	3
15-19	Alto	4
20-24	Muy alto	5

Tabla 3.7. Factor de humedad S_h , resultado de la clasificación de valores acumulados de los promedios de precipitación de cada mes. [Mora, R., et al 1992].

Intensidad Mercalli Modificada	Aceleración pico (%g)	Valoración del parámetro D_s
I	0.3 – 0.6	1
II	0.6 – 1.1	2
III	1.1 – 2.2	3
IV	2.2 – 4.5	4
V	4.5 – 8.9	5
VI	8.9 – 17.7	6
VII	17.7 – 35.4	7
VIII	35.4 – 70.5	8
IX	70.5 – 140.8	9
X	140.8 – 280.8	10
XI	280.8 – 560.4	11
XII	>560.4	12

Tabla 3.8. Valoración del parámetro de disparo por D_s . [Mora, R., et al 1992].

- Parámetro de disparo por lluvia D_{II} .

En la tabla 3.9. se muestra la valoración del parámetro D_{II} , correspondiente a lluvia máxima diaria.

Lluvias máximas diarias, período de retorno de 100 años (mm)	Descripción	Valoración del parámetro D_{II} .
<100	Muy bajo	1
100-200	Bajo	2
200-300	Mediano	3
300-400	Alto	4
>400	Muy alto	5

Tabla 3.9. Valoración del parámetro de disparo por lluvias D_{II} . [Mora, R., et al 1992].

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS ESTRATOS GEOLÓGICOS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.

4.1 Introducción.

En este capítulo se presenta la caracterización geotécnica de las unidades geológicas del área de estudio, de acuerdo a la metodología planteada en el capítulo 3.

El contenido del capítulo se resume en lo siguiente:

1. Presentación del mapa geológico del área de estudio, las formaciones y las unidades que lo componen.
2. Obtención, complementación y análisis de la información recopilada para cada unidad geológica, según la metodología planteada en el capítulo 3.
3. Elaboración de los mapas conteniendo la caracterización geotécnica de cada unidad geológica en función del análisis realizado.
4. Discusión de los resultados obtenidos.

4.2 Mapa Geológico del AMSS.

En la figura 4.1 se muestra sombreada el área de estudio utilizada dentro de San Salvador y sus alrededores. En este mapa pueden observarse el volcán de San Salvador, el volcán de San Jacinto y el Lago de Ilopango. El mapa geológico que se utilizó para la caracterización geotécnica comprende la región sombreada de la figura 4.1 y se muestra en la figura 4.2, las formaciones geológicas que lo conforman son: la de Cuscatlán, la de San Salvador y la del Bálsamo; además, se muestran las 7 unidades geológicas que comprenden estas tres formaciones, la tabla 4.1 presenta la descripción de cada una y ha sido tomada del Mapa Geológico del AMSS en formato digital, escala 1:15,000 [Brizuela, B. y Menjívar, L., 2002]. En el apartado 2.1.3. se explicó detenidamente las formaciones y unidades geológicas que abarca San Salvador.

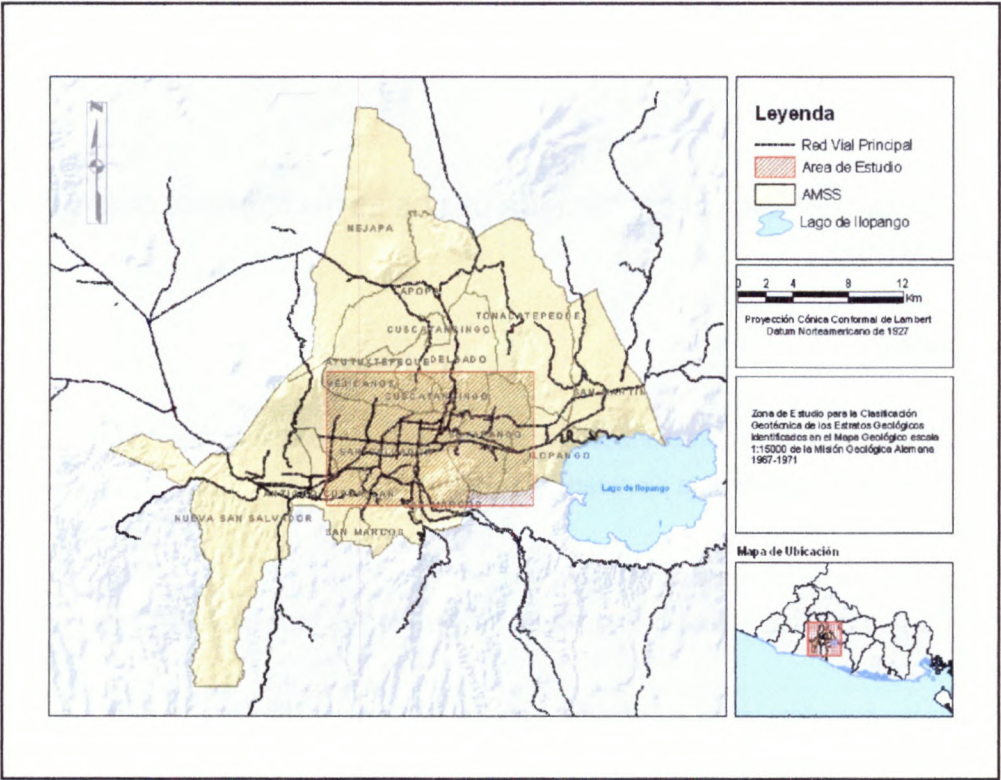


Figura 4.1. Mapa de San Salvador y sus alrededores, mostrando el área que comprende el mapa geológico mostrado en la figura 4.2.

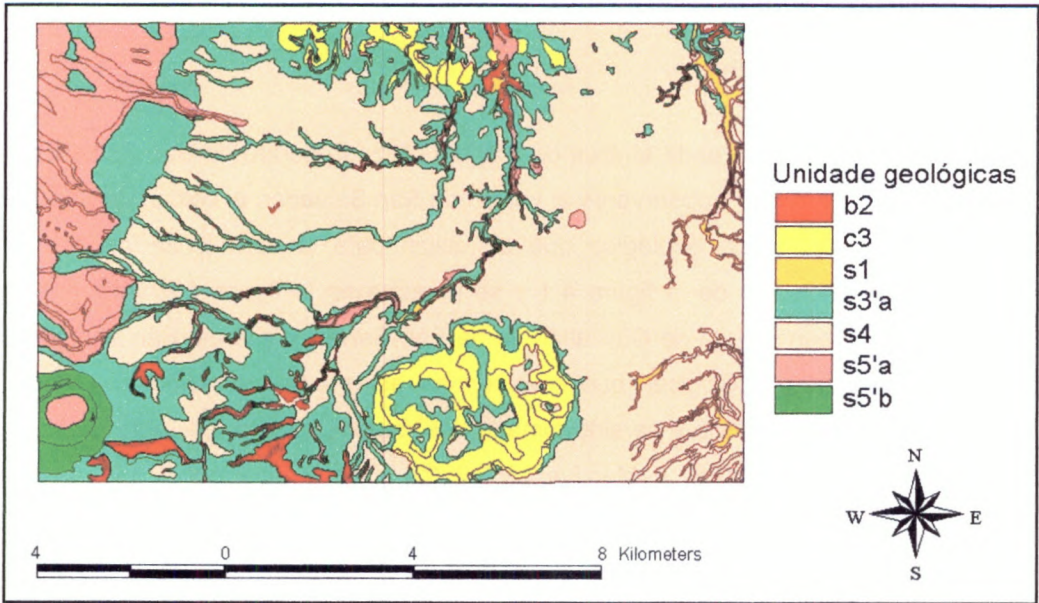


Figura 4.2. Mapa geológico para el área de estudio con las 7 unidades geológicas. [Brizuela, B. y Menjívar, L., 2002]

UNIDAD	FORMACIÓN	ERA	DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD
b2	Bálsamo	Plioceno	- Serie de tobas aglomeráticas. - Lavas basálticas y andesíticas.
c3	Cuscatlán	Plioceno-Pleistoceno	- Lavas basálticas, andesíticas y dacíticas, a veces cúpulas cubiertas hasta 3 m con tobas.
s1	San Salvador	Reciente	- Aluviones fluviales.
s3'a	San Salvador	Pleistoceno	- Tobas predominantemente color café, interestratificadas localmente con cenizas y escorias.
s4	San Salvador	Holoceno inferior	- Cenizas volcánicas, predominantemente color blanco (tierra blanca), poco consolidadas y de fácil erosión.
s5'a	San Salvador	Pleistoceno	- Lavas basálticas y andesíticas, predominantemente del volcán de San Salvador, cubiertas hasta 3 m con tobas café. - Tobas aglomeráticas superiores (localmente interestratificadas con tobas café).
s5'b	San Salvador	Pleistoceno	- Cenizas y escorias negras del cráter de La Laguna. - Cubiertas con más de 2 m con tobas color café.

Tabla 4.1. Unidades geológicas correspondientes al área de estudio.

4.3 Obtención, complementación y análisis de la información.

La metodología para la recopilación y complementación de datos se indicó en el capítulo 3, de igual forma, en la tabla 3.2 se mostró la información que se recopiló para cada registro.

La figura 4.3 muestra la ubicación de los 158 registros recopilados para el área de estudio, éstos fueron ubicados con la metodología planteada en el apartado 3.3. Los registros han sido ubicados sobre el mapa geológico utilizando herramientas de Arc View.

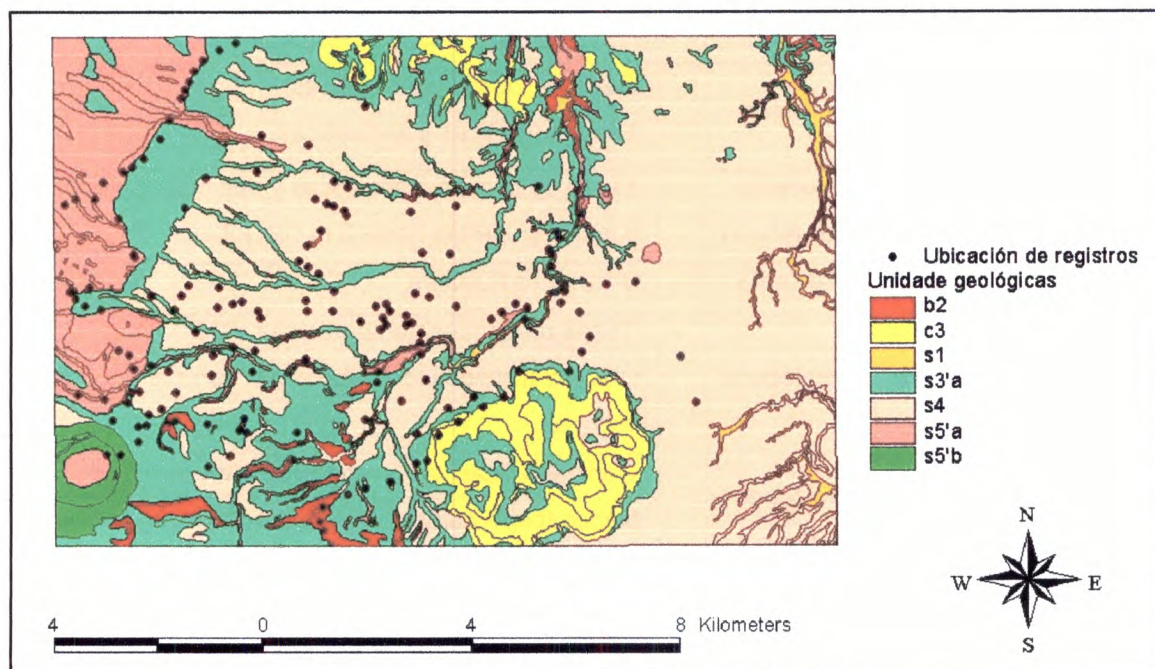


Figura 4.3. Ubicación de los registros recopilados sobre el mapa geológico.

4.3.1. Recopilación de los valores de las propiedades geotécnicas de las unidades geológicas para el AMSS.

En el Anexo A en la tabla A.1 se muestran los registros recopilados con la siguiente información: longitud, latitud, clasificación del tipo de suelo, cohesión, peso específico y ángulo de fricción. Debido a que estos registros fueron recopilados con toda la información que se necesitaba, no hubo necesidad de complementarlos.

4.3.2. Complementación de la base de datos.

Los registros recopilados que se muestran en el Anexo A en la tabla A.2, contienen la siguiente información: longitud, latitud, clasificación del tipo de suelo, y peso específico. Debido a que no se tenía el valor del ángulo de fricción interna, se utilizó la correlación empírica de la figura 3.2 (apartado 3.2), que relaciona el valor de peso específico, la clasificación del tipo de suelo, el ángulo de fricción para complementar la tabla con los valores de ángulo de fricción.

Para los registros en los que se recopilaron los valores de: la clasificación del tipo de suelo, N y la ubicación del registro, se correlacionó el valor de N para obtener el valor del ángulo de fricción utilizando la correlación empírica de la figura 3.1 (ver apartado 3.2.) En el Anexo A, la tabla A.3 muestra los registros para los que fue necesaria dicha correlación.

Los registros para los que se recopilaban los valores de: cohesión, ángulo de fricción interna y la ubicación del registro se muestran en la tabla A.4. del Anexo A, dado que no se contaba con la localización del registro con coordenadas geográficas exactas, se situaron utilizando herramientas de sistemas de información geográfica de Arc- View (ver apartado 3.3). En ningún caso se contó con valores de número de golpes de la prueba SPT (N) y peso específico a la vez.

4.3.3. Análisis de las propiedades geotécnicas de los registros por unidad geológica.

Valor del Ángulo de Fricción interna (ϕ).

Los datos que se recopilaban se analizaron estadísticamente, dicho análisis se realizó de acuerdo a la unidad geológica a la que pertenecían y al valor del ángulo de fricción interna. El valor promedio del ángulo de fricción se ha graficado como una línea recta vertical continua en cada gráfico. La distribución de frecuencias obtenida para cada unidad se muestra a continuación

- Unidad b2

La distribución de frecuencias de la figura 4.4 no posee una tendencia normal, probablemente debido a la falta de datos; por esto se usará el valor promedio del ángulo de fricción (28.63°) para caracterizar la unidad, además se considera que este valor es más conservador que el rango de datos con más frecuencia (moda, 31.00°).

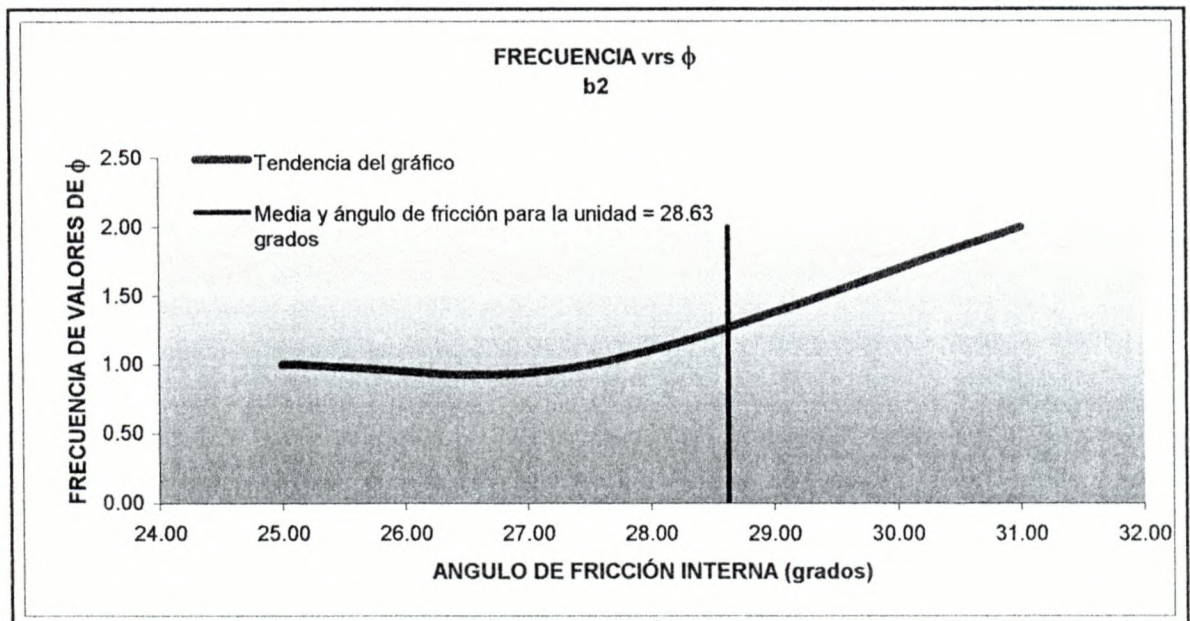


Figura 4.4. Distribución Frecuencia-Ángulo de fricción para la unidad b2, el valor promedio de la unidad es 28.63° .

- Unidad c3

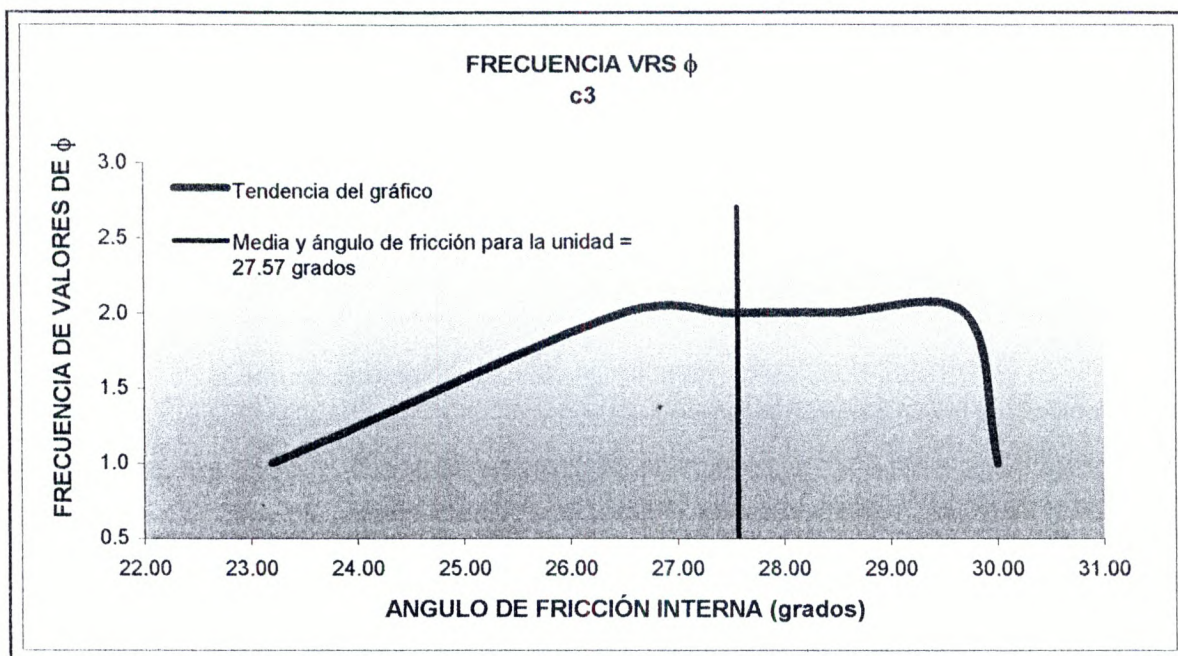


Figura 4.5. Distribución Frecuencia-Ángulo de fricción para la unidad c3, el valor promedio de la unidad es 27.57°.

La distribución de frecuencias de la figura 4.5, muestra una tendencia aproximadamente normal con un valor promedio aceptable, ya que, este representa aproximadamente el promedio de la cresta del gráfico; por lo que será el valor de la media aritmética (27.57°) el que se utilizará para la caracterización geotécnica de la unidad c3.

- Unidad s1.

La distribución de datos para esta unidad geológica muestra estar incompleta ya que solo se contó con 3 datos de igual frecuencia por lo que la tendencia es una línea recta y se observa en la figura 4.6. Se tomará el valor promedio del ángulo de fricción (29.27°) para caracterizar la unidad.

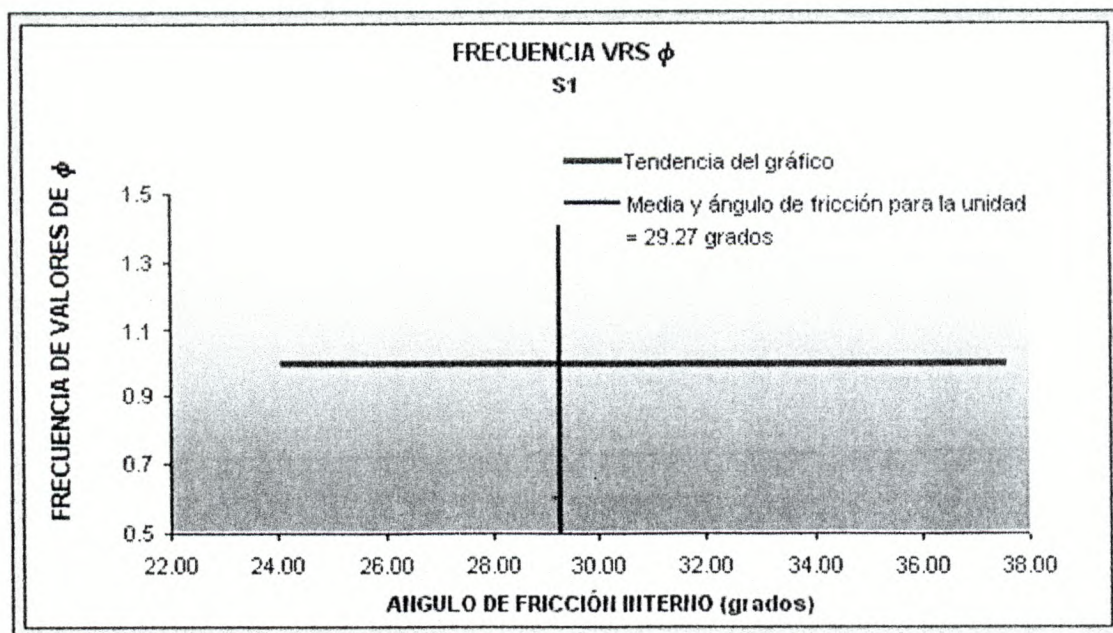


Figura 4.6. Distribución Frecuencia-Ángulo de fricción para la unidad s1, el valor promedio de la unidad es 29.27°.

- Unidad s3'a

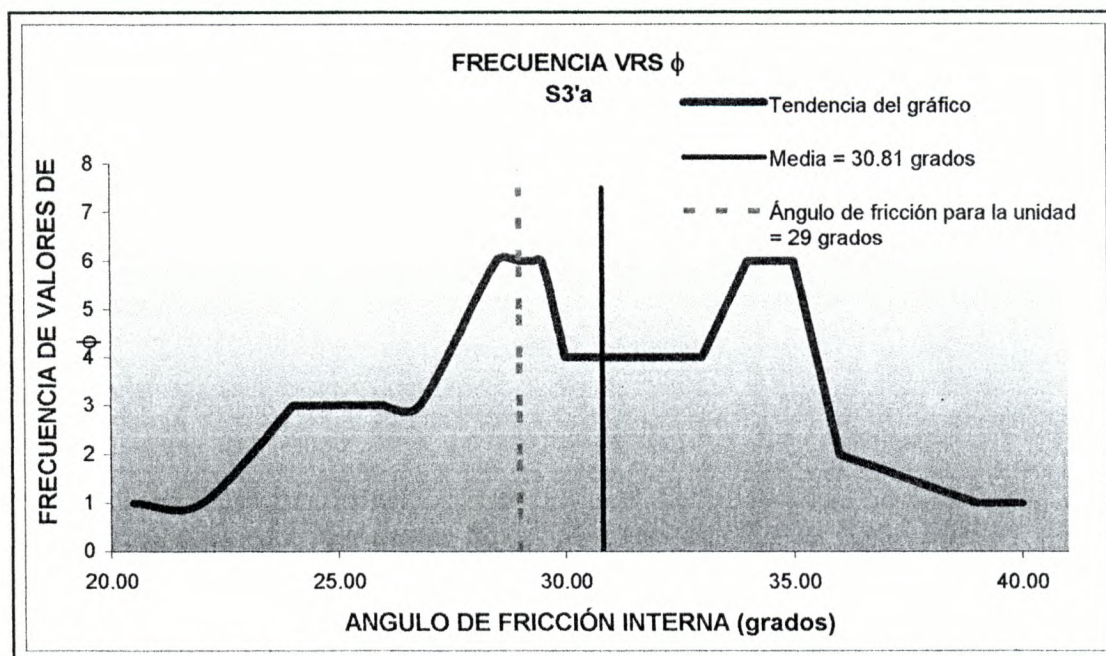


Figura 4.7. Distribución Frecuencia-Ángulo de fricción para la unidad s3'a, el valor promedio de la unidad es 30.81°.

La distribución de frecuencias de esta unidad se muestra en la figura 4.7. En ella se observa que el valor promedio cae entre dos picos cuyos valores de ángulo de fricción son de 29° y 34.5° , el valor promedio del ángulo para la unidad (30.81°) tiende al valor menor de los dos picos. Se tomará conservadoramente el valor menor del primer pico para representar a esta unidad, siendo este valor 29.00° .

- Unidad s4

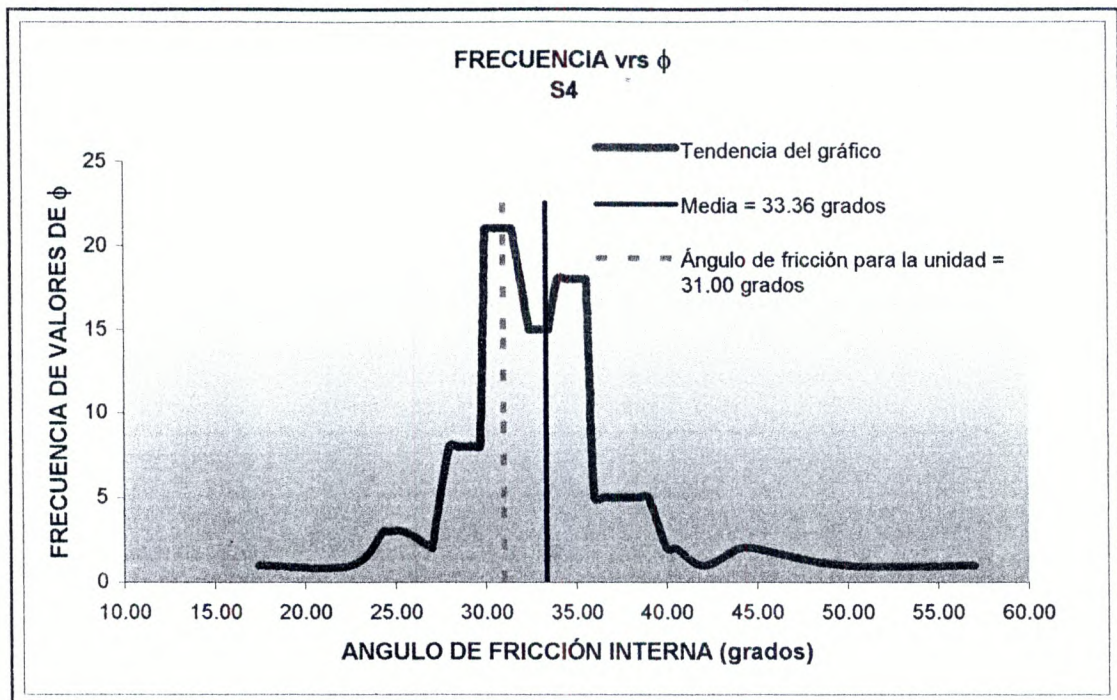


Figura 4.8. Distribución Frecuencia-Ángulo de fricción para la unidad s4, el valor promedio de la unidad es 33.36° .

La distribución de frecuencias para esta unidad se observa en la figura 4.8. Los valores de frecuencia de 15° a más de 20° posee dos picos, el primero tiene un valor en su centro de 31° y el segundo de 35° , dado que el valor promedio es 33.36° , se tomará el menor valor de los picos (31.00°) como representativo, ya que posee el mayor número de frecuencias (moda) y es un valor de ángulo de fricción más conservador.

- Unidad s5'a

Para la unidad s5'a puede observarse que la distribución de frecuencias de la figura 4.9 posee dos picos, el valor promedio cae en el pico con mas frecuencias, siendo este valor conservador y representativo a la vez. Se tomará el dato promedio de 31.23° para caracterizar a esta unidad.

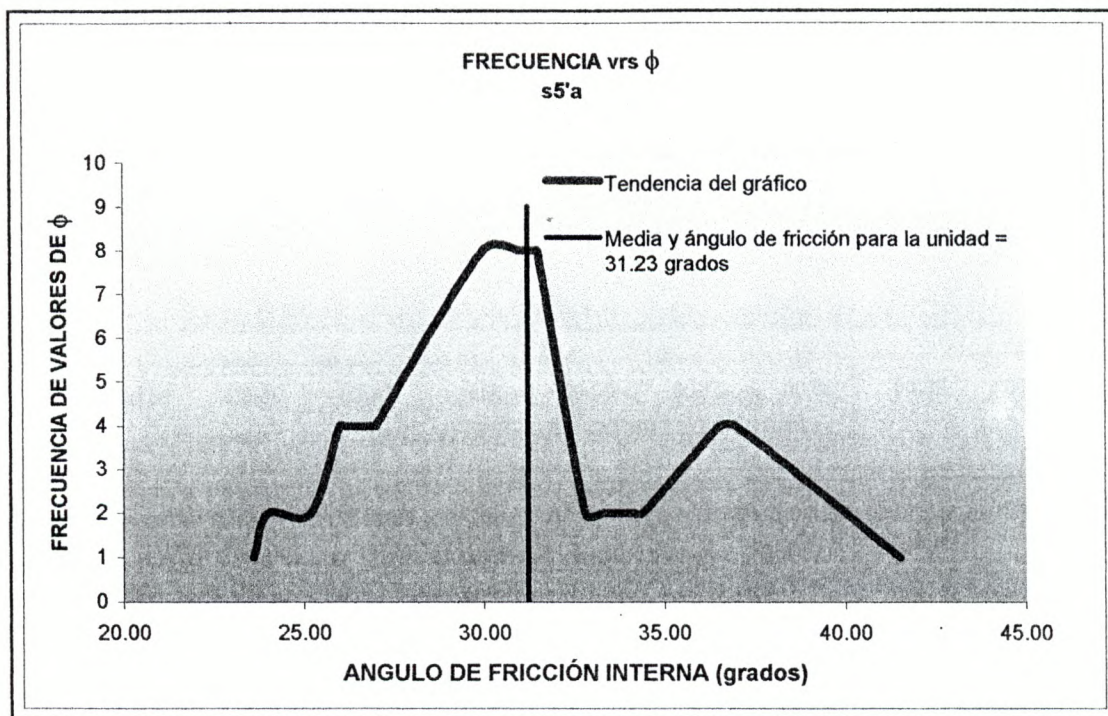


Figura 4.9. Distribución Frecuencia-Ángulo de fricción para la unidad s5'a, el valor promedio de la unidad es de 31.23°.

- Unidad s5'b.

La distribución de datos de la figura 4.10 muestra estar incompleta ya que la tendencia es una línea recta, esto se debe a que solo se contó con 2 datos de igual frecuencia para esta unidad geológica. El valor de la media aritmética (32.00°) será el valor que se utilizará para caracterizar la unidad.

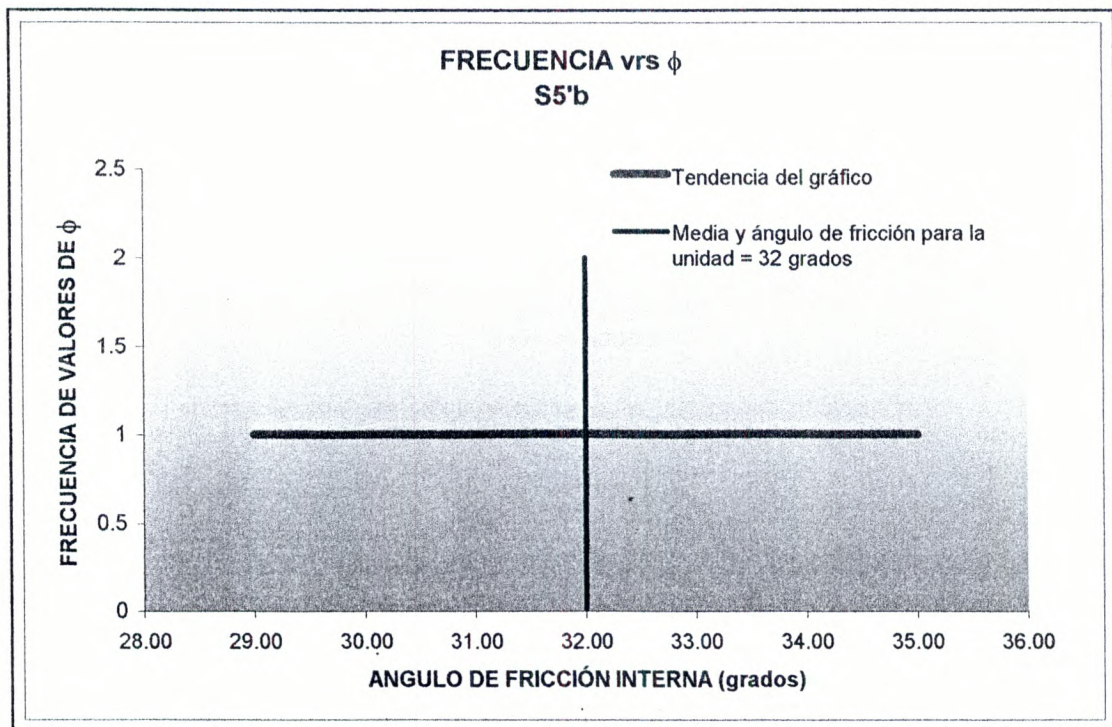


Figura 4.10. Distribución Frecuencia-Ángulo de fricción para la unidad S5'b, el valor promedio de la unidad es 32.00°.

Valor de cohesión (c).

Los datos de cohesión que se recopilaban se analizaron estadísticamente de acuerdo a la unidad geológica a la que pertenecen. En las gráficas de las figuras que se muestran a continuación, se ha graficado como una línea recta continua vertical el valor promedio de la cohesión y el valor tomado para caracterizar la unidad se muestra como una línea recta vertical punteada.

- Unidad b2

La figura 4.11 muestra la falta de registros para la unidad. Para esta unidad solo se contó con dos datos de igual frecuencia (1) y por eso se grafica una línea recta. Se tomará el promedio (0.18 ton/m²) de la cohesión para caracterizar esta unidad.

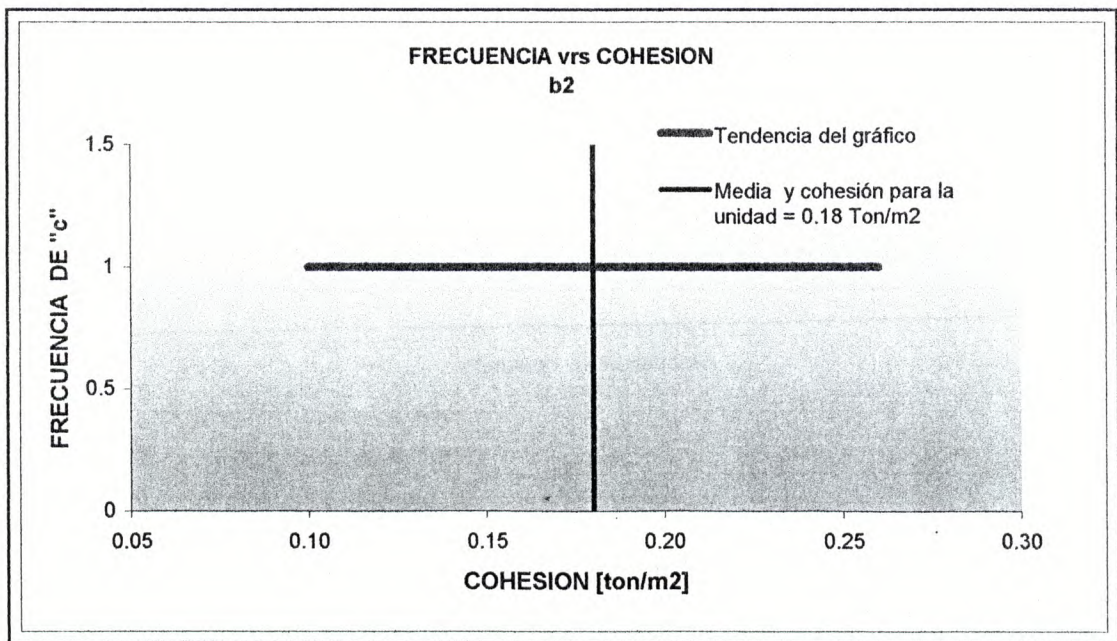


Figura 4.11. Distribución Frecuencia-Cohesión para la unidad b2. El valor promedio de la unidad es 0.18 ton/m².

- Unidad c3

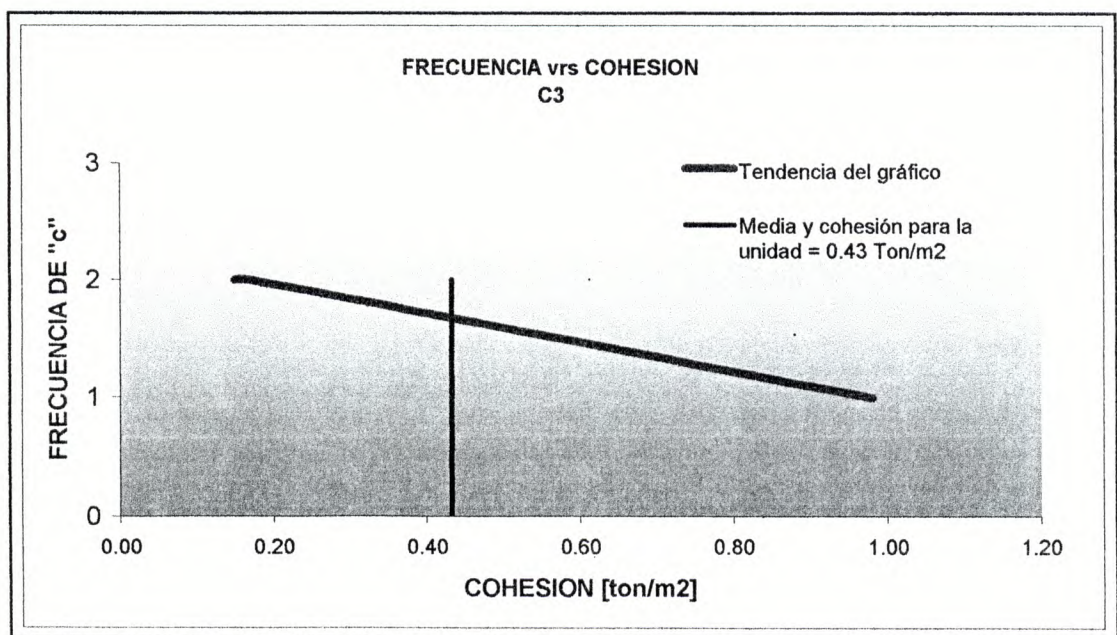


Figura 4.12. Distribución Frecuencia-Cohesión para la unidad c3, el valor promedio de la unidad es 0.43 ton/m².

La distribución de la figura 4.12 muestra que el número de registros no es suficiente. Para esta unidad solo se contó con tres registros, dos de ellos en el mismo intervalo. Se tomará el valor promedio (0.43 ton/m^2) para representar geotécnicamente la unidad.

- Unidad s1.

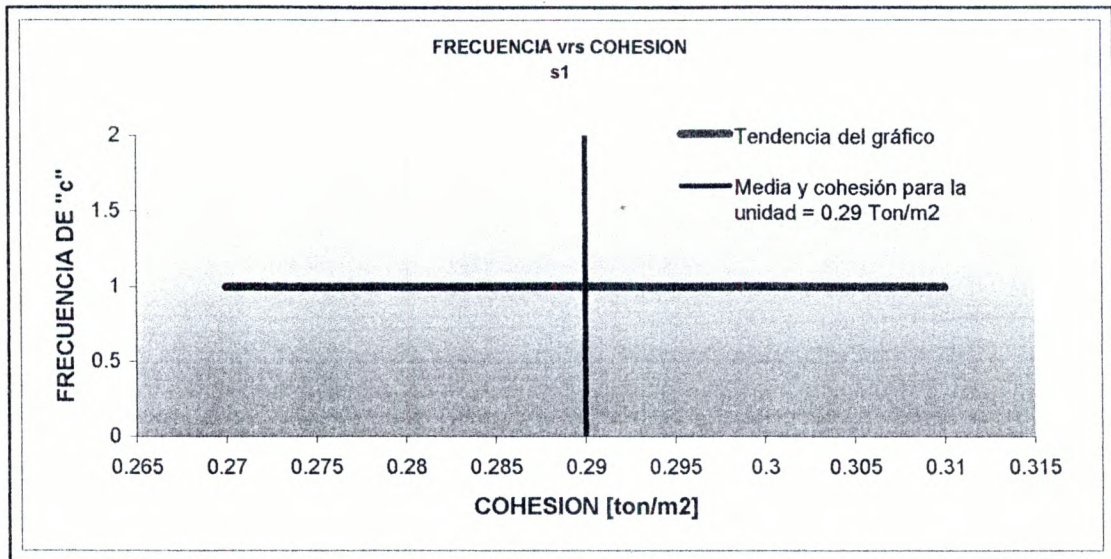


Figura 4.13. Distribución Frecuencia-Cohesión para la unidad s1. El valor promedio de la unidad es 0.29 ton/m^2 .

La figura 4.13 muestra que el número de registros no es suficiente. Para esta unidad solo se contó con dos datos de frecuencias iguales en intervalos diferentes, por lo que solo se grafica una línea recta. Se tomará el valor promedio (0.29 ton/m^2) para caracterizar geotécnicamente la unidad.

- Unidad s3'a

La distribución de frecuencias para la unidad s3'a se muestra en la figura 4.14. La desviación estándar de los datos es de 0.42 ton/m^2 y sus valores de cohesión con frecuencias pico son de 0.15 ton/m^2 y 0.68 ton/m^2 para un total de 10 datos. El valor alto de desviación estándar y la distribución de las frecuencias muestran la necesidad de contar con más datos, por lo que se tomará el centro del intervalo de frecuencias que más se repite (moda, 0.18 ton/m^2).

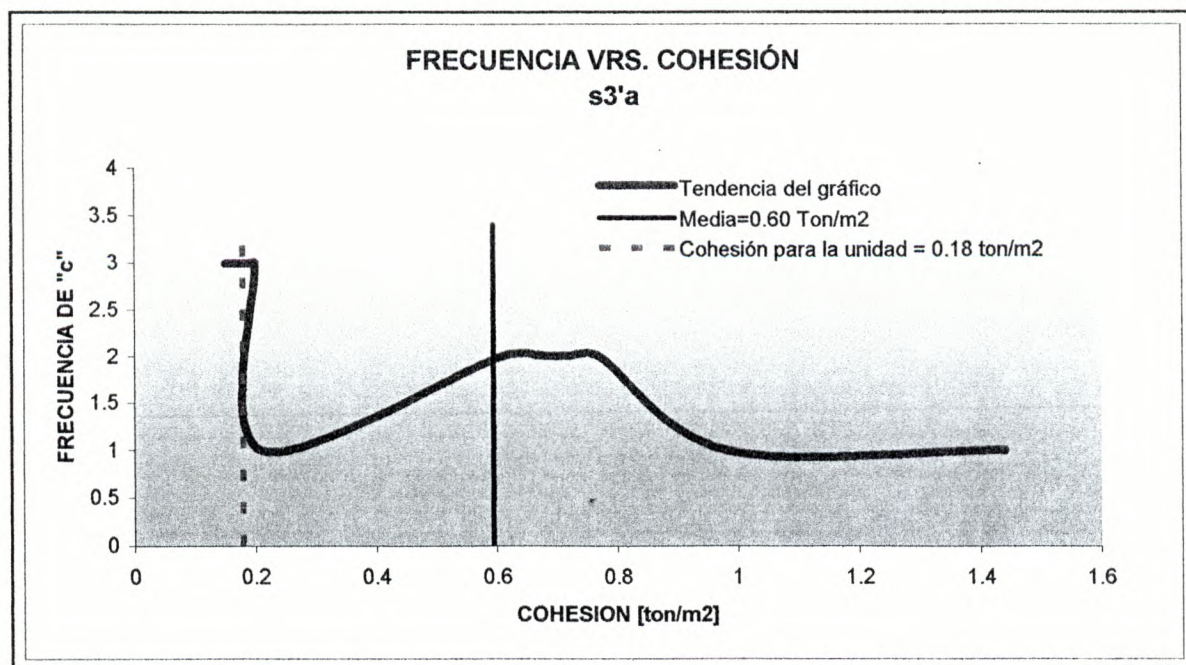


Figura 4.14. Distribución Frecuencia-Cohesión para la unidad s3'a. El valor promedio de la unidad es 0.60 ton/m².

- Unidad s4

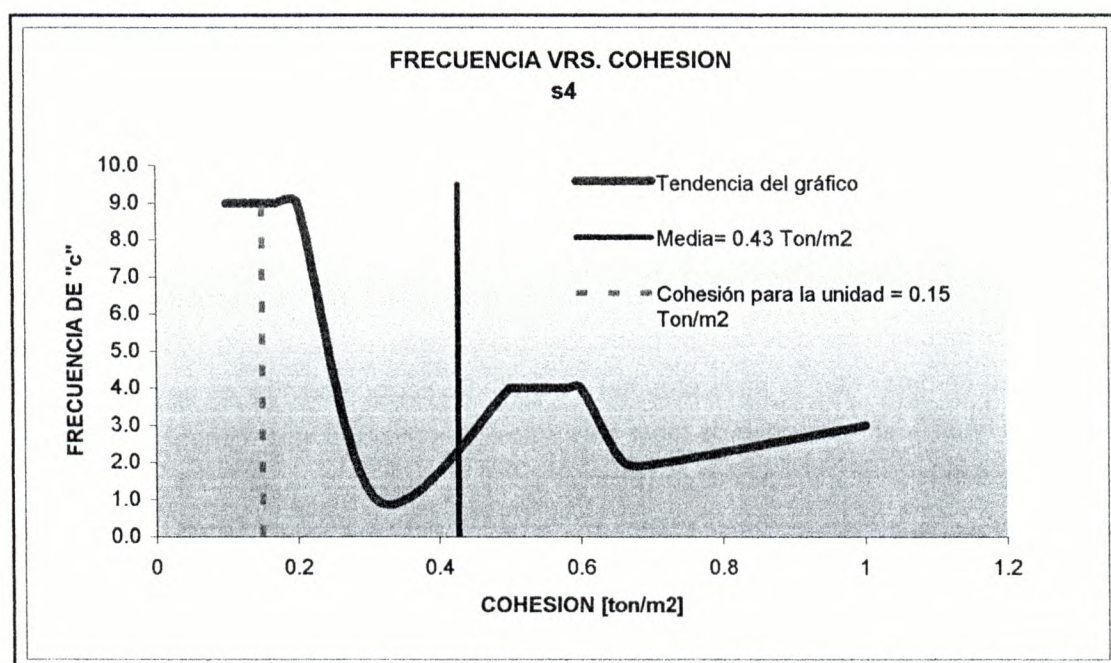


Figura 4.15. Distribución Frecuencia-Cohesión para la unidad s4. El valor promedio de la unidad es 0.43 ton/m².

Como se aprecia en la figura 4.15, la distribución de los datos muestra dos picos para un total de 19 datos. El pico con una mayor frecuencia de datos (moda) tiene un valor de cohesión de 0.15 ton/m^2 . La desviación estándar de los datos es de 0.33 ton/m^2 . La dispersión de los datos es grande y demuestra que se deberían tener más datos. Por lo que se tomará el valor central del intervalo de frecuencias que más se repite (0.15 ton/m^2).

- Unidad s5'a

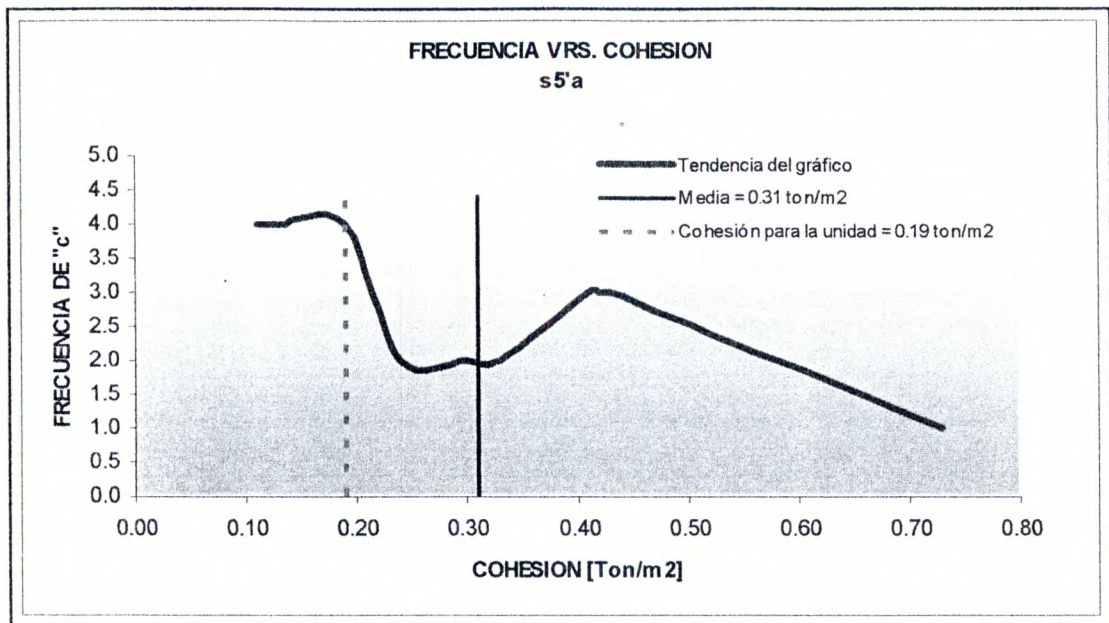


Figura 4.16. Distribución Frecuencia-Cohesión para la unidad s5'a. El valor promedio de la unidad es 0.31 ton/m^2 .

La distribución de frecuencias de esta unidad se muestra en la figura 4.16. Como puede apreciarse, el promedio de los datos no coincide con los picos, los cuales tienen un valor de 0.19 ton/m^2 y 0.42 ton/m^2 . El número de datos que se analizaron fue 11, y su desviación estándar es de 0.18 ton/m^2 . Esta distribución muestra la necesidad de tener más datos. Se tomará el valor central del intervalo de frecuencias que más se repite, es decir, 0.19 ton/m^2 .

- Unidad s5'b.

No se cuenta con datos de cohesión para esta unidad por lo que no se caracterizará con el valor de cohesión.

Valor de Peso Específico "Y".

Los datos de peso específico que se recopilaron se analizaron estadísticamente de acuerdo a la unidad geológica a la que pertenecen. El valor promedio del peso específico se ha graficado como una línea recta vertical en cada gráfico y el valor seleccionado para cada unidad, con una línea punteada vertical. La distribución de frecuencias para cada unidad se muestra en las figuras siguientes.

- Unidad b2

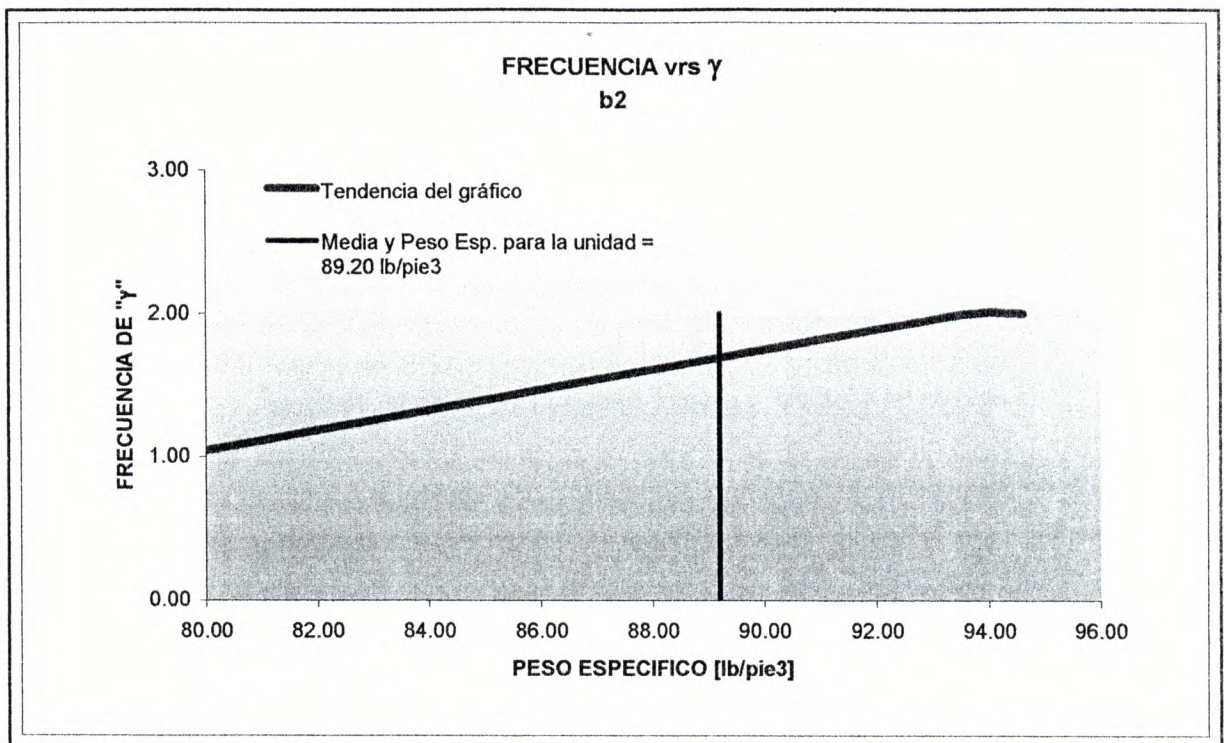


Figura 4.17. Distribución Frecuencia-Peso Específico para la unidad b2. El valor promedio de la unidad es 89.20 lb/pie³.

Para la distribución de frecuencias de la Figura 4.17, se ha tomado el promedio (89.20 lb/pie³) como valor representativo de la unidad, debido a que no presenta un comportamiento normal. En esta figura solo se contó con tres datos, dos de ellos en el mismo intervalo por lo que se grafica una línea recta inclinada.

- Unidad c3

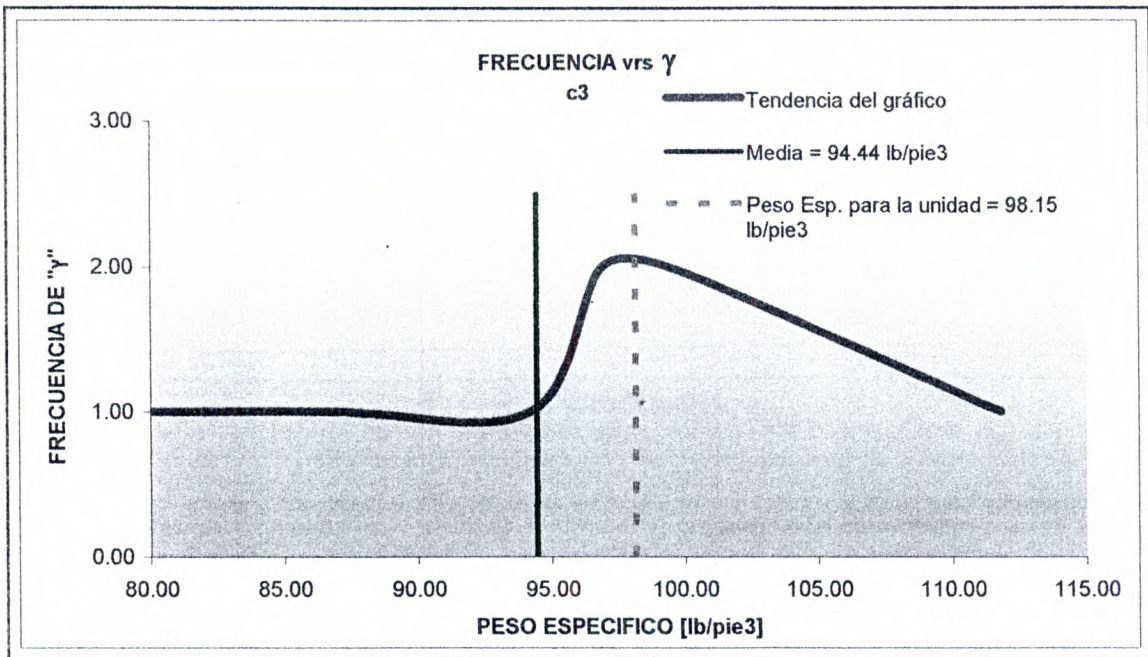


Figura 4.18. Distribución Frecuencia-Peso Específico para la unidad c3. El valor promedio de la unidad es 94.44 lb/pie³ y el valor seleccionado es de 98.15 lb/pie³.

La distribución de frecuencias de la Figura 4.18, muestra una tendencia normal. El valor promedio no es representativo por lo que se utilizará la moda, (98.15 lb/pie³) para caracterizar esta unidad.

- Unidad s1

La distribución de datos de la figura 4.19 muestra estar incompleta, debido a la falta de estudios de suelo dentro de esta unidad geológica, para esta unidad se contó con dos datos en intervalos diferentes. Se utilizará el promedio como valor representativo de esta unidad.

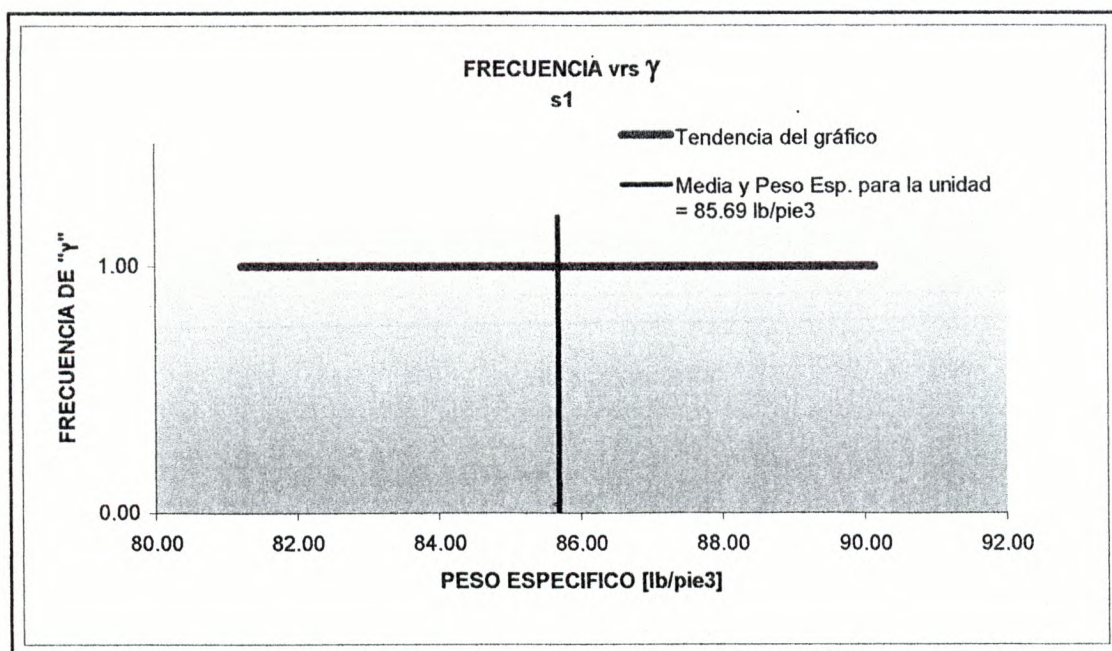


Figura 4.19. Distribución Frecuencia-Peso Específico para la unidad s1. El valor promedio de la unidad es 85.69 lb/ft³.

- Unidad s3'a

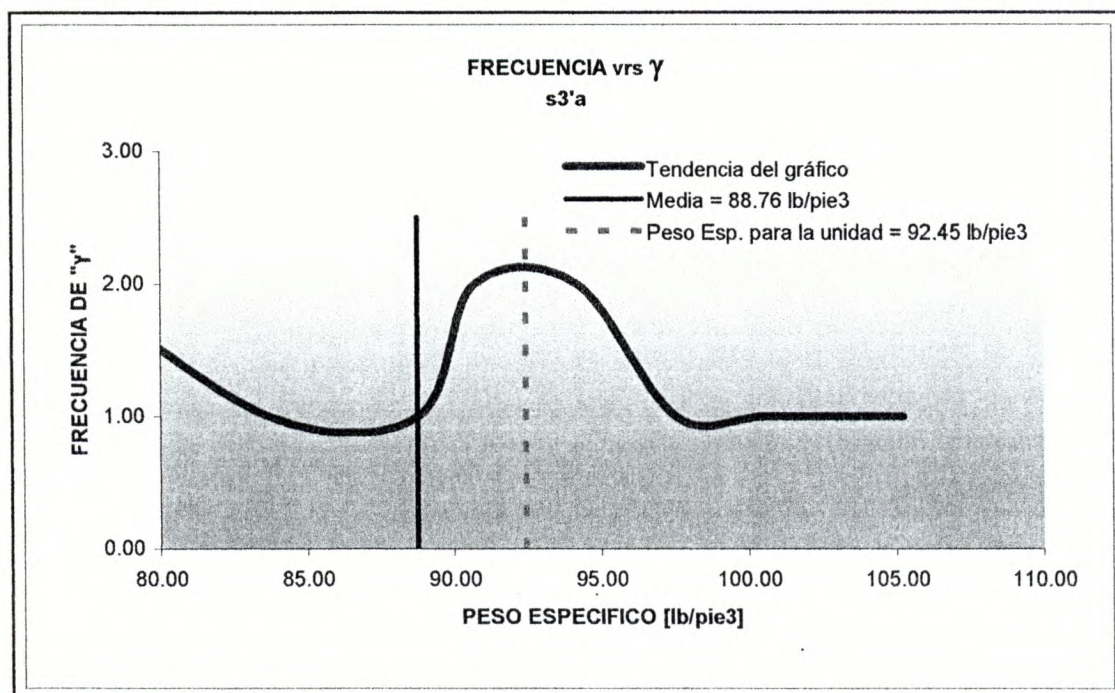


Figura 4.20. Distribución Frecuencia-Peso Específico para la unidad s3'a, el valor promedio de la unidad es 88.76 lb/ft³ y el valor seleccionado de 92.45 lb/ft³.

La distribución de frecuencias de esta unidad se muestra en la figura 4.20, en ella se observa que el valor promedio cae fuera de la cresta del gráfico, por lo que se tomará el valor central del intervalo de frecuencias que más se repite (moda, 92.45 lb/pie³) para representar a esta unidad.

- Unidad s4

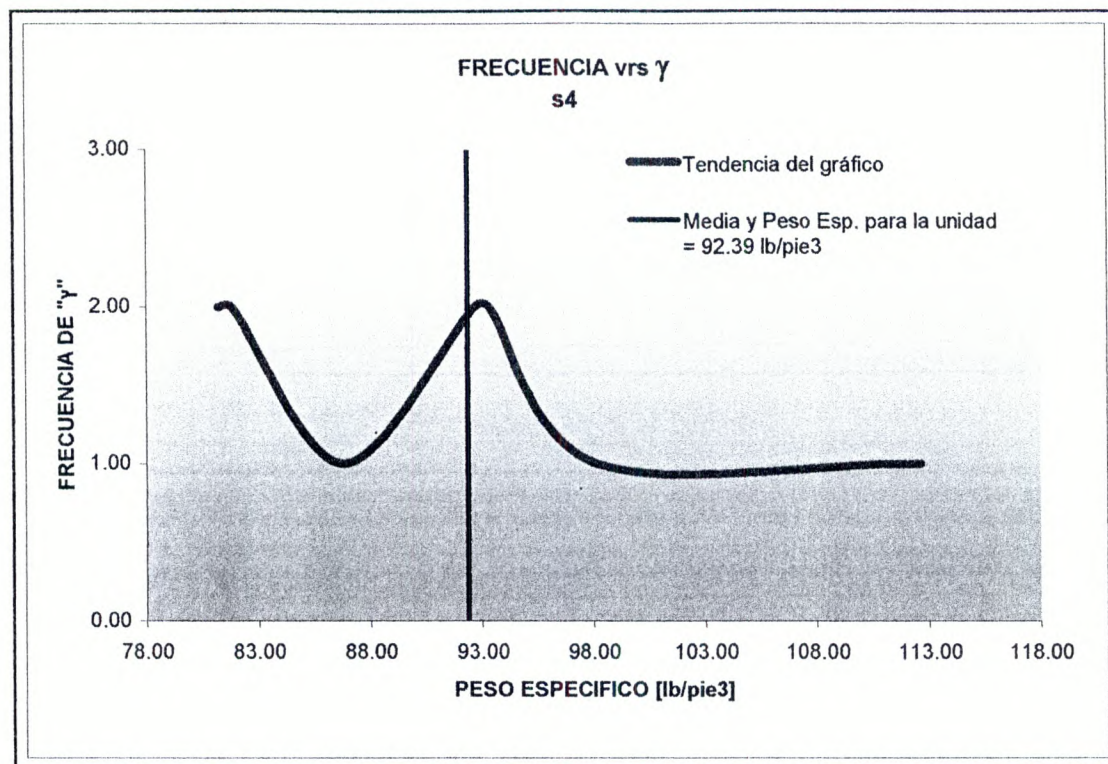


Figura 4.21. Distribución Frecuencia-Peso Específico para la unidad s4, el valor promedio de la unidad es 92.39 lb/pie³.

La distribución de frecuencias para esta unidad se observa en la figura 4.21; la distribución de frecuencias es aproximadamente normal y el valor promedio se encuentra aproximadamente al centro del intervalo de datos pico. Debido a esto se tomará el valor promedio (92.39 lb/pie³) de la serie como representativo.

- Unidad s5'a.

La distribución de frecuencias de esta unidad se presenta en la figura 4.22. La distribución muestra ser aproximadamente normal con un valor promedio cercano al centro del pico. El valor representativo que se tomará será el centro del intervalo de frecuencias que más se repite (moda, 81.84 lb/pie³).

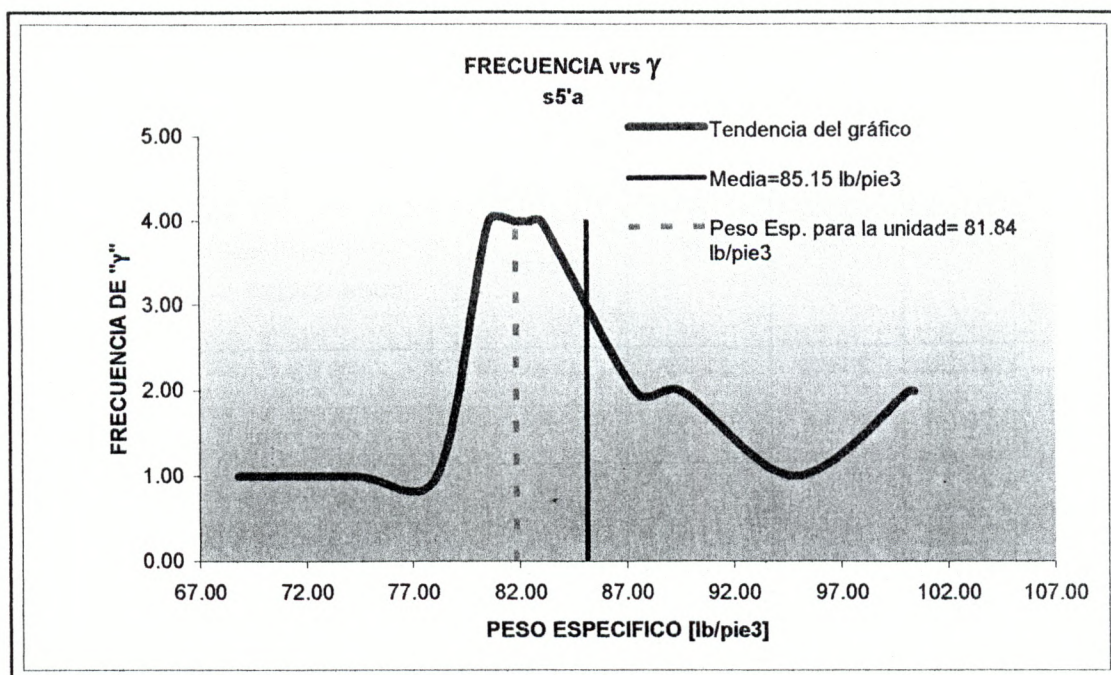


Figura 4.22. Distribución Frecuencia-Peso Específico para la unidad S5'a. El valor promedio de la unidad es 85.15 lb/pie³ y el valor seleccionado de 81.84 lb/pie³.

- Unidad s5'b.

No se cuenta con datos de peso específico para esta unidad.

En las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 se muestra un resumen del análisis estadístico efectuado anteriormente, se muestra además el valor mínimo, medio, máximo de ϕ , cohesión y peso específico para cada unidad geológica.

Unidad geológica	Ángulo de fricción (grados)					
	Min.	Medio	Máx.	No. de datos	Valor seleccionado para cada unidad	Desviación Estándar
b2	25.00	28.63	31.00	4	28.63	2.93
c3	23.20	27.57	30.00	6	27.57	2.51
s1	24.30	29.27	37.50	3	29.27	7.18
s3'a	20.50	30.81	40.00	33	29.00	4.91
s4	17.45	33.36	57.00	86	31.00	5.36
s5'a	23.60	31.23	41.50	24	31.23	4.59
s5'b	29.00	32.00	35.00	2	32.00	4.24

Tabla 4.2. Valores mínimos, medios, máximos y seleccionados para el ángulo de fricción de cada unidad geológica.

Unidad geológica	Cohesión (ton/m ²)					
	Min.	Media	Máx.	No. de datos	Valor seleccionado para cada unidad	Desviación Estándar
b2	0.10	0.18	0.26	2	0.18 = 1.766 kPa	0.11
c3	0.15	0.43	0.98	3	0.43 = 4.218 kPa	0.47
s1	0.27	0.29	0.31	2	0.29 = 2.845 kPa	0.03
s3'a	0.15	0.60	1.44	10	0.18 = 1.766 kPa	0.42
s4	0.10	0.43	1.00	16	0.15 = 1.472 kPa	0.33
s5'a	0.11	0.31	0.73	11	0.19 = 1.864 kPa	0.18
s5'b	-	-	-	-	-	-

Tabla 4.3. Valores mínimos, medios, máximos y seleccionados para la cohesión de cada unidad geológica.

Unidad geológica	Peso Específico (lb/pe ³)					
	Mín.	Media	Máx.	No. de datos	Valor seleccionado para cada unidad	Desviación Estándar
b2	79.36	89.2	94.61	3	89.20 $-14. \frac{KN}{m^3}$	8.53
c3	77.5	94.44	111.79	6	98.15 -15.4	11.64
s1	81.22	85.69	90.15	2	85.69 -13.5	6.31
s3'a	74.4	88.76	105.21	10	92.45 -14.5	10.88
s4	81.22	92.39	112.65	7	92.39 -14.5	10.89
s5'a	68.82	85.15	100.44	12	81.84 -12.9	9.79
s5'b	-	-	-	-	-	-

Tabla 4.4. Valores mínimos, medios, máximos y seleccionados para el peso específico de cada unidad geológica.

4.4 Elaboración del mapa con la caracterización geotécnica del área de estudio.

Utilizando herramientas de SIG se elaboraron los mapas de caracterización geotécnica para cada unidad geológica de acuerdo a los valores de las propiedades geotécnicas seleccionados en el apartado 4.3.

4.4.1. Caracterización geotécnica con el valor de ϕ .

Con el objeto de observar la variación del ángulo de fricción interna para cada unidad, se retomó de la tabla 4.2 el valor de ϕ mínimo, medio y máximo para cada unidad geología y se graficaron. Los resultados se muestran en las figuras 4.23, 4.24 y 4.25.

Se elaboró además la caracterización de ϕ para cada unidad geológica tomando los valores seleccionados. Esta caracterización se muestra en la figura 4.26.

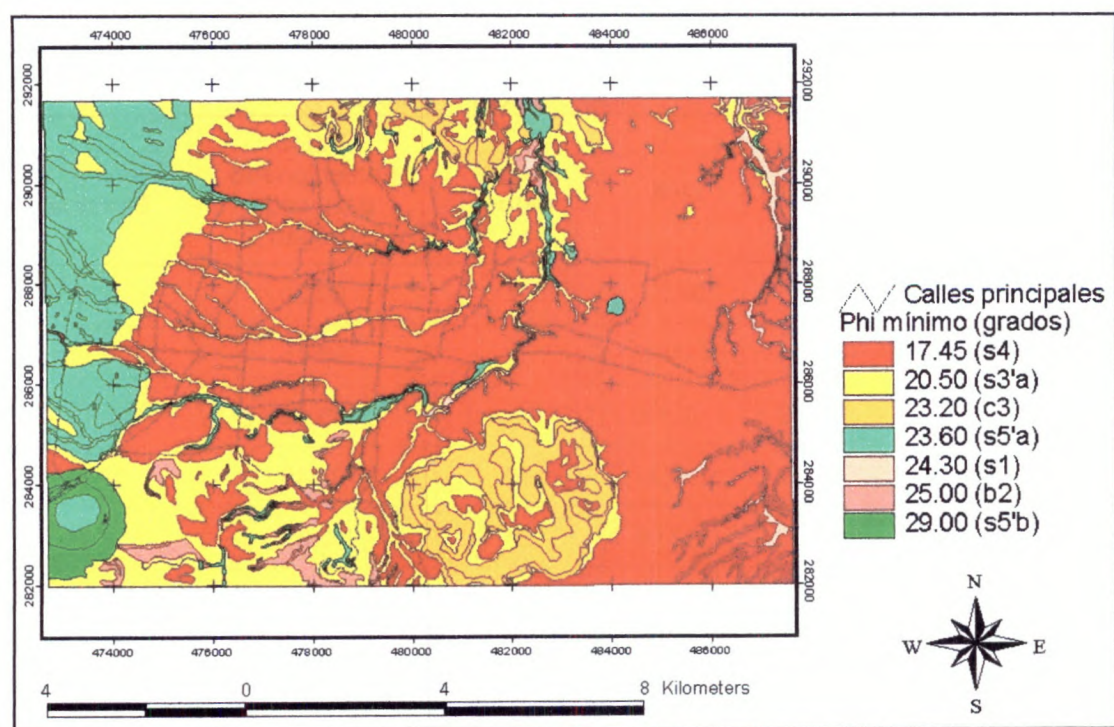


Figura 4.23. Caracterización geotécnica con el valor de ϕ mínimo de cada unidad geológica para el Área de estudio. Ángulo de fricción (ϕ) en grados ($^{\circ}$).

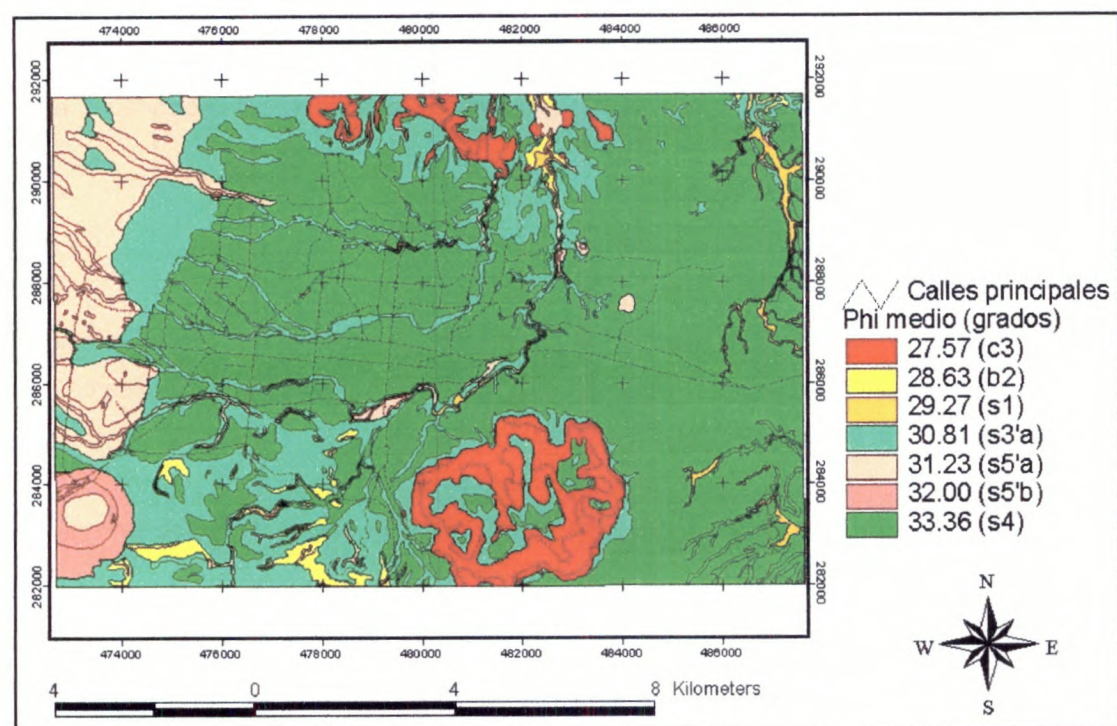


Figura 4.24. Caracterización geotécnica con el valor de ϕ medio de cada unidad geológica para el Área de estudio. Ángulo de fricción (ϕ) en grados ($^{\circ}$).

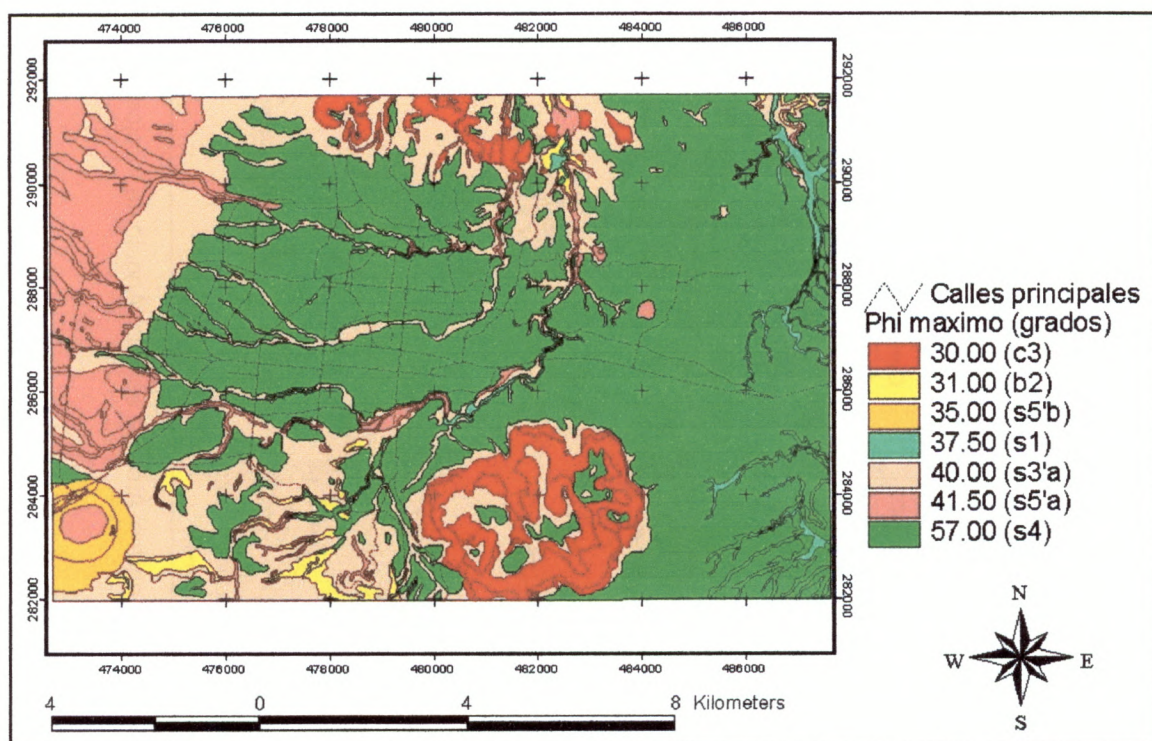


Figura 4.25. Caracterización geotécnica con el valor de ϕ máximo de cada unidad geológica para el Área de estudio. Ángulo de fricción (ϕ) en grados ($^{\circ}$).

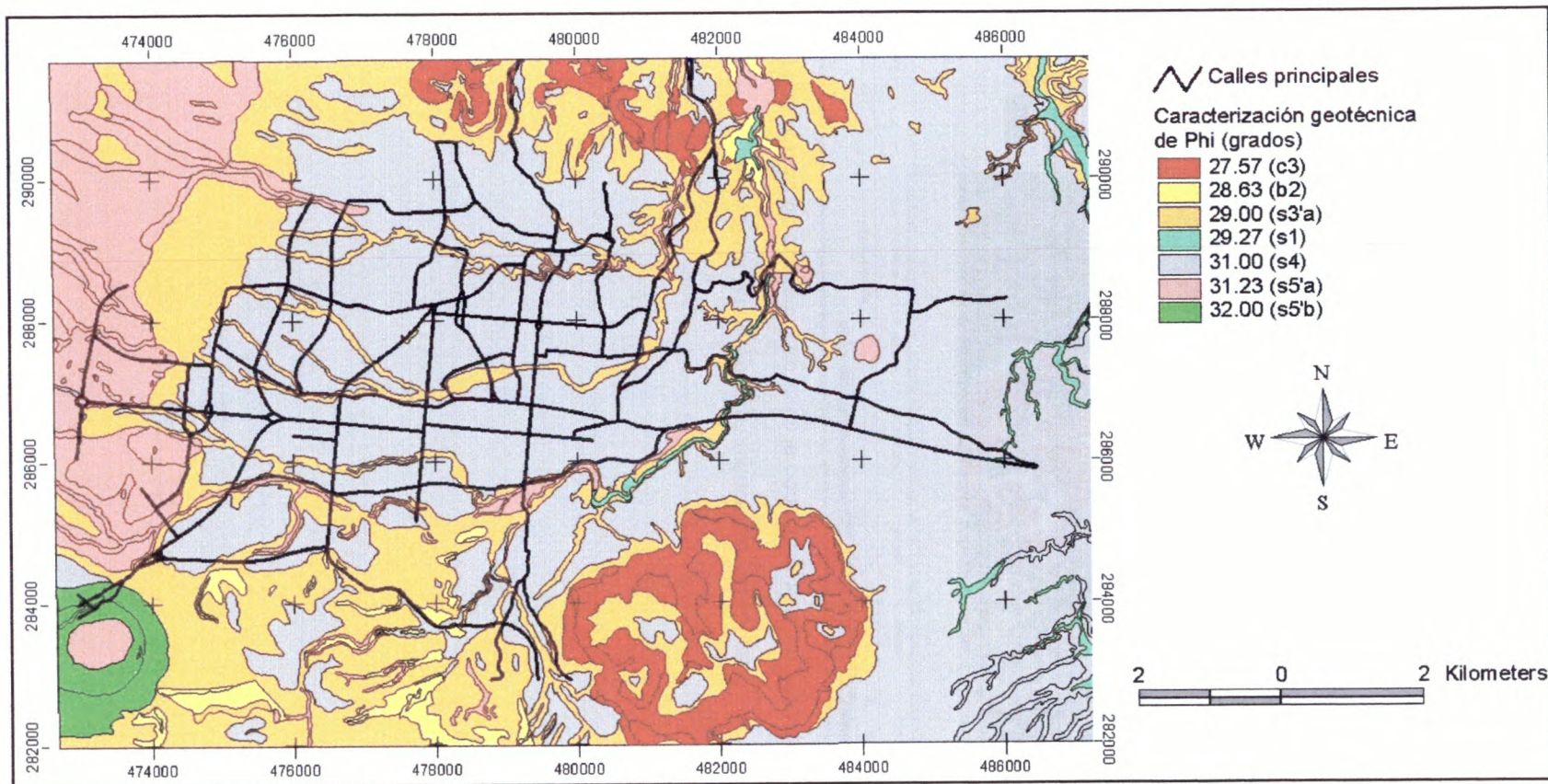


Figura 4.26. Caracterización geotécnica con el valor de ϕ de cada unidad geológica para el Área de estudio. Ángulo de fricción (ϕ) en grados ($^{\circ}$).

4.4.2. Caracterización geotécnica con el valor de cohesión.

Se graficó la variación de la cohesión para cada unidad geológica, con el objeto de observar su variación. De la tabla 4.3 se retomaron los valores de cohesión mínima, medio y máxima, estos valores se graficaron y pueden interpretarse visualmente en los mapas de las figuras 4.27, 4.28 y 4.29.

A cada unidad se le asignó un valor de cohesión para caracterizarla, el valor se muestra en la tabla 4.3; y el mapa para esta caracterización se muestra en la figura 4.30.

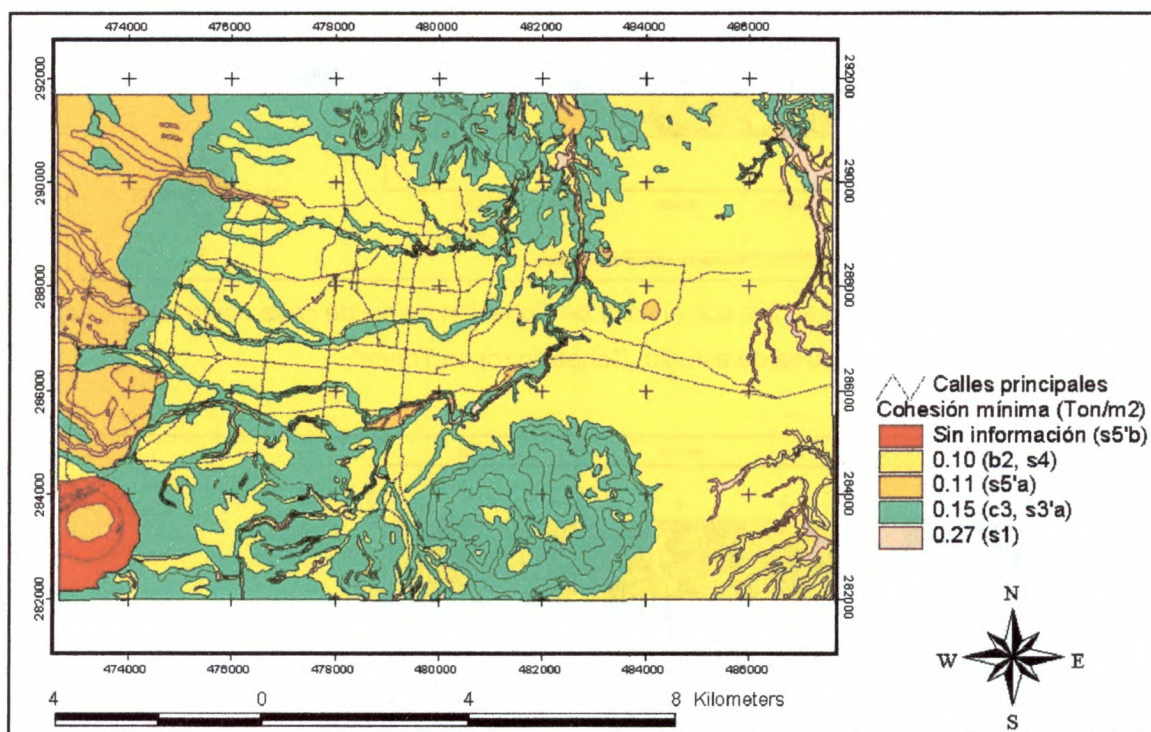


Figura 4.27. Caracterización geotécnica con el valor de Cohesión mínima de cada unidad geológica para el Área de estudio. Cohesión (c) en Ton/m².

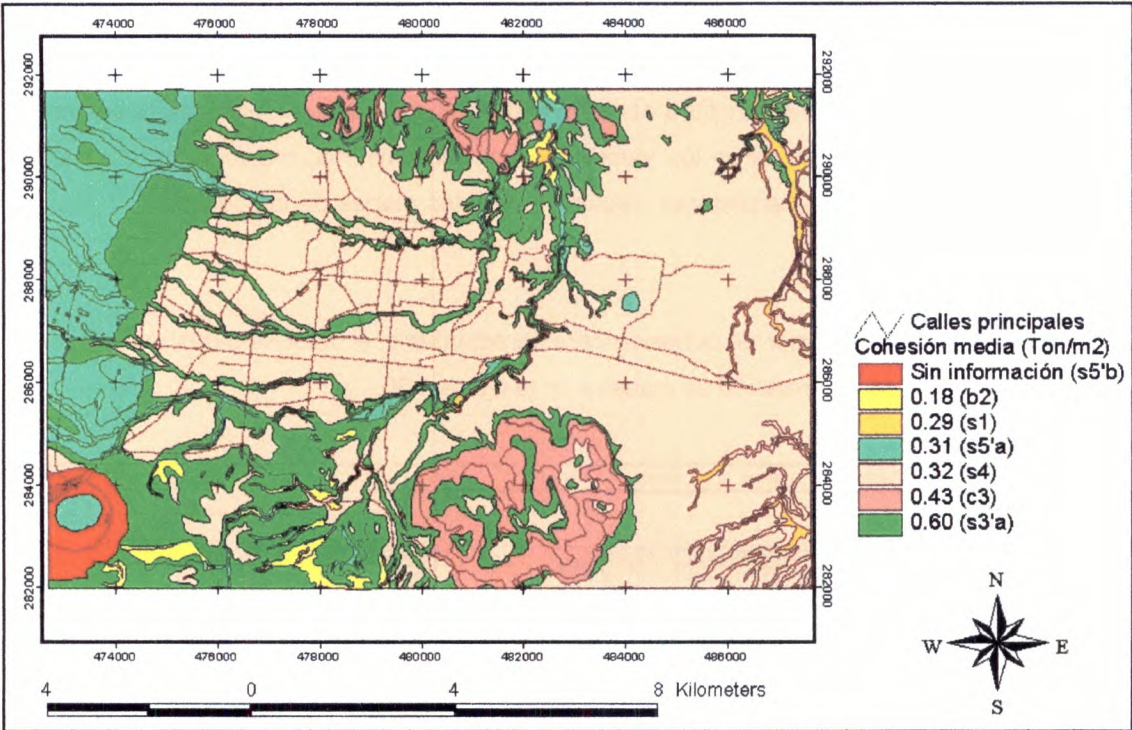


Figura 4.28. Caracterización geotécnica con el valor de Cohesión media de cada unidad geológica para el Área de estudio. Cohesión (c) en Ton/m².

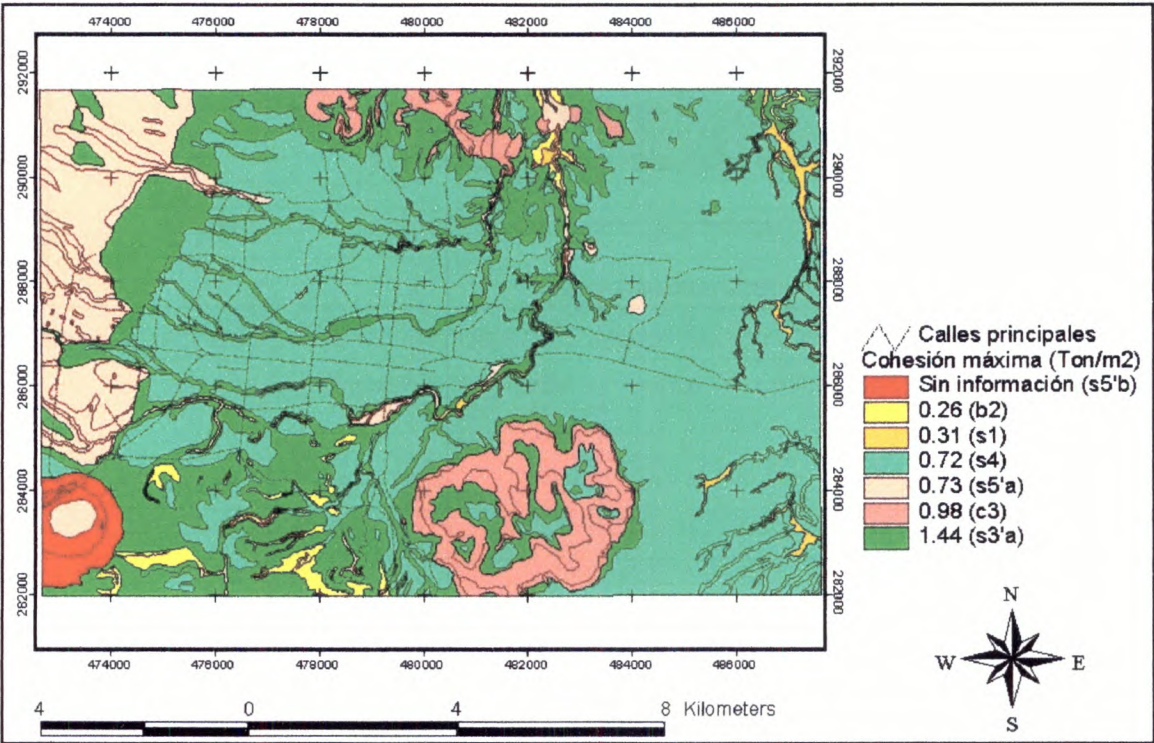


Figura 4.29. Caracterización geotécnica con el valor de Cohesión máxima de cada unidad geológica para el Área de estudio. Cohesión (c) en Ton/m².

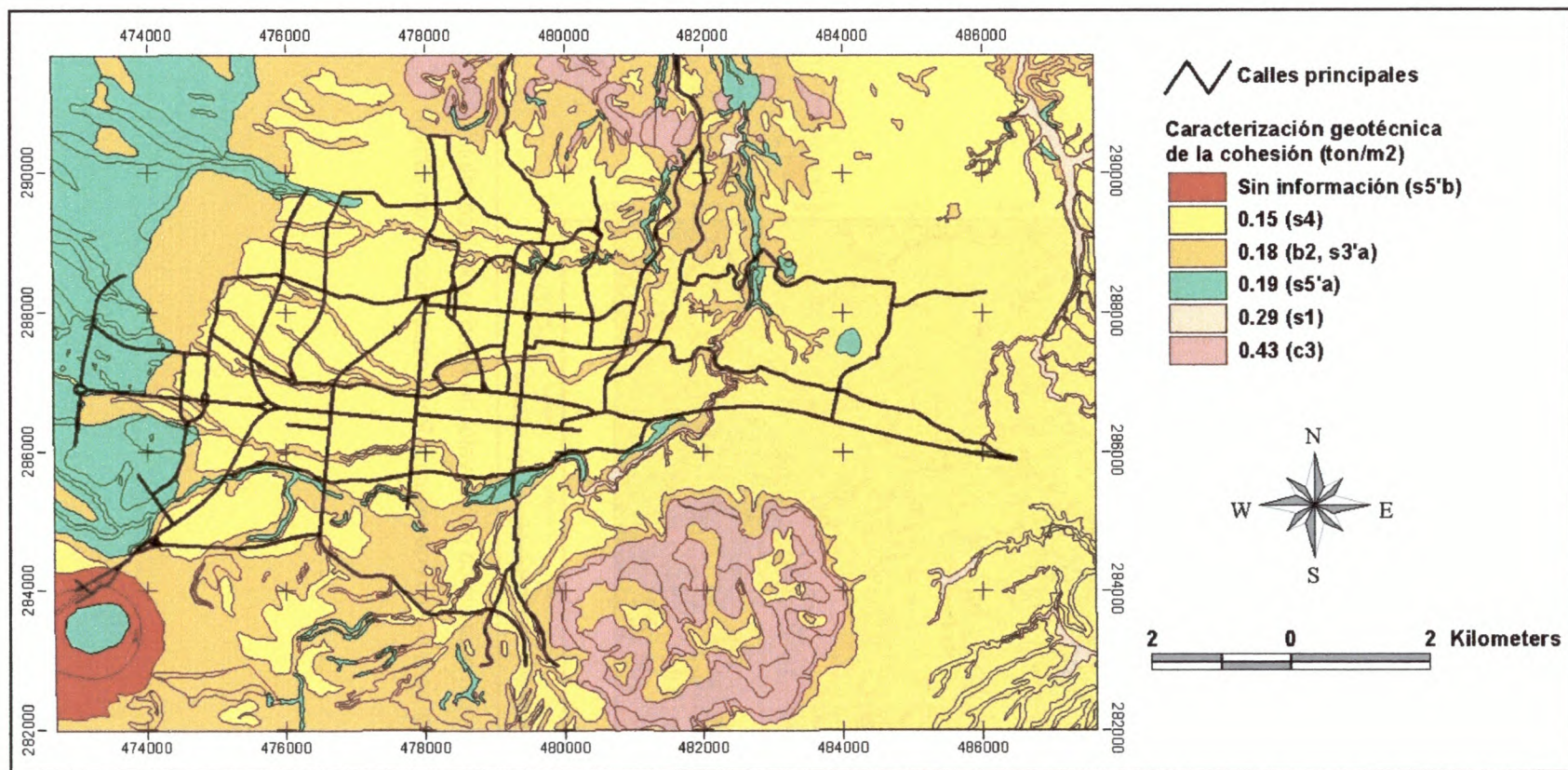


Figura 4.30. Caracterización geotécnica con el valor de Cohesión de cada unidad geológica para el Área de estudio. Cohesión (c) en Ton/m².

4.4.3. Caracterización geotécnica con el valor de peso específico.

Con el objeto de observar la variación del valor del peso específico en cada unidad geológica, se retomó el valor de peso específico mínimo, medio y máximo de la tabla 4.4, estos valores pueden interpretarse visualmente en los mapas de las figuras 4.31, 4.32 y 4.33.

Cada unidad fue caracterizada con un valor de Peso específico de acuerdo a la tabla 4.4; el mapa de la caracterización se muestra en la figura 4.34.

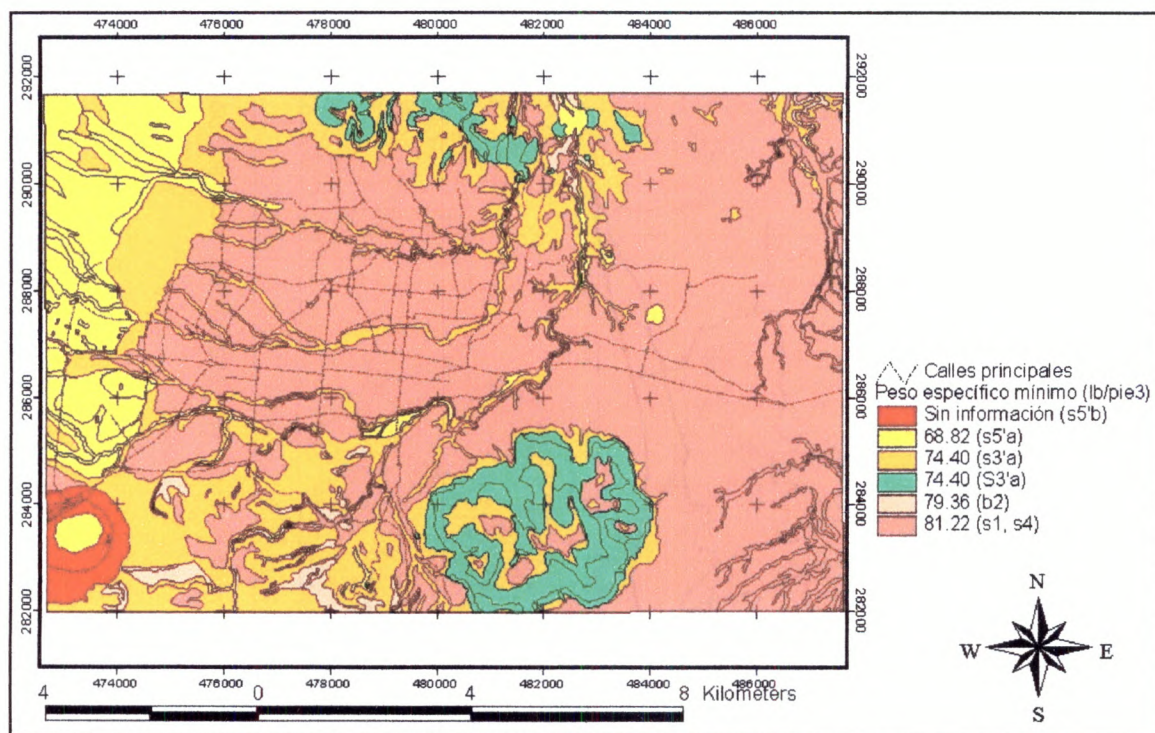


Figura 4.31. Caracterización geotécnica con el valor de Peso específico mínimo de cada unidad geológica para el Área de estudio. Peso específico (γ) en lb/pie³.

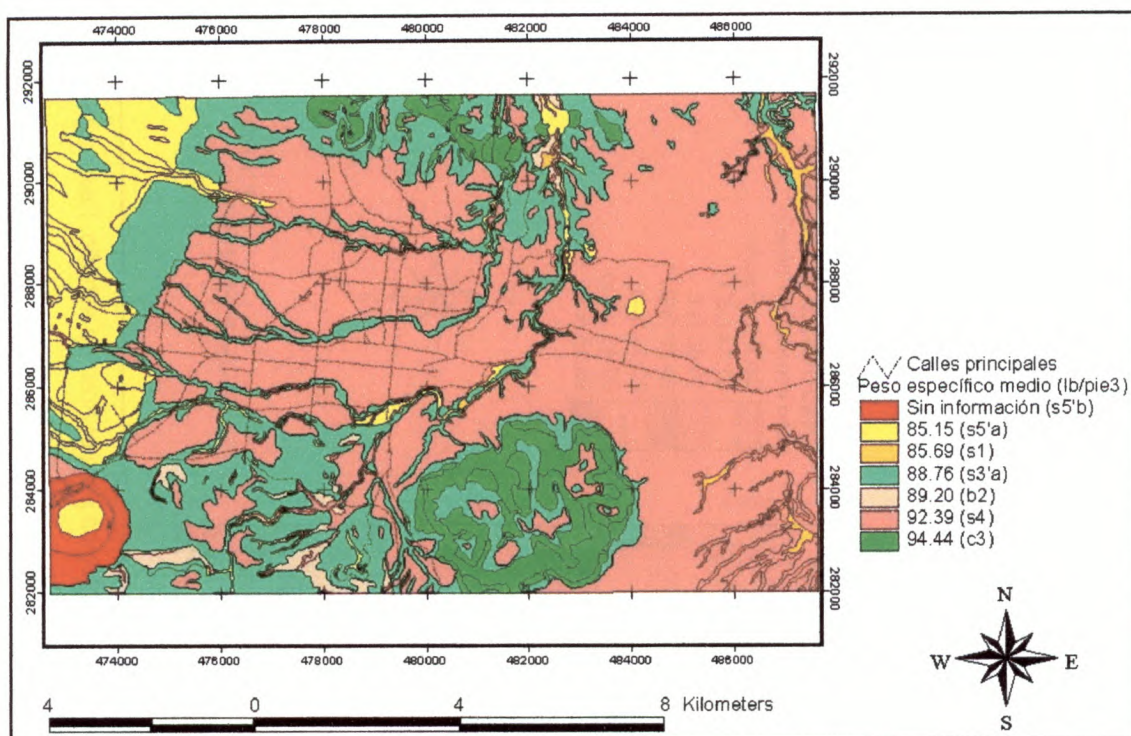


Figura 4.32. Caracterización geotécnica con el valor de Peso específico medio de cada unidad geológica para el Área de estudio. Peso específico (γ) en lb/ft³.

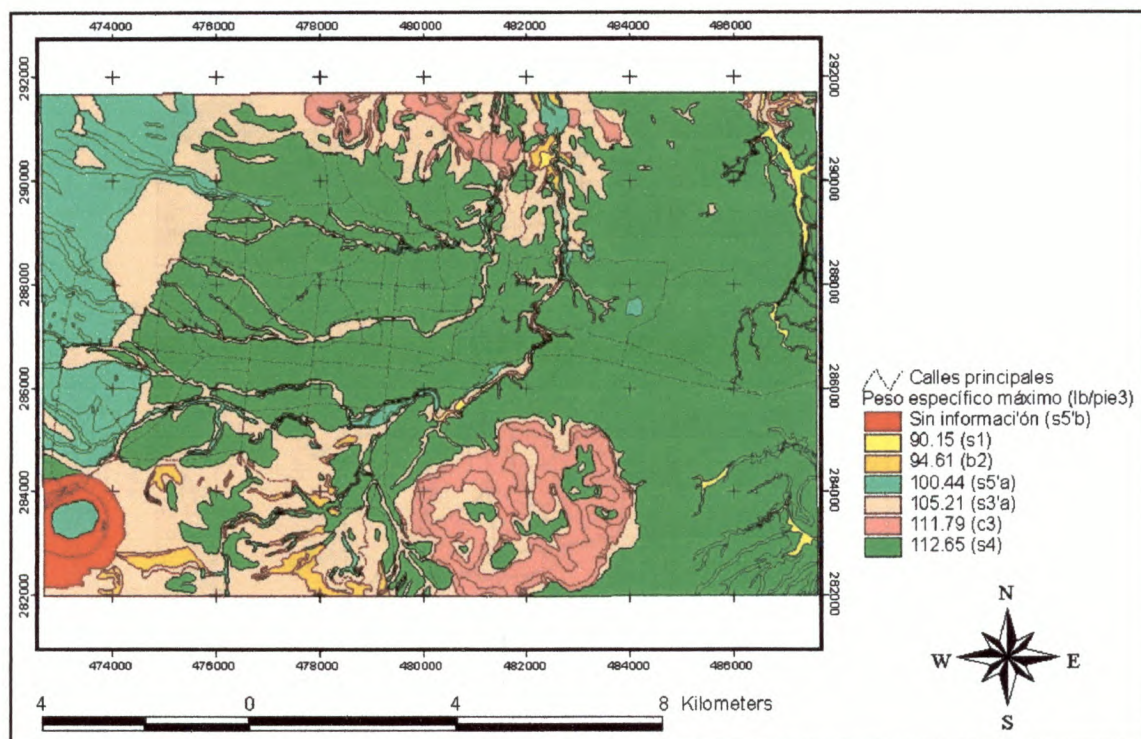


Figura 4.33. Caracterización geotécnica con el valor de Peso específico máximo de cada unidad geológica para el Área de estudio. Peso específico (γ) en lb/ft³.

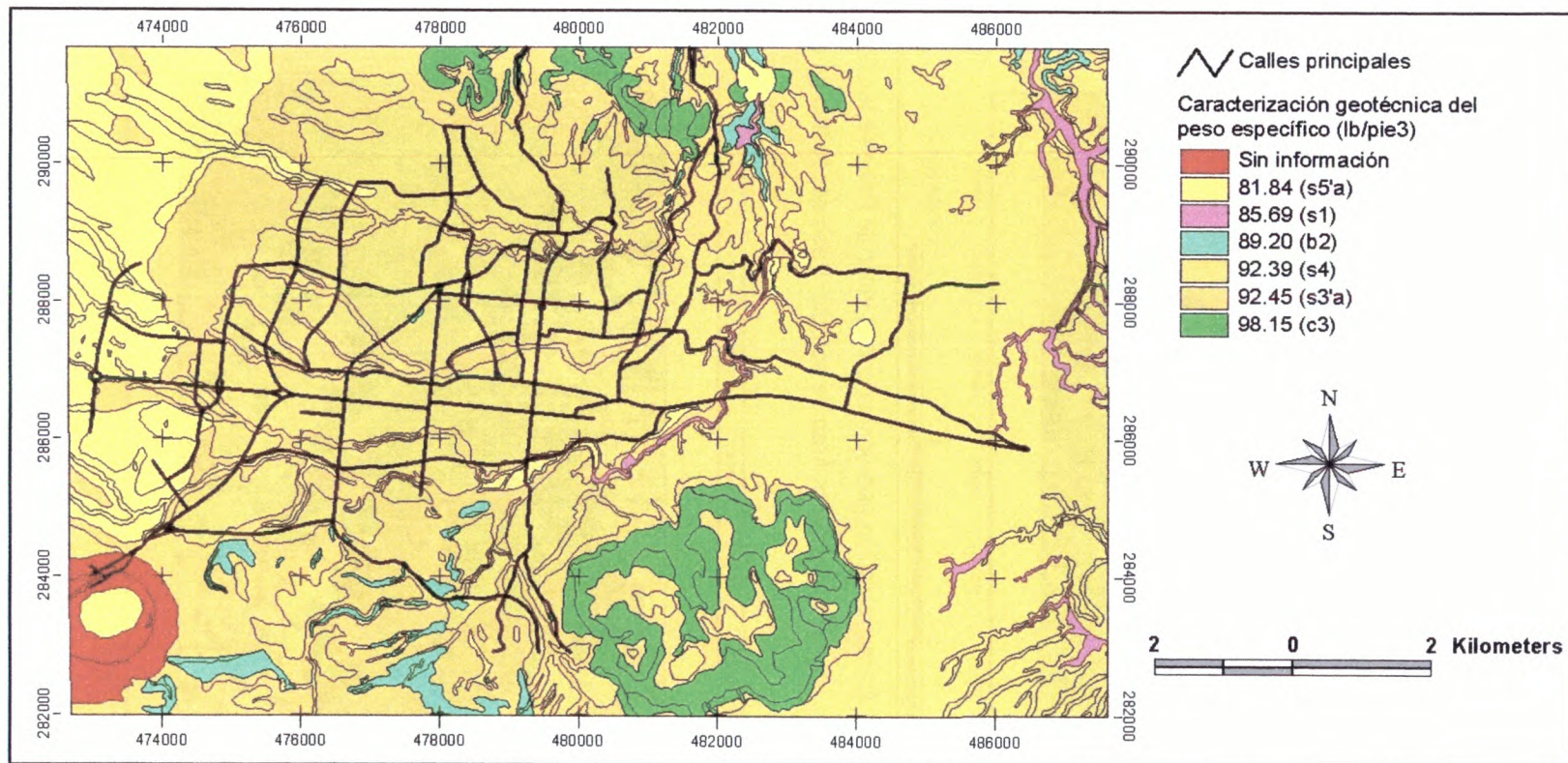


Figura 4.34. Caracterización geotécnica con el valor de Peso específico de cada unidad geológica para el Área de estudio. Peso específico (γ) en lb/ft³

En los mapas de valores máximos (figuras 4.25, 4.29 y 4.33) se observa según la intensidad de los colores que la unidad s4 posee el valor mayor de ángulo de fricción (57°) y peso específico (112.65 lb/ pie^3), mientras que posee el segundo valor más grande de cohesión (1.00 ton/m^2). Además, el menor valor de los mínimos de ángulo de fricción (17.45°) y cohesión (0.10 ton/m^2) también corresponden a esta unidad. Esto muestra que la dispersión de datos para esta unidad es muy grande debido a la gran cantidad de datos (86) y puede verse reflejado en los valores de la desviación estándar del ángulo de fricción (5.36°), cohesión (0.33 ton/m^2) y peso específico (10.89 lb/ pie^3).

4.5. Discusión de los mapas.

4.5.1. Deslizamientos ocurridos dentro de las unidades geológicas del área de estudio.

En la tabla 4.5 se presentan los deslizamientos ocurridos hasta el 2001 correspondientes a la unidad geológica en que ocurrieron.

UNIDAD GEOLOGICA	DESLIZAMIENTOS OCURRIDOS	PORCENTAJE DE DESLIZAMIENTOS RESPECTO AL TOTAL
b2	6	3.47%
c3	12	6.94%
s1	4	2.31%
s3'a	66	38.15%
s4	72	41.62%
s5'a	13	7.51%
	173	100.00%

Tabla 4.5. Deslizamientos para el área de estudio debido a sismo y lluvia recopilados por Rymer (1987), MARN y FAES. [Brizuela, B. y Menjívar, L., 2002].

De la tabla 4.5 se graficaron los porcentajes de deslizamientos según cada unidad, ver la figura 4.35; puede observarse que la unidad s4 es la que ha sufrido más deslizamientos.

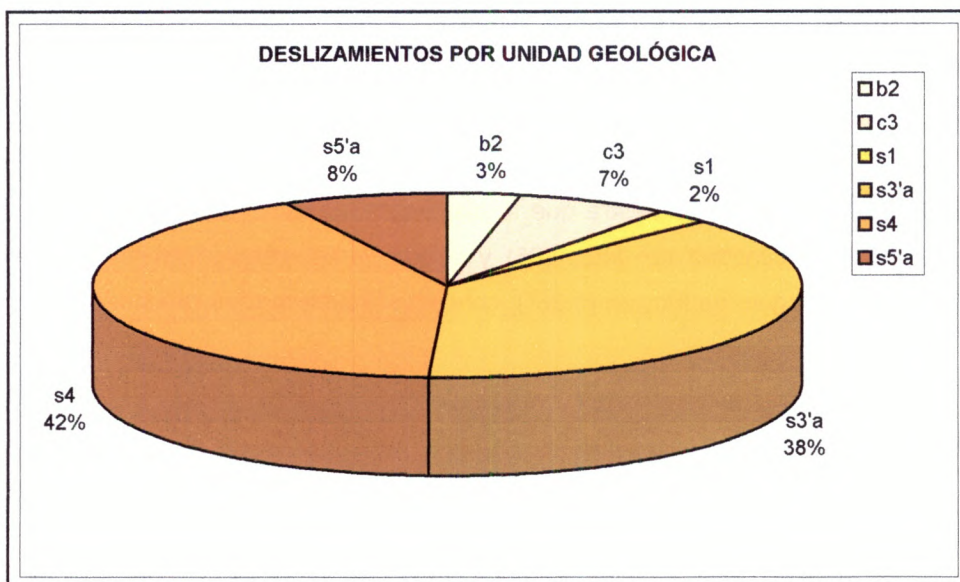


Figura 4.35. Porcentajes de deslizamientos ocurridos hasta el 2001 para cada unidad geológica del área de estudio.

4.5.2. Relación entre los deslizamientos ocurridos y la caracterización geotécnica del área de estudio.

En la figura 4.36 se muestran los puntos donde ocurrieron deslizamientos dentro del mapa de caracterización de la cohesión para el área de estudio generado en el apartado 4.4.

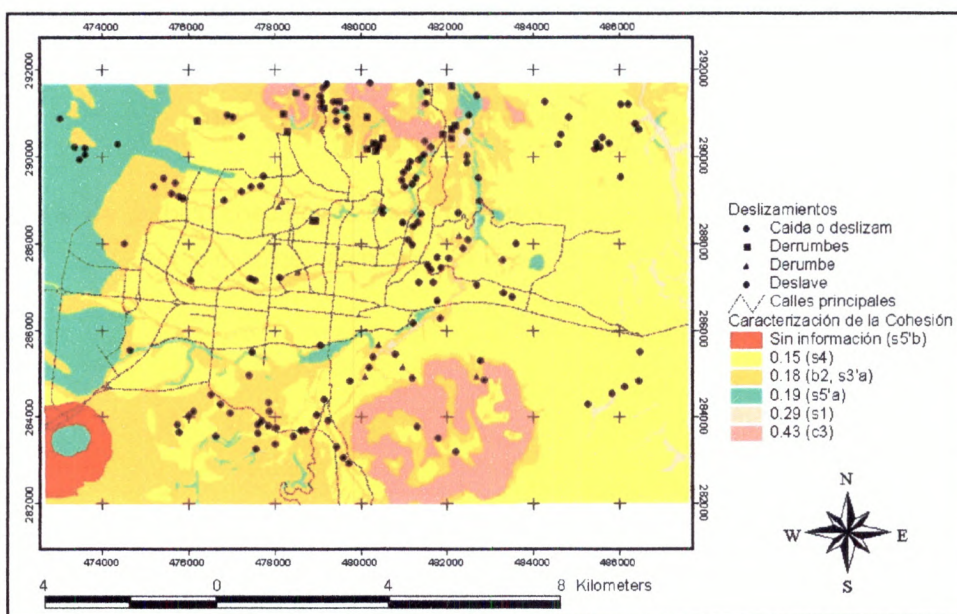


Figura 4.36. Ubicación de los deslizamientos dentro de cada unidad geológica caracterizada con el valor de cohesión seleccionado para el Área de estudio.

De acuerdo a la figura 4.37, la unidad s1 ha presentado la menor cantidad de deslizamientos hasta el 2001 y el valor de cohesión seleccionado para esta unidad es el segundo más alto dentro del área de estudio, aunque al analizar la caracterización de cohesión para esta unidad, se observa que el valor representativo ha sido tomado de un número mínimo de dos datos, por lo que no se puede establecer una relación confiable entre el número de deslizamientos y el valor de cohesión asignado. Para la unidad s4 se observa que el valor de cohesión es el menor de todas las unidades, y la cantidad de deslizamientos ocurridos es mayor que para el resto de las unidades, esto probablemente debido a que el área de la unidad s4 es la más grande de la zona de estudio por lo que pudieron presentarse más deslizamientos. Para el resto de las unidades no se observa ninguna relación entre ambos valores.

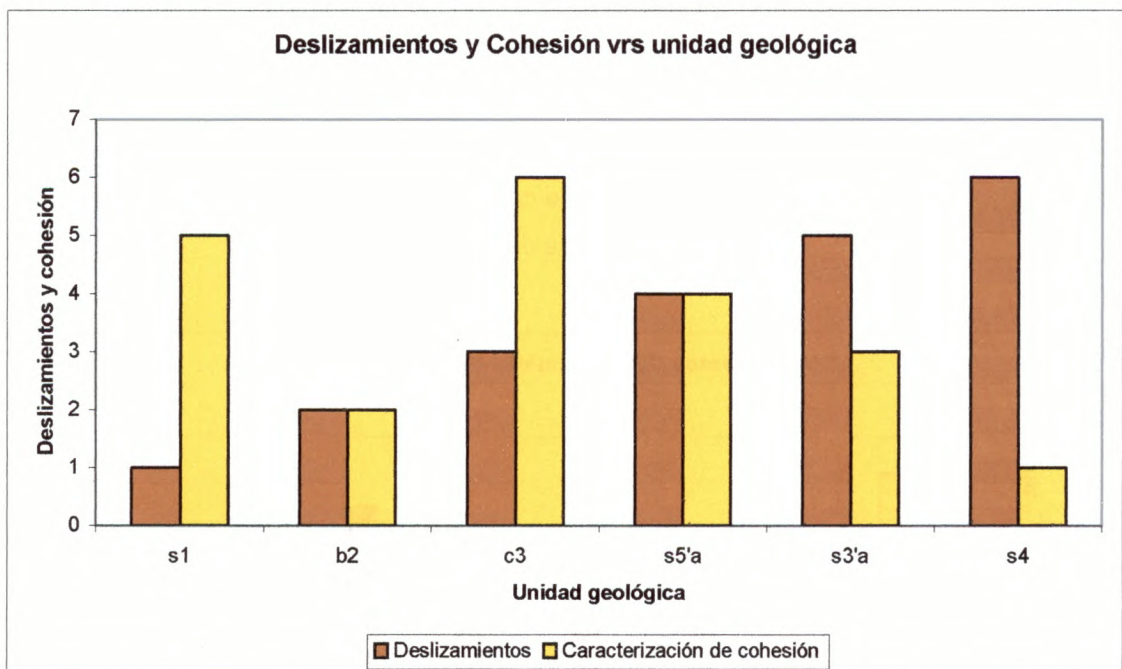


Figura 4.37. Comparación relativa de deslizamientos y cohesión vrs unidad geológica.

En la figura 4.38 se muestra la ubicación de los deslizamientos ocurridos hasta el 2001 dentro del mapa de caracterización de ϕ para el área de estudio generado en el apartado 4.4.

De acuerdo a la figura 4.39 la única relación establecida es en la unidad s5'b, donde posee el menor número de deslizamientos y el mayor valor de ángulo de fricción interna, este análisis sin tomar en cuenta la pequeña cantidad (2) de registros recopilados (en comparación con las demás unidades) para realizar la caracterización de esta unidad; para el resto de las unidades geológicas no se observa ninguna relación entre el número de deslizamientos ocurridos y el valor de ϕ .

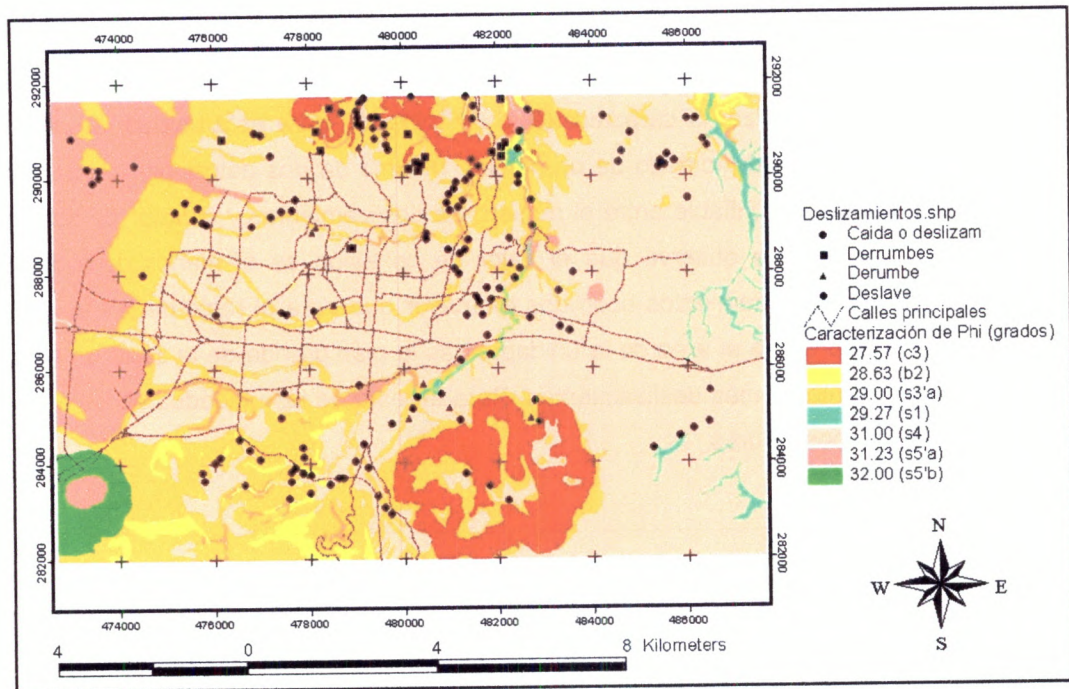


Figura 4.38. Ubicación de los deslizamientos dentro de cada unidad geológica caracterizada con el valor de ϕ para el Área de estudio.

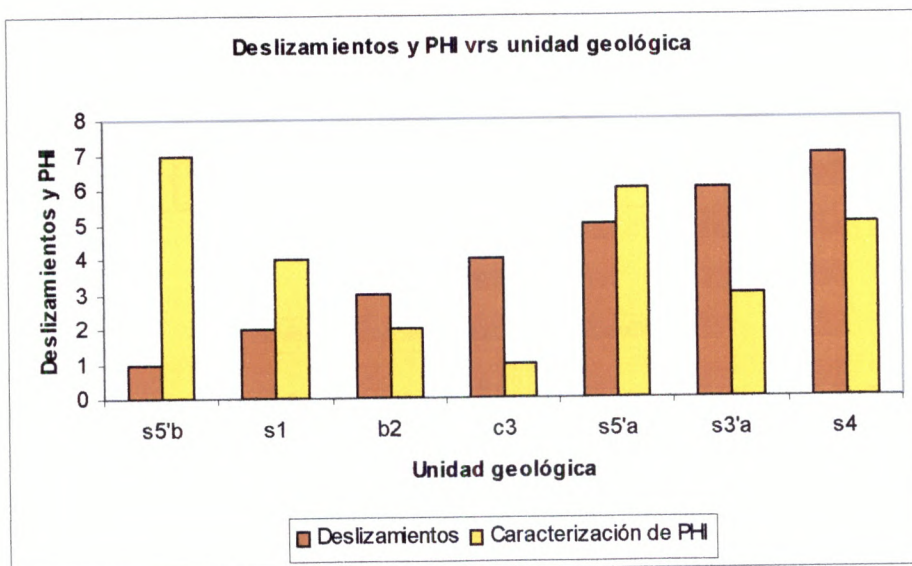


Figura 4.39. Comparación relativa de deslizamientos y ϕ vs unidad geológica.

La figura 4.40 muestra la ubicación de los deslizamientos ocurridos hasta el 2001 dentro del mapa de la caracterización del peso específico para el área de estudio generado en el apartado 4.4.

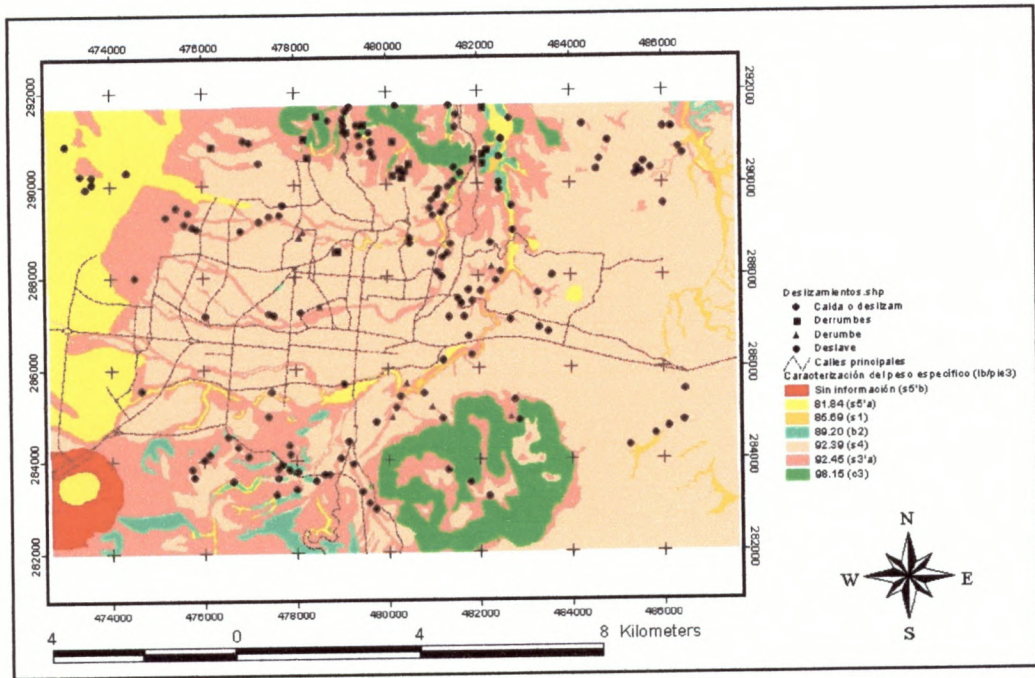


Figura 4.40. Ubicación de los deslizamientos dentro de cada unidad geológica caracterizada con el valor del peso específico para el Área de estudio.

Se observa en la figura 4.41 que no existe relación entre los deslizamientos ocurridos hasta el 2001 y el peso específico, esto debido a los pocos registros recopilados para cada unidad y a la alta desviación estándar obtenida.

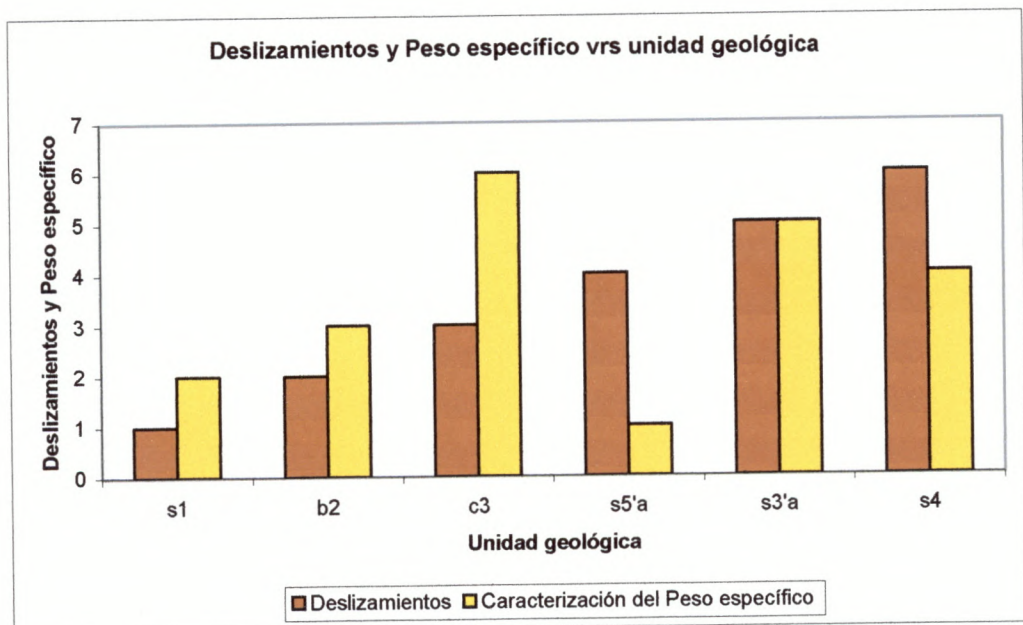


Figura 4.41. Comparación relativa de deslizamientos y peso específico vrs unidad geológica.