

## INTRODUCCIÓN

El presente documento es un estudio que tiene como principal finalidad evaluar la amenaza geomorfológica aunada a otros factores, de manera tal que se pueda estimar el riesgo natural a movimientos de remoción en masa latentes, tras el análisis e interrelación de las variables físicas que se consideren necesarias para, de esta forma, poder obtener el grado relativo de estabilidad de los terrenos que existen en el Distrito Metropolitano de Caracas.

Hoy en día no se tiene conocimiento acerca de un estudio de riesgo geológico actualizado en el Distrito Metropolitano de Caracas, y tal desinformación, unida a factores como el sobrecrecimiento urbano, factores geológicos y factores geomorfológicos generan una problemática, la cual es planteada en el primer capítulo de este trabajo. Junto a este planteamiento del problema se mencionan los objetivos a cumplirse con la realización de este estudio, siendo estos objetivos: la actualización de la base de datos sobre los estudios de orientación geotécnica en el Distrito Metropolitano de Caracas y la generación de un mapa de orientación geotécnica de la región de Caracas, el cual contenga un diagnóstico general del riesgo geotécnico existente. En dicho primer capítulo se menciona el alcance de esta investigación, que es proporcionar una herramienta para el diagnóstico preliminar de la realización de un proyecto, o para determinar necesario un estudio de mayor detalle, desde un punto de vista ingenieril y teniendo en cuenta lo ambiciosa que es esta investigación, debido a la proporción del área estudiada. Como parte final del capítulo en cuestión se especifica la ubicación de la región de estudio, la cual corresponde al sector central del Distrito Metropolitano de Caracas, abarcando un área de 160 Km<sup>2</sup>.

Para llevar a cabo esta investigación se requirió la recopilación de algunas características generales de la región de estudio, las cuales son plasmadas en el segundo capítulo de este trabajo. En primer lugar se mencionan las características fisiográficas

del Distrito Metropolitano de Caracas, ya que la ciudad está enmarcada totalmente dentro de un valle del sistema de la Cordillera de la Costa venezolana, separada del litoral central, a unos 15 Km. medidos en línea recta, por el Parque Nacional El Ávila que forma parte de la Cordillera de la Costa. El valle es relativamente pequeño y bastante irregular, cuya altitud respecto al nivel del mar varía de un punto a otro de la ciudad entre los 870 y los 1.043 m, con 900 m en su centro histórico. Esto, y su rápido crecimiento poblacional, han influido notablemente en el desarrollo urbano de la ciudad. El punto más elevado del Distrito Capital, donde se encuentra ubicada la ciudad, es el Pico del Ávila, con 2159 msnm. En este capítulo se menciona también la vegetación y el clima de la región de estudio, comprende una vegetación variada que principalmente es bosque xerofítico, el bosque tropófilo, la sabana montana, la Selva Nublada y el Matorral Andino, y el clima de Caracas es de tipo intertropical de montaña con precipitaciones que varían entre los 900 y 1300 Mm. Anuales. En este capítulo se mencionan las características geológicas principales del Distrito Metropolitano de Caracas, litológicamente hablando se distinguen tres unidades principales, que corresponden a las Formaciones Antímamo, Las Brisas y Las Mercedes. Además este segundo capítulo menciona los principales antecedentes de esta investigación, entre los cuales destacan: **“Estudio Geotécnico del Distrito Metropolitano de Caracas, Sector Central”**, **“Análisis de Amenaza Sísmica para Caracas, Incluyendo Efectos de Sitio”** y **“Estudio de Deslizamientos de Laderas Activadas por Acción Sísmica en Caracas”**; los cuales fueron un gran aporte en cuanto a la información usada en esta investigación, aportando claridad en la elección de la metodología que se empleó.

El tercer capítulo de este trabajo está constituido por el marco teórico, y en el mismo se define la remoción en masa, la cual se refiere al movimiento de masas de suelo, detritos o roca de los taludes, pudiendo actuar la gravedad y/o algún medio de transporte, cualquiera que sea el mecanismo particular del movimiento, además de señalar los tipos de movimientos de remoción que existen, siendo estos: caídos, deslizamientos, vuelcos, flujos, desprendimientos, avalanchas rocosas, desplazamientos

laterales y movimientos complejos. También se mencionan los factores que controlan la estabilidad de las laderas, como la topografía, la composición geológica, la humedad presente. Se mencionan cuales son los factores que detonan dichos movimientos de masa, como modificaciones realizadas por el hombre, factores meteorológicos, y otros. Se definen los términos empleados durante la investigación, se explica la metodología desarrollada por Mora & Vahrson, la cual se modificó para su aplicación en el Distrito Metropolitano de Caracas, sector central.

El capítulo IV, explica la metodología aplicada en este estudio, explica como desarrollar cada mapa, además de cómo se modificó la metodología de Mora y Vahrson para su aplicación. Este capítulo explica las fases seguidas durante la elaboración del presente estudio, desde la etapa pre – campo, hasta la fase final que comprendió la elaboración del modelo final.

El capítulo V presenta el análisis de los resultados obtenidos. Explica las características de las 10 (diez) unidades litológicas que se emplearon, explica los 9 (nueve) tipos de zonas de geodinámica externa, se analizan los 11 sectores estructurales. También se explican los mapas clinométricos, de estabilidad geométrica de las laderas y el de estabilidad de las laderas. También se analizan los sub – modelos a partir de los cuales se obtuvo el modelo de susceptibilidad a movimientos de masa y se da una explicación de las características principales de las zonas obtenidas en mapa de susceptibilidad a movimientos de remoción en masa, el cual es el resultado final de esta investigación.

Después de los capítulos descritos, se procedió a la elaboración de las conclusiones obtenidas en esta investigación, además de las recomendaciones, las cuales se plasmaron en el capítulo VI, de conclusiones y recomendaciones, en este capítulo se describe la utilidad de esta investigación, además del alcance que tuvo la misma, con respecto a los objetivos planteados.

# CAPITULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

1.2 Objetivos

1.3 Alcances

1.4 Ubicación

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En un gran número de ciudades con alta densidad de población en el mundo, incluyendo las de Venezuela, sucede que la gran demanda de espacios para construir ha determinado que la ocupación del espacio haya ocurrido en sitios cuya estabilidad está altamente cuestionada, situación que ha aumentado la importancia de realizar los estudios geotécnicos pertinentes en las ciudades, los cuales tienen la finalidad de establecer la susceptibilidad de los terrenos a experimentar movimientos de masa u otros procesos de inestabilidad. Los estudios geotécnicos se fundamentan en la determinación y ponderación de una asociación de características específicas, que al integrarse permiten categorizar, de manera general, la posibilidad a ocurrencia de movimientos de masa.

En los últimos años, muchas ciudades de Venezuela han experimentado procesos de expansión demográfica, lo cual ha determinado que un número relevante de las viviendas construidas en esa etapa de crecimiento fuesen ubicadas en sitios donde existe un riesgo geológico-geotécnico latente, sin tomar en cuenta las previsiones necesarias, lo que implica que la población allí asentada esté propensa a sufrir pérdidas materiales y hasta de vidas humanas, debido a los procesos catastróficos que suelen dispararse en épocas críticas, desde el punto de vista climático.

El término susceptibilidad se refiere a la predisposición que presenta un terreno a la ocurrencia de movimientos de masa y no implica el aspecto temporal del fenómeno, esto quiere decir que el estudio permitirá aproximarse al riesgo existente en un espacio físico específico, pero no podrá determinar el periodo de ocurrencia de los fenómenos. Para evaluar el grado de susceptibilidad a los posibles movimientos de masa existen diversas aproximaciones basadas en la determinación de los factores que influyen en la aparición de las superficies de ruptura o de desplazamiento. Estos factores se combinan para definir los distintos grados de la susceptibilidad a movi-

mientos de masa, expresando los resultados de forma cartográfica mediante los mapas de estabilidad de las laderas. Los mapas de estabilidad de las laderas aunados a factores dinámicos e hidrometeorológicos causantes de movimientos de masa, como la sismicidad, las precipitaciones y la humedad natural, generan un resultado cartográfico, en el cual se puede cuantificar la susceptibilidad a movimientos de masa.

Hasta la fecha en el Distrito Metropolitano de Caracas se han ejecutado numerosos estudios de orientación geotécnica, determinando el riesgo geológico-geotécnico, pero los mismos han sido realizados a escala local, y de manera individual para fines de interés personal y no público o investigativo. Sin embargo, en la década de 1970 el Ministerio de Energía y Minas creó una unidad de trabajo que dió los pasos iniciales del “Estudio Geotécnico del Área Metropolitana de Caracas sector central”, trabajo que fue culminado en el año 1985 por PIERO, F.; PASQUALE, D.; BARRIENTOS, C.; BASTARDO, S. y RAMIREZ, R., en el cual se realizó la integración de distintos factores, que produjeron la macro y microzonificación geotécnica a escala 1:10.000. Aparte del estudio mencionado, pocas instituciones gubernamentales se han dado a la tarea de completar un estudio geotécnico del Área Metropolitana de Caracas, entre estas instituciones se encuentra el Instituto Nacional de Geología y Minería (INGEOMIN). Por esta razón hoy en día existe la necesidad de generar un mapa de susceptibilidad a inestabilidades, en el Distrito Metropolitano de Caracas, a una escala que permita tomar una decisión viable para cualquier tipo de proyecto, es decir, a una escala manejable que permita obtener un resultado que se pueda considerar veraz.

El crecimiento urbano que ha experimentado la zona metropolitana de Caracas, desde la época colonial, determina que para la implantación de muchas de las edificaciones antiguas y actuales, tuvieron que ser modificadas las características topográficas originales, ya sea por corte o por relleno, alterándose en muchas zonas la red de drenaje original, eliminándose zonas que eran áreas de recarga del acuífero local al ser recubiertas de materiales impermeables, a lo cual habría que añadir que las deficiencias en la red de tuberías del sistema de alcantarillado, ha causado un cambio drástico en la humedad natural de los suelos, el cual se refleja en la estabilidad de las

laderas, ya sea para hacerlas más estables o más inestables, de esta forma se genera la necesidad de un estudio que permita integrar el factor humedad natural de los suelos en la estimación de la susceptibilidad a movimientos de masa y así poder prevenir las posibles consecuencias que puedan ocurrir.

A este cuadro tan desfavorable se le suma la carencia de los estudios pertinentes al tema en gran parte del Distrito Metropolitano de Caracas, generándose de esta forma la necesidad de ejecutar un estudio que establezca el riesgo geológico-geotécnico a una escala manejable de la ciudad de Caracas. Un estudio de susceptibilidad a movimientos de masa permitirá la generación de un proceso de toma de decisiones sobre el urbanismo más adecuado, lo que equivale a prever soluciones viables, urbanas y eficaces a los problemas de índole ingenieril, que han proliferado en la región.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 GENERALES:**

- Generación de un mapa de estabilidad de las laderas (orientación geotécnica) de la región de Caracas, a escala 1:25.000, el cual contenga un diagnóstico general del riesgo geotécnico existente.
- Generación de un modelo de susceptibilidad a movimientos de masa que incluya características dinámicas y climáticas.

### **1.2.2 ESPECÍFICOS**

- Actualización y estructuración de la base de datos de susceptibilidad geotécnica, apoyada en un Sistema de Información Geográfica del Distrito Metropolitano de Caracas
- Generación de los mapas temáticos correspondientes a los parámetros básicos del estudio, a escala 1: 25.000 a saber:
  - Mapa Litológico.
  - Mapa Estructural.
  - Mapa de Pendientes.
  - Mapa de Geodinámica Externa.
  - Mapa de Estabilidad Geométrica de las Laderas.
- Integración de los análisis de los mapas temáticos antes citados para generar el mapa de Estabilidad de las Laderas (orientación Geotécnica) a escala 1: 25.000.
- Generación de sub-modelos para la aplicación de una metodología de Mora y Vahrson modificada:
  - Sub-modelo de Humedad Natural Sh.



- Sub-modelo de Litología St.
- Sub-modelo de Intensidad Sísmica Ts.
- Sub-modelo de Relieve Relativo Sr.
- Sub-modelo de Precipitaciones Diarias Tp.
- Integración de los sub-modelos generados, valorándolos de acuerdo a una metodología modificada de Mora y Vahrson para obtener el modelo final de susceptibilidad a movimientos de masa a escala 1: 25.000.

### 1.3 ALCANCES

Por medio de los resultados generados se busca establecer un criterio básico que sea útil en el diagnóstico de problemas geotécnicos, y de esta manera plantear soluciones posibles, lo cual implica que la zonificación de susceptibilidad a los movimientos de masa sería una herramienta muy importante en la toma de decisiones para proyectos de infraestructura en el Distrito Metropolitano de Caracas, sobre todos aquellos referidos al uso habitacional, siendo el alcance real del estudio, es decir, se proporcionaría una herramienta preliminar para facilitar la toma de decisiones en cuanto a la factibilidad de realizar un proyecto o a la necesidad de profundizar el análisis geotécnico del lugar, además de brindar un grado específico en cuanto a la susceptibilidad a movimientos de masa en un área determinada, definiendo y jerarquizando posibles áreas críticas que posteriormente deban ser sometidas a un análisis detallado y profundo utilizando métodos más específicos.

## 1.4 UBICACIÓN

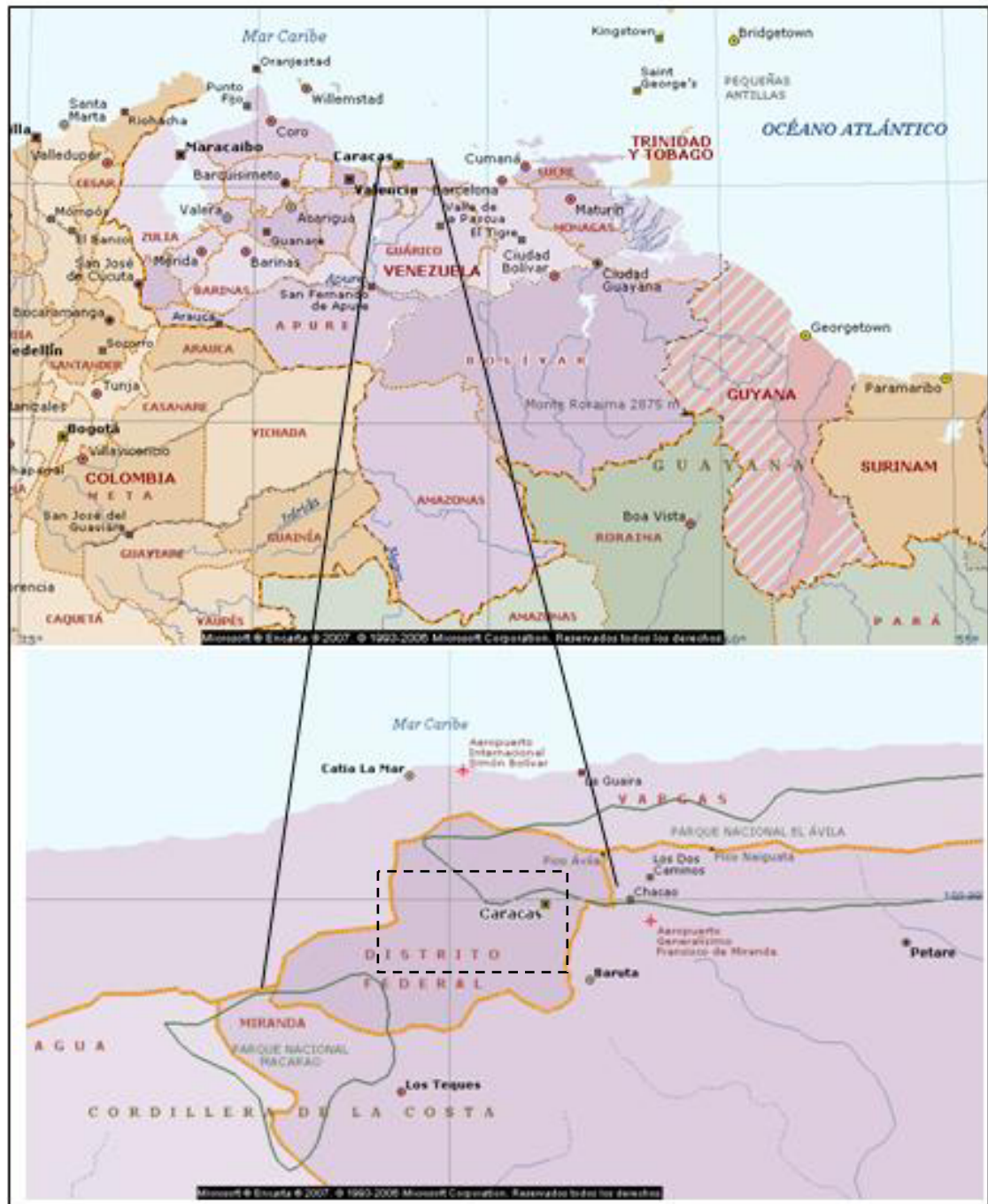
Situación limítrofe: El Distrito Capital, limita: Por el Norte con el estado Vargas. Por el Sur con los estados [Aragua](#) y Miranda. Por el Este con el estado Miranda. Por el Oeste con el estado Aragua.

Este estudio se realiza en el sector central del Distrito Metropolitano de Caracas, el cual representa una porción significativa con respecto a la totalidad del área, ya que abarca un área aproximada de 160 Km<sup>2</sup>. Está limitada al norte por una línea imaginaria que une Petare – Santa Mónica – Carapita; al sur por otra línea imaginaria que une La Lagunita – Monterrey – Caricuao; mientras que al este y oeste por las respectivas perpendiculares a estas líneas. Sus límites tienen las coordenadas UTM mostradas en la tabla 1.1.

En la Figura 1.4.1. Se aprecia la ubicación del Distrito Metropolitano de Caracas.

<b>Coordenadas</b>	<b>E</b>	<b>N</b>
<b>Suroeste (Límite inferior izquierdo)</b>	720000	1153000
<b>Noroeste (Límite superior izquierdo)</b>	720000	1160000
<b>Sureste (Límite inferior derecho)</b>	741000	1153000
<b>Noreste (Límite superior derecho)</b>	741000	1160000

**Tabla 1.1. Coordenadas UTM de la región de estudio.**



**Figura 1.4.1. Ubicación del Distrito Metropolitano de Caracas, el sector en el rectángulo corresponde a la región de estudio.**

## **CAPITULO II**

### **GENERALIDADES DE LA REGIÓN DE ESTUDIO**

2.1. Fisiografía

2.2. Vegetación

2.3. Clima

2.4. Geología Regional

2.5. Geología Local

2.5.1. Análisis de las Unidades Litológicas

2.5.2. Análisis de Geodinámica Externa

2.5.3. Análisis Estructural

2.6. Antecedentes

## CARACTERISTICAS DEL DISTRITO METROPOLITANO DE CARACAS

### 2.1 Fisiografía.

En el tramo central de la Cordillera de la Costa se identifica un rasgo geológico de magnitud regional, consistente en la depresión tectónica que se extiende desde Antímano, en su extremo oeste, hasta Petare, al este y donde se asienta buena parte de lo que se denomina Área Metropolitana de Caracas.

Tiene una longitud de 25 km y un ancho máximo de 5 km, y es llamado Valle de Caracas, el cual está atravesado por el cauce del río Guaire, y está separado del litoral central a unos 15 Km. en línea recta N-S, por el Parque Nacional el Ávila, es decir, se trata de un valle relativamente pequeño y bastante irregular, cuya altitud respecto al nivel del mar varía de un punto a otro de la ciudad entre los 870 y los 1.043 m, con 900 m en su centro histórico (Figura 2.1).

Esta depresión tuvo su origen en una serie de fallas que se aprecian fácilmente al pie del Ávila y que son los responsables del hundimiento experimentado por la región. Tal depresión tectónica fue cubierta de sedimentos aportados por el río Guaire y por una serie de quebradas como Catuche, Caroata, Cacao, Cotiza, Tócome, etc., que luego de excavar el área montañosa circundante, depositaron los detritos a sus pies en forma de conos de deyección, según SINGER (1983), muchos de los cuales avanzaron hacia el sur empujando el curso del río Guaire en el mismo sentido, por lo cual este río no corre en el centro de la depresión.

El río del Guaire, al llegar a Petare, se desvía hacia el sur hasta confluir con el río Tuy, el colector principal cuyo curso total es de 293 kilómetros, aproximadamente, y que nace cerca del Pico Codazzi, cerca de la Colonia Tovar, en la vertiente meridional de la cadena litoral de la Cordillera de la Costa, el cual, al llegar a la población

de El Consejo, toma un curso hacia el este, a lo largo de cuyo recorrido recibe numerosos tributarios, entre ellos al Guaire.



**Figura 2.1 Fisiografía del Distrito metropolitano de Caracas. Imagen tomada de <http://maps.google.es/>**

## **2.2 Vegetación.**

De acuerdo con la interpretación de imágenes del satélite "Landsat", la vegetación presente de la región en consideración es la denominada Bosque Seco, pudiéndose clasificar dentro de los grandes grupos de vegetación como herbácea y arbustiva, respectivamente. La vegetación dentro del grupo herbáceo tiene la característica de presentar sus raíces a nivel superficial del suelo para sí poder obtener mayor cantidad del agua que escurre en la superficie, durante las precipitaciones. Sobre el límite Sur del área, la vegetación se presenta más arbustiva, cambio éste que se debe a la presencia del Bosque Húmedo, con mayor humedad en el aire (95%), y mayor promedio de precipitación anual (770.7 mm), estableciéndose un mayor grado de estabilidad entre la evapotranspiración y la precipitación, de acuerdo con los datos tomados de la Estación Caracas - San José del Ávila, ubicada a 999 m.s.n.m., con un período de registro de 17 años.

Hay que tomar en cuenta sobre las condiciones de la calidad de cobertura de la vegetación, los efectos de la intervención antrópica desmedida en el sector, quedando tan solo alguna variedad de árboles, como evidencias del bosque original, entre las áreas ocupadas por viviendas. Dicha falta de vegetación en estos sectores, es otro factor importante en la activación de los procesos de erosión, ya que en un suelo desprovisto de cobertura vegetal natural, el escurrimiento produce una escorrentía que va desde difusa hasta concentrada en surcos y cárcavas, acentuándose esta problemática en sectores dentro del área con fuertes pendientes, influyendo en la ocurrencia de movimientos en masa.

## **2.3 Clima**

Según la clasificación climática de Copen, la zona de estudio se ubica dentro del grupo Aw, correspondiente a un Clima Lluvioso tropical (Figura 2.3)

2.3.1 Clima tropical o lluvioso cálido (A): es el tipo climático más representativo del país. Son climas típicos del trópico, que se caracterizan por mantener una elevada temperatura durante todo el año, superior a 18 °C (tipo A), con precipitaciones durante gran parte del año, lo que determina que se puedan diferenciar tres tipos climáticos.

La subdivisión Aw comprende dos períodos definidos: seco, entre diciembre y marzo y lluvioso, el resto del año. La precipitación anual oscila entre 600 y 1500 mm y asociada a la misma se observa el predominio de vegetación herbácea. Se localiza en toda la región de los llanos occidentales, centrales y orientales, al norte de la región Guayana y parte de la cordillera de los Andes y de la Costa.

2.3.2 Régimen Pluviométrico: el régimen pluviométrico, como se indicó anteriormente, está caracterizado por un máximo de precipitación anual entre los meses de Agosto y Septiembre, según la información suministrada por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, con un período de lluvias que se extiende desde el mes de mayo



hasta el mes de noviembre, mientras que el período de sequía se extiende desde el mes de diciembre hasta abril.

En general, el clima de Caracas es de tipo intertropical de montaña, con precipitaciones que varían entre los 900 y 1300 mm. anuales, en la propia ciudad, y hasta los 2000 mm en algunas partes de la Cordillera; la temperatura media anual es de aproximadamente de 22,5 °C, siendo la media del mes más frío (enero) de 21° C y la media del mes más cálido (mayo) de 24° C, lo que da una amplitud térmica anual escasa, de sólo 3°C. Las amplitudes térmicas diarias en cambio son mucho mayores (más de 10°C), con máximas diurnas casi siempre superiores a 30°C y que raras veces descienden a menos de 25°C. En los meses de diciembre y enero aparecen abundantes nieblas, además de un repentino descenso de temperaturas nocturnas que llegan a bajar hasta 13 °C o algo menos. Además, las temperaturas nocturnas en cualquier época del año no suelen superar los 20°C, lo que hace que las noches caraqueñas sean agradables. En Caracas pueden presentarse, aunque en raras ocasiones, tormentas de granizo mientras que las tormentas eléctricas son mucho más frecuentes, especialmente entre junio y octubre, por su condición de valle cerrado y por la acción orográfica del Ávila.



**Figura 2.3. Clasificación Climática de Köpen**

<http://200.44.126.163/atlas/ecologico/clima.htm>

## **2.4 Geología Regional**

La zona de estudio comprende diversas características geológicas, presentando cambios en su litología que permiten, a gran escala, definir tres unidades principales, siendo éstas la Formación Antímamo, la Formación Las Brisas y la Formación Las Mercedes, y sus descripciones según el Léxico Estratigráfico de Venezuela son las siguientes:

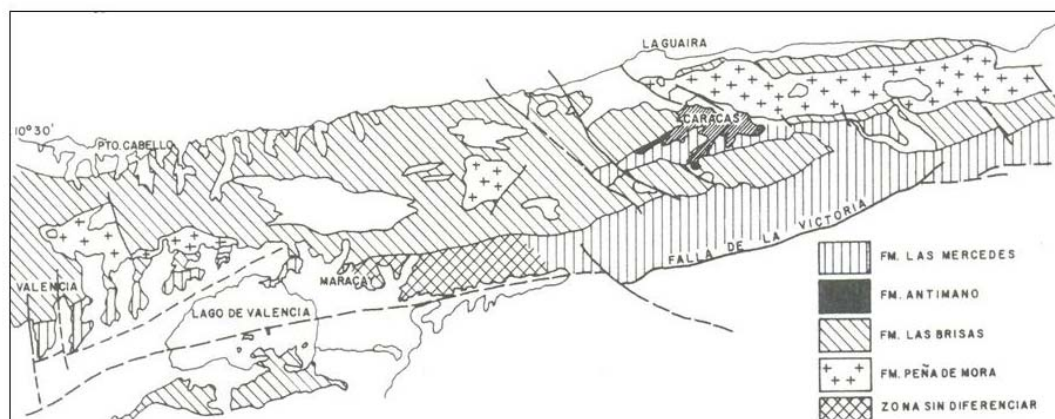
### **2.4.1 Cordillera de la Costa**

Los nombres de las rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera de la Costa, Venezuela, fueron adaptadas por Urbani en el 2000 a las normas de unidades litodémicas. Sin embargo, en las citas referidas en el siguiente texto se respeta la denominación utilizada por el autor originalmente, pero para fines de este trabajo se utilizará la denominación actualizada.

La Faja Tectónica de la Cordillera de la Costa ocupa la parte septentrional de las montañas occidentales del Caribe y su límite al sur coincide en gran parte con la zona de falla de La Victoria, que la separa de la Faja Caucahua - El Tinaco

Menéndez (1966) incluye dentro de esta faja las siguientes unidades: Complejo Basal de Sebastopol, formaciones Peña de Mora, Las Brisas, Antimamo y Las Mercedes. Localmente afloran cuerpos de diferentes tamaños de migmatitas y granitos (Figura 2.4). Asimismo se encuentran cuerpos dispersos de serpentinita, peridotitas, parcialmente serpentinizadas y anfíbolitas.

Bellizzia y Rodríguez (1976) destacan la presencia muy local de eclogitas y esquistos glaucofánicos, que forman un cinturón discontinuo de rocas de alta presión y baja temperatura (7 - 10Kb y 350° - 450°C), el cual se extiende desde Yaracuy hasta la isla de Margarita y marcado por las localidades más importantes de Puerto Cabello, Caracas y parte nororiental de Margarita, González de Juana *et al* (1980).



**Figura 2.4. Fajas Cordillera del Caribe (González de Juana *et al*, 1980).**

Aguerrevere y Zuloaga, describieron a las Formaciones Las Brisas y Las Mercedes y Dengo (1951) ampliando el grupo, describió a la Formación Antimano y Tacagua (Reyes, 1979).

Dengo (1951) en Reyes (1979) estableció en la región de Caracas una secuencia estratigráfica definitiva con base en los reconocimientos de Aguerrevere y Zuloaga. Tal secuencia es la siguiente; de más reciente a más antigua: Grupo Cabo Blanco en contacto discordante sobre esquistos sericítico-epidótico (Formación Tacagua), esquistos micáceo-calcáreos (Formación Las Mercedes) caliza cristalina (Formación Antimano), esquistos cuarzo-micáceos (Formación Las Brisas) y gneis microclínico o para gneis (Formación de Peña de Mora) en contacto discordante sobre un basamento ortogneisico granítico.

Smith (1952) en su estudio sobre la región de Los Teques-Cúa, estableció que la división de las diversas formaciones propuestas en su trabajo, difieren en algún modo de la establecida originalmente por Aguerrevere y Zuloaga (1937, 1938). Considera que la mayoría de las rocas de la región de Los Teques han sido metamorfizadas, el grado de metamorfismo es lo bastante bajo para permitir que se considere esencialmente una secuencia sedimentaria (Reyes, 1979).

Seiders (1965) en Reyes (1979) en su estudio sobre la región de Miranda Central, señala que las formaciones del Grupo Caracas no son entidades bien definidas y considera que las unidades se diferencian entre si principalmente por las proporciones relativas de tipos de rocas antes que por la litología.

#### **2.4.2 Asociación Metasedimentaria Caracas**

Descrita originalmente por Aguerrevere y Zuloaga (1937) bajo el nombre de “Serie Caracas”, modificado en 1938 a Grupo y actualmente denominada Asociación Metasedimentaria Caracas (Urbani, 2000), designa a la secuencia de rocas metasedimentarias de bajo grado, que se encuentran bien expuestas en la región de Caracas, y que fueron descritas someramente o simplemente mencionadas por algunos autores anteriormente de manera informal (Urbani, 2000).

Posteriormente Dengo (1951) en Reyes (1979) en su estudio de la región de Caracas describió las rocas de este grupo y señaló estar constituido por las Formaciones Las Brisas, Antímamo, Las Mercedes y Tacagua.

Smith (1952) lo estudió en la región de Los Teques-Cúa, mientras Seiders (1965) añadió a la Formación Chuspita como la unidad más joven del grupo. Su cartografía geológica ha sido extendida, entre otros, en los trabajos de Wehrmann (1972), Asuaje (1972), Urbani y Quesada (1972) hacia el este de Caracas, Bellizzia y Rodríguez (1968) en el estado Yaracuy (Urbani, 2000).

González (1972) recopiló los trabajos cartográficos de las tesis doctorales de la Universidad de *Princeton* en la parte centro-occidental de la Cordillera de la Costa. Urbani *et al.* (1989) recopiló los trabajos de las regiones de El Palito - Valencia - Maracay, y Oritapo - Cabo Codera - Capaya. Las “formaciones” Tacagua y Antímamo previamente incluidas en esta unidad, son redefinidas como fases por Navarro *et al.* (1988) incluyéndolas en su Complejo La Costa. Parte de las rocas previamente consideradas como Formación Las Brisas aflorantes al norte del macizo de El Ávila, hoy

se incluyen en el Complejo de San Julián de la Asociación Metamórfica Ávila (Urbani, 2000).

Con estos cambios sugeridos, esta Asociación hoy día queda constituida por los esquistos de Las Brisas, Las Mercedes y Chuspita, ocupando la franja septentrional de la serranía costera de la Cordillera de la Costa, inmediatamente al sur de las franjas que ocupan las asociaciones la Costa y Ávila (Urbani, 2000).

*Descripción litológica:* la litología típica del Esquisto de Las Brisas es el esquisto (o filita) cuarzo-muscovítico-feldespático±clorítico, así como metarenisca y metaconglomerado también cuarzo-feldespático-micáceo. En el Esquisto de Las Mercedes predomina el esquisto cuarzo-calcáreo-muscovítico-grafitoso, de color gris oscuro, e igualmente en el Esquisto de Chuspita, si bien en ella hay mayor abundancia de metarenisca.

*Extensión geográfica:* la Asociación aflora típicamente en la región de Caracas-Los Teques y sus alrededores, y se ha cartografiado como una franja casi continua en sentido este-oeste, que se extiende desde el estado Yaracuy, hasta la zona de Barlovento en el estado Miranda. Sus unidades constituyen una franja predominante de la Cordillera de La Costa.

*Contactos:* Los contactos entre las rocas de esta Asociación con la Asociación Metamórfica Ávila hacia el norte (Urbani y Ostos, 1989) y con las rocas de la faja Caucagua-El Tinaco al sur, son tectónicos (Beck, 1986). El contacto entre los esquistos de Las Brisas y Las Mercedes es tectónico (Urbani *et al*, 1989), mientras que entre los esquistos de Las Mercedes y Chuspita parece ser concordante y transicional, (Seiders, 1965; en Urbani 2000).

En la zona de estudio afloran rocas metamórficas las cuales han sido incluidas por Aguerrevere y Zuloaga (1937), Dengo (1951), Wehrmann (1972) ; dentro de las

unidades de la Asociación Metasedimentaria Caracas, representadas por los esquistos de Las Brisas y Las Mercedes (Figura 2.5).

### **2.4.3 Formación Antímamo:**

*Descripción litológica:* Dengo (1951) describe esta Formación como un mármol masivo de grano medio, color gris claro, con cristales de pirita, alternando con capas de esquistos cuarzo micáceos, y asociadas con cuerpos concordantes de rocas anfibólicas, algunas con estructuras de "boudinage". El mármol está formado de un 85-95% de calcita, con cantidades menores de cuarzo detrítico, muscovita (2,5%), grafito (2,5%) y pirita (2%).

Dengo (1950) describe con detalle las anfibolitas glaucofánicas de esta Formación, incluyendo análisis químicos, indica que los mármoles son rocas estructuralmente competentes en relación a los esquistos que las rodean, pero incompetentes en relación con las rocas anfibólicas, mostrando pliegues de flujo alrededor de ellas y resultando así la estructura de "boudinage".

Schurmann (1950) igualmente estudia estas rocas glaucofánicas, presentando un mapa detallado de los diversos tipos litológicos en el sector de Antímamo y Mame-ra.

En la región del Camino de los Españoles, Parque Nacional El Ávila, Ostos (1981) describe su Unidad de esquisto cuarzo-moscovítico y mármol cuarcífero equivalente a esta Fase, encontrando los siguientes tipos litológicos: esquisto cuarzo-moscovítico, mármol y esquistos calcáreos, esquisto cuarzo-feldespático y feldespático, cuarcita moscovítica-feldespática, epidocita y glaucofanita granatífera.

En la cartografía geológica de la zona de Puerto Cruz-Mamo, Talukdar y Loureiro (1982) reconocen su Unidad de anfibolitas y mármoles, que posteriormente Urbani y Ostos (1989) la denominan como Fase Antímamo, allí ocurre la asociación de

anfíbolita, mármol, esquistó calcáreo-muscovítico ± grafitoso, esquistó cuarzo-muscovítico ± granatífero, esquistó cuarzo-muscovítico-graucofánico-granatífero.

En la zona de El Palito, estado Carabobo, Urbani *et al.* (1989) mencionan la asociación de anfíbolita granatífera-clinopiroxénica, anfíbolita granatífera, eclogita, anfíbolita epidótica-plagioclásica, mármol, cuarcita y esquistó cuarzo-plagioclásico-muscovítico.

Ostos (1990) describe algunas de las rocas máficas de esta Fase aflorantes en la sección Chichiriviche-Colonia Tovar, siendo anfíbolita granatífera y esquistó albítico-clorítico. La anfíbolita tiene porfiroblastos de granate, mientras que el esquistó los tiene de albíta con sombras de presiones simétricas y bien desarrolladas. Las asociaciones mineralógicas metamórficas indican un primer evento de alta relación P/T en la facies de la eclogita, siendo impreso por un segundo evento metamórfico de P/T intermedia en la facies de los esquistos verdes.

Urbani *et al.* (1997) estudian la mineralogía carbonática de los mármoles de los afloramientos de la punta oeste de la bahía de Chichiriviche, Distrito Federal, encontrando que carecen de dolomita, mientras que aquellos de Mamera lo presentan en muy pocas muestras y en muy bajas concentración. En los trabajos ya mencionados de Ostos, Urbani y otros, el criterio para cartografiar esta Fase es la presencia de la asociación de rocas anfibólicas con mármoles.

*Espesor:* Considerando a la foliación como plano de referencia, el espesor aparente de esta unidad es de 40 m en la localidad tipo, según Dengo (1951), disminuyendo hacia el este y oeste. Al sur de San Pedro, Smith (1952) indicó un espesor aparente máximo de 300 m.

*Extensión geográfica:* Se han descrito afloramientos aislados desde la zona de Antímáno, hacia el oeste en San Pedro y hacia el este hasta La Florida (afloramientos hoy cubiertos por el urbanismo de la ciudad de Caracas), continúa la zona de aflora-

mientos en una franja en el valle de la quebrada Tacagua, y de ahí hacia el oeste como una franja entre Mamo, Carayaca y Tarma, Distrito Federal. Los últimos afloramientos se han reconocido en la zona de El Palito, estado Carabobo.

*Contactos:* Esta formación presenta contactos estructuralmente concordantes con las formaciones adyacentes: Las Brisas y Las Mercedes. En la zona de Antímamo y Mamera, los lentes de mármoles y rocas anfibólicas, que alcanzan a veces grandes dimensiones longitudinales, se hallan embutidos en esquistos de diversos tipos, especialmente los correspondientes a la Formación Las Brisas (Cantisano, 1989).

#### **2.4.4 Formación Las Brisas.**

*Descripción litológica:* La descripción original de Aguerrevere y Zuloaga (*op. cit.*), menciona un conglomerado basal arkósico, con cantos rodados derivados de la roca basal de Sebastopol, redondeados a subangulares, hasta de 30 cm. de diámetro, cantos de cuarzo y cemento, principalmente silícico. Esta litología dista de ser la principal, ni mucho menos la única componente de la formación.

Dengo (*op. cit.*) observa que la mayor parte de la formación, está constituida por esquistos cuarzo-micáceo, en el que se incluye gneis microclínico, esquistos granatíferos, cuarcitas y calizas (ver además: Zenda, Miembro).

Smith (*op. cit.*), divide la formación en dos miembros: miembro inferior, constituido por gneises y esquistos microclínicos conglomeráticos y miembro superior, formado casi enteramente por esquistos sericíticos. Este autor opina que los grupos litológicos de los miembros inferior y superior, se originan de conglomerados y lutitas respectivamente, y que las calizas son de origen biohermal.

Seiders (*op. cit.*) encuentra en el tope de la formación, conglomerados gnéisicos y areniscas esquistosas, con cantidad menor de caliza negra en capas delgadas, y grandes guijarros de granito, y resalta la ausencia de los esquistos sericíticos de Smith.



Morgan (*op. cit.*) añade anfibolitas estratificadas concordantes, que interpreta como tobas, sills o flujos metamorfizados.

Wehrmann (*op. cit.*) afirma que la Formación Las Brisas, está constituida en un 90% de esquistos cuarzo-feldespático-moscovíticos; el 10% restante lo constituyen, en orden de abundancia, esquistos cuarzo-feldespáticos, epidóticos o cloríticos, calizas, cuarcitas y metaconglomerados. Menciona igualmente, mineralizaciones pobres de cobre en algunas calizas, en forma de sulfuros y sulfatos. Este autor no menciona el gneis microclínico de Dengo, pero hace referencia a conglomerados y areniscas intraformacionales, ricas en microclino (15%), sin hacer referencia a su relación con los gneises del mismo género.

Taludkar y Loureiro (*op. cit.*) analizan exhaustivamente los tipos litológicos, en un área reducida de la Cordillera de la Costa, sin relacionarla con las formaciones tradicionales, estableciendo la dificultad e inconveniencia en el uso de unidades litoestratigráficas, en estudios detallados de rocas metamórficas. El grado de metamorfismo es bajo, aunque existen diferencias entre las opiniones de Dengo, Smith y Seiders, quienes opinan que predomina la facies de la anfibolita y el glaucofano, mientras que Wehrmann le asigna grados más bajos de presión (facies del esquistos verde).

*Extensión geográfica:* A todo lo largo del macizo central de la Cordillera de la Costa, entre el Cabo Codera y el graben del río Yaracuy.

*Contactos:* La Formación Las Brisas descansa sobre el Complejo Basal de Sebastopol. El contacto, ya sea por la foliación discordante, sea por el hiatus de tiempo que separa ambas formaciones, es discordante, según la opinión generalizada, aunque algunos autores (véase: Sebastopol, Complejo Basal de), afirman haber observado localmente una aparente concordancia entre una y otra. La relación con las formaciones suprayacentes Antímano y Las Mercedes, es generalmente transicional, aunque a veces, el contacto es estructural. La Formación Las Brisas forma en la región capital, el núcleo de los anticlinorios que corren a lo largo de la faja de la Cordi-

llera de la Costa. Los trabajos presentados hasta 1972, ofrecen un cuadro estructural clásico de plegamientos longitudinales, con sus respectivas fallas, segmentados por fallas transversales, haciendo mención de microestructuras, tales como lineaciones, pliegues de flujo, etc., tomando como base para la composición estructural, el principio de que la foliación es paralela a la estratificación, y de que los esfuerzos de deformación provienen del norte, con una componente menor en sentido E-W.

Talukdar y Loureiro (*op. cit.*), hacen un análisis muy detallado, y desarrollan un modelo de evolución tectónica de la cordillera en cinco etapas, identificando cuatro fases consecutivas de plegamiento, originados por subducción, colisión de placas y emplazamiento del basamento granítico, corteza oceánica y manto, así como de intrusiones graníticas.

Los afloramientos de esta Formación, alcanzan dimensiones decakilométricas en sentido N-S, y hectokilométricas en su extensión longitudinal, E-W.

#### **2.4.5 Formación Las Mercedes.**

*Descripción litológica:* Aguerrevere y Zuloaga (*op. cit.*), la definen como esquistos principalmente calcáreos, con zonas grafitosas y localmente zonas micáceas, de un tinte rosado, gris, con zonas blancas cuando frescas. Según Wehrmann (1972) y la revisión de González de Juana *et al.* (1980, p. 317) la litología predominante consiste en esquistos cuarzo - muscovítico - calcítico - grafitoso con intercalaciones de mármol grafitoso en forma de lentes, que cuando alcanza gruesos espesores se ha denominado "Caliza de Los Colorados". Las rocas presentan buena foliación y grano de fino a medio, el color característico es el gris pardusco. La mineralogía promedio consiste en cuarzo (40%) en cristales dispuestos en bandas con la mica, muscovita (20%) en bandas lepidoblásticas a veces con clivaje crenulado, calcita (23%) en cristales con maclas polisintéticas, grafito (5%), y cantidades menores de clorita, óxidos de hierro, epidoto y ocasionalmente plagioclasa sódica. El mármol intercalado con esquistos se presenta en capas delgadas usualmente centimétricas a decimétricas, son

de color gris azulado, cuya mineralogía es casi en su totalidad calcita, escasa dolomita y cantidades accesorias de cuarzo, muscovita, grafito, pirita y óxidos de hierro. Oxburgh (*op. cit.*), incluye el conglomerado de Charallave en la parte superior de Las Mercedes, y discrimina una facies oriental, de esquistos grafiticos, en su mayoría no calcáreos, granatíferos, con capas cuarcíticas de 20-70 cm. de espesor y esquistos micáceos granatíferos, donde las capas cuarzosas están ausentes; y una facies occidental más arenosa, menos grafitica y carente de capas calcáreas, con abundante granate, y filitas grafiticas de color variable, predominantemente negro en la parte superior de la sección.

Wehrmann (*op. cit.*), menciona metaconglomerados en su base, esquistos cloríticos y una sección en el tope, de filitas negras, poco metamorfizadas, con nódulos de mármol negro, de grano muy fino, similares a los de las formaciones La Luna y Querecual, sin hallar fósiles en ellos. Este mismo autor, indica que el tope de la formación se hace más cuarzosa y menos calcárea en su transición hacia la Formación Chuspita. Seiders (*op. cit.*), menciona además, meta-areniscas puras, feldespáticas y cuarzosas, de estratificación de grano variable, a veces gradada.

Aguerrevere y Zuloaga (*op. cit.*), incluyen dentro de la formación una zona constituida por calizas oscuras y densas, en capas delgadas, interestratificadas con capas de esquistos micáceos y arcillosos, todo intensamente plegado, que denominan Fase Los Colorados, y que constituyen excelentes estratos guía. Dengo (*op. cit.*), Seiders (*op. cit.*), y Wehrmann (*op. cit.*), no coinciden con esta formación, ya que según ellos, tales calizas se encuentran en diferentes niveles en la sección.

Urbani *et al.* (1989-a) cartografían dos subunidades en la zona de Valencia - Mariara, estado Carabobo. La mayoritaria de esquisto calcítico - grafitoso y mármol, con una asociación mineralógica de cuarzo, calcita, muscovita, albita, grafito, clorita y epidoto. Una segunda subunidad minoritaria de cuerpos de mármol masivo, contenido de calcita, cuarzo, muscovita, grafito y albita. En la zona de La Sabana - Chirimena - Capaya, Distrito Federal y Miranda, Urbani *et al.* (1989-b) reconocen cuatro

unidades cartografiadas, la primera y mayoritaria de esquisto grafitoso y mármol, así como de mármol, de metaconglomerado cuarzo - feldespático - calcáreo, de metaconglomerado y metaarenisca y de esquisto albitico - grafitoso. Todas estas rocas corresponden a un metamorfismo de bajo grado en la facies de los esquistos verdes, zona de la clorita.

Característico de la formación, es la presencia de pirita, que al meteorizar, infunde una coloración rosada a rojo ladrillo a la roca. Smith (*op. cit.*), opina que la coloración rosada proviene de la meteorización de la sericita. Otra característica es la extraordinaria proporción de vetas de calcita recrystalizada, en colores blanco, pardo y marrón, que ha sido identificada erróneamente como ankerita o siderita. En muestras de sondeos profundos con muestras no meteorizadas, esta coloración marrón de la calcita está ausente.

Muy poco se ha escrito sobre el ambiente en el cual se depositó la Formación las Mercedes. Oxburgh (*op. cit.*), sugiere dos fuentes principales de sedimento: una meridional, suplidora de cuarzo puro, y una occidental (Complejo de El Tinaco), para el material cuarzo-feldespático más joven. Presenta un esquema transgresivo hacia el sur, sobre una plataforma somera, en la cual se depositaron lutitas negras, con una facies oriental más arenosa.

Talukdar y Loureiro (1982), sugieren un ambiente euxínico en una cuenca externa a un arco volcánico. La estructura finamente laminada de las calizas, indica la sedimentación en un ambiente pelágico, mientras que los escasos restos de fósiles hallados, indican lo contrario.

Urbani *et al.* (1997) estudian mineralógicamente los mármoles de esta Formación en la zona de Birongo, estado Miranda, encontrando que la dolomita se encuentra en baja concentración predominando los mármoles calcíticos.

*Extensión geográfica:* En toda la extensión y en los flancos del macizo central de la Cordillera de la Costa, entre Carenero, estado Miranda, hasta el estado Cojedes.

*Contactos:* La mayoría de los autores hasta los años 70 han considerado el contacto entre las formaciones Las Mercedes y Las Brisas, como concordantes y de tipo sedimentario. Mientras que autores más recientes considera que es de tipo tectónico conservando paralelismo en la foliación en ambas unidades (e.g. González de Juana *et al.*, 1980, p. 318). En la zona de la Colonia Tovar, Ostos (1990, p. 55) señala que el contacto entre el Augengneis de Peña de Mora y el Gneis de Colonia Tovar, con la Formación Las Mercedes puede ser interpretado tanto como una falla normal de bajo ángulo, como un contacto sedimentario original. El contacto con la Formación Las Brisas lo interpreta como de corrimiento. En el estado Cojedes el mismo autor, señala que la Peridotita de Tinaquillo está en contacto con la Formación Las Mercedes a través del corrimiento de Manrique. Cantisano (1989) en su estudio de la zona de Mamera, Distrito Federal, indica que el contacto entre las formaciones Las Mercedes y Antímamo corresponde a una falla de corrimiento. El contacto con la Formación Chuspita parece ser transicional (Seiders, 1965).

## **2.5. GEOLOGÍA LOCAL**

Las principales características de la geología existente en la zona, a nivel local, son descritas en el “estudio geotécnico del Distrito Metropolitano de Caracas, sector central” por Feliciani, P. (1985), estudio comenzado en la década de 1970, por el Ministerio de Energía y Minas. A continuación se describen las características litológicas, geodinámicas y estructurales obtenidas en el estudio antes mencionado, y que se aplican en el presente trabajo:

### **2.5.1. ANÁLISIS DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS:**

En el Capítulo II del presente trabajo se hizo una descripción de las formaciones litológicas existentes en la zona de estudio, la siguiente descripción se enfatiza en el factor litológico, más que en el factor formacional.

En el mapa obtenido se reconocieron diez (10) unidades litológicas:

1. Depósitos Aluviales
2. Depósitos Coluviales
3. Unidad de Esquistos Calcáreos
4. Zona de Influencia de la Caliza
5. Unidad Micácea
6. Unidad Metarenisca
7. Unidad Filítica
8. Unidad Calcárea
9. Unidad de las Anfíboles
10. Unidad de las Serpentinitas

### **2.5.1.1. Unidad de los Depósitos Aluviales.**

Son depósitos detríticos compuestos por materiales heterométricos y heterogéneos, los cuales se localizan en las partes bajas del fondo del valle y están distribuidos en toda la zona de estudio, su ubicación se encuentra en correspondencia al río Guaire, el río El Valle y la Quebrada Caricua.

Las restricciones geotécnicas están establecidas en los estudios de suelo convencionales y por lo general son aprovechables.

En repetidas ocasiones esta unidad muestra considerables espesores de rellenos artificiales ejecutados para fines urbanísticos y cuyos espesores varían desde tres (3) hasta quince (15) metros.

### **2.5.1.2. Unidad de los Depósitos Coluviales**

Son depósitos detríticos que se encuentran distribuidos en toda el área de estudio. Los más representativos son los correspondientes a los sectores: Antímano – Montalbán – La Vega (Río Guaire), Caricua, Santa Mónica, Valle Arriba – Las Mercedes, El Cafetal, Prados del Este, Baruta – La Trinidad, La Boyera y finalmente el sector de la Lagunita.

Son depósitos que se diferencian por su origen, ya que pueden ser formados por la acumulación de materiales desplazados por gravedad a causa de la evolución natural de una vertiente, acumulándose de esta forma en laderas y fondo de valle con espesores de hasta diez metros, o por explayamientos coalescentes de distintas facies (arenosa y arcillosa) con espesores de hasta veinte metros. Por el hecho de ubicarse en las laderas que circundan el valle, es válido, para esta unidad, lo que se ha dicho para los materiales aluviales, o sea que las restricciones geotécnicas generalmente están establecidas en los estudios de suelos convencionales.

Existe también la situación en la que, encontrándose depósitos provenientes de la yuxtaposición e interstratificación de materiales coluviales y aluviales, deberán necesariamente considerarse las características geotécnicas de las dos (2) unidades en conjunto y, cuando sea posible, por separado.

### **2.5.1.3. Unidad de los Esquistos Calcáreos**

Corresponde en líneas generales a la Formación Las Mercedes, y está compuesta por esquistos calcáreos – micáceos – carbonosos, los cuales frecuentemente presentan intercalaciones de capas de calizas. Presentan afloramientos cuyos colores son grises y marrones en muestras frescas, y un color de meteorización rosado típico, siendo el suelo residual un material arcilloso de color rojo.

Características geotécnicas:

La dinámica de vertientes de la unidad calcárea presenta un potencial morfogénico de moderado a alto, permeabilidad de moderada a baja sin tendencia a la socavación subsuperficial y una capacidad de retención de humedad alta.

En esta unidad la resistencia a la disgregación total es directamente proporcional al contenido de calcita.

La meteorización, cuyos espesores varían entre 3 – 10 mts. de profundidad no altera químicamente la calcita, sino que la disuelve con dificultad.

Las bandas micáceas alteradas continuas representan zonas de debilidad, mientras que cuando son interrumpidas repetidamente como en el caso de los esquistos plegados y deformados, hay una mayor probabilidad de resistencia a la meteorización. Además en esta unidad, el plegamiento determina por lo general, un incremento de la estabilidad en las laderas.



La unidad presenta frecuentemente escapes de agua de tipo regmático por fracturamiento de las rocas, y cierta dificultad a la excavación requiriéndose a veces el uso de explosivos. Ofrece moderadas condiciones de fundación y se presenta con buenas posibilidades para obras civiles.

En esta unidad se han localizado, por cambios litológicos, espesores intermedios de meteorización, de tal forma que en donde predominan los esquistos calcáreos, los espesores de meteorización son mínimos aumentando a medida que el esquisto se va haciendo más micáceo.

Geotécnicamente los esquistos calcáreos son bastante estables, por el contrario, cuando la componente micácea se torna predominante, se crea una situación de marcada inestabilidad, volviéndose extremadamente peligrosos especialmente cuando tienen intervalos carbonosos. En los sectores donde predominan estos fenómenos, entre los factores que contribuyen a tan pobre estabilidad, existe también una foliación muy bien desarrollada y una meteorización diferencial que facilita la separación y deslizamiento entre los intervalos.

Los deslizamientos típicos son controlados por la foliación (caída de lajas) y/o deslizamientos rotacionales por alto fracturamiento del material, especialmente en laderas intervenidas. Se puede detectar un progreso deterioro de los taludes hasta verdaderos deslizamientos cuando se está en presencia de un excesivo plegamiento de las capas.

El ángulo de fricción interna de la unidad tiene un promedio de  $18^\circ$  y puede alcanzar en ciertos casos hasta valores de  $30^\circ$ . Estos materiales, cuando presentan condiciones geométricas y geomecánicas favorables, pueden ser aprovechados con bastante éxito, en caso contrario se deberá recurrir a costosas obras de ingeniería para no encontrarse a mediano – largo plazo con problemas de inestabilidad graves. Prueba de esto son las colinas de Santa Mónica, Colinas de Bello Monte, etc., en donde se han intervenido dejando taludes verticales y sub-verticales. Se han encontrado secto-

res en donde el subsuelo presenta calidades muy desfavorables para los sistemas de fundaciones. Por lo general, el desarrollo de estas cavidades está favorecido por la canalización del agua a través de grietas y diaclasas presentes en la roca y en la cual actúa como un disolvente el carbonato de calcio.

#### **2.5.1.4. Unidad Micácea**

Esta unidad litológica, perteneciente a la Formación Las Brisas, está compuesta principalmente por esquistos cuarzo-micáceos además de filitas micáceas, material carbonoso, calizas ocasionales y metareniscas. Se presente con colores verdosos en roca fresca, color marrón madera en afloramientos meteorizados y produce un suelo residual rojizo.

##### Características Geotécnicas

La dinámica de vertientes de la unidad micácea presenta un potencial morfogénico de medio a bajo, permeabilidad moderada con tendencia también moderada a la socavación sub-superficial, capacidad de retención de humedad de media a alta y drenaje superficial difuso.

La zona meteorizada, con espesores que varían entre 19-30 mts., aproximadamente, origina grandes espesores de suelo residual arcilloso. Las bandas micáceas plegadas y paralelas representan zonas de debilidad, actuando como lubricantes a los esfuerzos deformantes. Se tiene escapes de agua de tipo regmático por fracturamiento en las rocas. Presenta resistencia a la excavación de baja a moderada y condición geotécnica variable y a veces muy problemática, especialmente cuando se encuentran sectores con apreciables niveles de meteorización. Los frecuentes deslizamientos son principalmente de tipo rotacional con vestigio de control estructural, especialmente la foliación, y son característicos también los fenómenos de repteo.

Existen sectores en donde el material guarda un equilibrio entre la componente micácea y cuarzosa, de manera que pueden citarse situaciones claramente locales y

de transición, debido a que estos dos elementos se sitúan en polos opuestos en cuanto al comportamiento geotécnico se refiere.

Los ángulos de fricción interna de los materiales oscilan entre 12° y 18° presentando graves problemas de inestabilidad cuando las laderas presentan pendientes mayores a los 25°

#### **2.5.1.5. Unidad Metarenisca**

Corresponde a parte de la Formación las Brisas y está compuesta por metareniscas, metarcosas, gneises cuarzo – feldespáticos frecuentemente intercalados con esquistos micáceos y filitas carbonosas. Se presenta con colores grisáceo – verdosos en roca fresca y gris oscuro en roca meteorizada, produciendo un suelo residual blanquecino y gris.

#### Características Geotécnicas

La dinámica de vertiente de esta unidad tiene una marcada tendencia hacia modificaciones en la conformación del relieve, además presenta una permeabilidad muy alta con fuerte tendencia a la socavación subsuperficial. Tiene una capacidad de retención de humedad muy baja y desarrolla un drenaje superficial difuso sin originar una socavación de cauce.

Por otra parte se desarrollan grandes espesores de meteorización que pueden variar entre los 10 y los 30 mts. de profundidad, conformando al mismo tiempo las áreas más controversiales desde el punto de vista geotécnico.

Esta unidad puede presentarse meteorizada, dura o blanda, altamente meteorizada, hasta nivel de saprolito, produciendo un suelo residual profundo, predominantemente arenoso, y por consiguiente muy inestable.

A la vez pueden localizar sectores muy permeables y muy inestables por saturación del material, especialmente en la estación lluviosa.

#### **2.5.1.6. Unidad Filítica**

Esta unidad pertenece a la Formación Las Brisas y se observa también en la Formación Las Mercedes, se desarrolla en un pequeño sector (sector la Lagunita y filita de Caricua), mientras que encuentra su mayor expresión más al este de la zona de estudio (este de Petare).

Se compone de filitas micáceo – cuarzosas, filitas carbonosas y esquistos cuarzo – micáceos. Este tipo de litología es muy complejo, debido a que en muchos casos se trata de verdaderas intercalaciones, en donde prevalece un material respecto a otro.

Por lo general produce un suelo delgado de meteorización, aunque se presenta muy meteorizada, microplegada y crenulada. Se presenta con diferentes colores, que varían de acuerdo a la composición presente en roca fresca y meteorizada, produciendo por lo general un suelo residual arcilloso amarillento.

#### **Características Geotécnicas**

Esta unidad puede presentar un potencial morfogénico bajo, poca permeabilidad con retención de grandes cantidades de agua en superficie y un sistema de drenaje difuso.

La meteorización puede llegar hasta los 30 mts. de profundidad, conformando laderas poco estables, especialmente cuando son intervenidas. Se observan varios procesos geomorfológicos, como fenómenos de repteo, soliflucción y coladas de tierra.

Los deslizamientos más comunes en estos sectores son de tipo rotacional y de traslación, y frecuentemente están asociados al desarrollo del drenaje.

### **2.5.1.7. Zona de Influencia de la Caliza y Unidad Calcárea**

A lo largo del área estudiada existen sectores en donde afloran cuerpos de calizas o mármoles con un alto contenido de carbonato de calcio (sector Antímamo) y otras con un alto contenido magnésico (sureste de Caracas) que han sufrido un notable grado de intervención debido a explotación (existencia de canteras del material a las cuales fueron y son sometidos).

La caliza de Antímamo puede presentar intercalaciones de esquistos calcáreos – micáceos – carbonosos y anfíbolitas, como también pueden ser capas menores dentro de los esquistos anteriormente señalados.

Por efecto de la alteración química, que originan las aguas servidas, pueden localizarse sitios en donde el deterioro de los materiales alcanza niveles alarmantes. Frecuentemente se manifiestan fenómenos de escapes de agua de tipo regmático y también de tipo kárstico.

Los deslizamientos típicos se presentan con retroceso de las paredes verticales, especialmente en viejas canteras y pueden ocurrir caídas de bloques por el fracturamiento de las rocas. Por las características de los materiales, la excavación es de moderada a difícil.

### **2.5.1.8. Otras Unidades**

Desde el punto de vista geotécnico, por tratarse de pequeños cuerpos aislados, vienen tratadas conjuntamente con las formaciones a las cuales están asociadas. Estas son:

#### **2.5.1.8.1. Anfíbolitas**

Rocas originalmente ígneas máficas (posteriormente metamorfozadas) afines a rocas ecogénicas con abundantes anfíboles y fenocristales de granates rosados.

Se presentan con colores grises a verde claro. Se encuentran asociadas con los mármoles de la Formación Antímamo.

#### **2.5.1.8.2. Serpentinitas**

Rocas ultramáficas (básicamente antigorita) producto de la alteración hidrotermal. Roca de grano fino, masiva, presenta color verde claro y gris claro. Se encuentra frecuentemente en la Formación Las Brisas

### **2.5.2. ANÁLISIS DE GEODINÁMICA EXTERNA**

En el desarrollo de esta fase del estudio se pudieron determinar nueve (9) categorías de formas y procesos cuya clasificación va desde una zona asignada por el número I, de relieve predominantemente plano con procesos geomorfológicos incipientes y, por ende, sin problemas geotécnicos (en un sentido relativo), hasta el extremo de una zona asignada por el número IX, de relieve abrupto, diversos procesos geomorfológicos, de alta intervención antrópica. Referente a los movimientos de masa presentes, estos incluyen: caídas, volcamientos, deslizamientos, y flujos (término que engloba el proceso de reptación y similares).

#### Clasificación:

#### **Tipo Descripción Geodinámica**

##### **Zonas tipo I**

Esta categoría incluye materiales y formas aluviales y coluviales de edad correspondiente al holoceno y pleistoceno superior, rellenos artificiales y terrazas abandonadas que han sido bastante intervenidas urbanísticamente. Aquí los procesos geomorfológicos son incipientes, sin embargo, el medio ambiente natural ha sido altamente intervenido y en algunos sectores dicha intervención se ha manifestado en

forma completamente negativa, por ejemplo: acumulación de sedimentos en el cauce del río Guaire, más contaminantes, etc.

### **Zonas tipo II**

En esta categoría, se encuentran procesos geomorfológicos incipientes que se desarrollan en zonas con buena protección vegetal, además el tipo de escurrimiento superficial es muy difuso, y dado que dichos sectores han sido poco intervenidos, las zonas de erosión mínima natural no han progresado. Tampoco se detectaron movimientos de masas significativos.

Las siguientes categorías corresponden a zonas de transición entre zonas de relativa estabilidad y zonas de inestabilidad latente a inestabilidad total.

### **Zonas tipo III**

En esta categoría se incluyen medios montañosos de erosión natural incipiente por la exposición de la vertiente. Sin embargo, dada una serie de factores, existen riesgos de desequilibrio al intervenir, sobre todo que la erosión natural se convierta en erosión acelerada y genere cárcavas, lo que a su vez crearía socavaciones en las bases de las vertientes y, por lo tanto, diversos tipos de problemas.

### **Zonas tipo IV**

Esta categoría comprende medios montañosos donde la escorrentía superficial difusa ha originado una erosión laminar. A la vez en ciertos sectores la escorrentía superficial ha empezado a ser concentrada, es decir, ha iniciado el proceso de erosión en surcos como consecuencia de que la protección vegetal ha sido intervenida, con el riesgo de generación de cárcavas. Esto significa que hay un desequilibrio latente por la serie de procesos degradantes graves que se pueden desarrollar.

### **Zonas tipo V**

En esta sección se encuentran sectores intervenidos, que han originado una serie de problemas, como: acumulación de sedimentos en drenajes y problemas como erosión acelerada (producto de una vegetación muy intervenida). También se detectaron problemas de movimientos de masa lentos, cicatrices de antiguos deslizamientos, cortes mal efectuados y taludes mal preservados. De hecho existe un precario equilibrio producto de una intervención desordenada.

### **Zonas tipo VI**

En los sectores comprendidos en esta categoría se ubican zonas marginales que de por sí generan grandes cantidades de aguas negras que alteran químicamente el material superficial y subyacente como: suelo, regolito y roca madre, disminuyendo así la resistencia al cizallamiento de los materiales.

### **Zonas tipo VII**

Bajo esta categoría se ubican sectores urbanísticos muy intervenidos arbitrariamente. Se localizan de igual forma, cortes y rellenos mal preservados. Los taludes se encuentran en equilibrio precario dadas las dimensiones de los cortes inadecuados que ellos presentan. El proceso de urbanización altera los procesos naturales, sobre todo en la etapa de construcción cuando el volumen de producción de sedimentos aumenta enormemente, y por supuesto (en época de lluvias) una vez terminada la etapa de construcción aumenta el volumen del agua de escorrentía y sus diversas consecuencias.

Por otra parte la acción del agua afecta al suelo internamente, alterando su resistencia y aumentando su erodabilidad en general.



### **Zonas tipo VIII**

Bajo esta categoría se encuentran procesos de erosión concentrada. Aquí el agua (agente transportador), concentra su acción en surcos, surgiendo así la posibilidad de erosión regresiva. Por una parte la posibilidad de derrumbes en la base de las vertientes aumenta dado los tipos inadecuados de cortes en taludes efectuados, los cuales aumentan la tensión al cizallamiento y por lo tanto los distintos movimientos de masa.

### **Zonas tipo IX**

En esta sectorización se presentan problemas de erosión en cárcavas dado que los diversos sectores han sido altamente intervenidos. La acción removedora y transportadora de material es sumamente alta y la erosión regresiva se manifiesta en el sentido más amplio de la palabra. Debido a que los sectores intervenidos no presentan vegetación protectora, la erosión por salpicadura, dadas las altas pendientes de los taludes, agrava más la situación general.

### **2.5.3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL**

Para la elaboración del mapa estructural se ha tomado en cuenta la información obtenida en labores de campo, las cuales están representadas en 842 mediciones de foliaciones y 1307 mediciones de diaclasas (además de algunas medidas de fallas) y luego se ha analizado de forma estadística el posible comportamiento.

El resultado de dicho análisis ha llevado a separar once (11) sectores estructurales, obtenidos tomando en cuenta las estructuras principales existentes en el área objeto de estudio.

Los sectores obtenidos se clasificaron con las letras A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K y L. aplicando la metodología de proyección hemisférica equiareal, el diagrama de polos y de frecuencia, se obtuvieron once (11) datos de foliación de tipo estadístico, uno (1) para cada sector estructural y treinta y seis (36) datos de diaclasas, también de

tipo estadístico, de los cuales, mediante un análisis adicional, se pudo seleccionar cuatro (4) patrones estructurales comunes a todo el sector central del Área Metropolitana de Caracas.

#### Descripción de los Sectores Estructurales.

##### **2.5.3.1. Sector “A” Unidad Calcárea**

Se computaron 175 mediciones de foliación y 233 de diaclasas. Se puede notar que en este sector la disposición de los polos es bastante regular y determina una foliación promedio (o dato estadístico de foliación), cuyo rumbo y buzamiento es N 50° E y 34° N respectivamente.

En esta unidad se observan pliegues locales que pueden alterar el esquema general asumido. Se han tomado en cuenta ángulos de fricción interna de los materiales comprendidos entre 18° - 30°. Los sistemas de diaclasas se definieron con cierta dificultad, obteniéndose dos (2) patrones evidentes con rumbo N 25° W y N 48° W, con buzamientos subverticales.

La disposición de los polos determina un sector muy fracturado con posibilidad de deslizamiento de tipo rotacional y también deslizamientos en lajas guiados por los planos de foliación.

##### **2.5.3.2. Sector “B” Unidad Calcárea**

En este sector se realizaron 51 mediciones de foliaciones y 114 de diaclasas. Este sector, al igual que el anterior, presenta una concentración bastante regular que permite determinar un patrón de foliación con rumbo N 68° E y buzamiento 44° N., también presenta pliegues locales, por tratarse de la misma unidad litológica se deben considerar los mismos ángulos de fricción comprendidos entre 18° y 30°. La foliación define un patrón estructural promedio de N 25° W y subvertical.

#### **2.5.3.3. Sector “C” Unidad Calcárea**

Se hicieron 36 observaciones de foliaciones y 36 de diaclasas. Se define una foliación promedio N 44° E y 45° N y un patrón de diaclasado poco disperso, pero con tendencia a un rumbo N 18° W y buzamiento 82° S.

#### **2.5.3.4. Sector “D” Unidad Calcárea y Metarenisca**

Se realizaron 121 mediciones de foliaciones y 300 de diaclasas. Se determinó el patrón de foliación N 64° E y buzamiento 29° N. Estructuralmente hablando, este sector abarca el flanco norte del anticlinal de Baruta. Es posible que presente pliegues locales. El sistema de diaclasado es muy complicado y presenta un alto grado de fracturación. La asociación del elemento estructural y litológico (alta fracturación y mayores espesores de meteorización) determina una mayor ocurrencia de los deslizamientos de tipo rotacional.

#### **2.5.3.5. Sector “E” Unidad Micácea y Metarenisca**

Se realizaron 142 observaciones de foliaciones y 130 de diaclasas. Este sector es una prolongación del sector D, por lo tanto tiene un comportamiento similar, en este sector se obtuvo una foliación promedio de rumbo N 82° E y buzamiento 36° N. Prevalece un sistema de diaclasado que presenta ángulos de buzamiento altos. Es probable observar deslizamientos de tipo mixto.

#### **2.5.3.6. Sector “F” Unidad Micácea**

Se realizaron 52 observaciones de foliación y 60 de diaclasas. Este sector presenta una litología más uniforme que los anteriormente descritos. Tiene un rumbo promedio de N 68° E y 44° N como buzamiento. El patrón de foliación es bastante marcado.

En las diaclasas prevalece uno de los sistemas principales de toda el área de estudio, de rumbo N 26° W y buzamiento vertical, además presenta los sistemas N 24° E y N 70° E, que también tiene buzamiento vertical, y un sistema presente, pero menos marcado, el de rumbo N 38° W y buzamiento 65° S. Debido a los múltiples sistemas de diaclasas se puede deducir que este sector presenta un comportamiento complicado, con una mayor ocurrencia de deslizamientos de tipo rotacional y mixto.

#### **2.5.3.6. Sector “G” Unidad Filítica – Micácea y Metarenisca**

Con 119 observaciones de foliación y 47 de diaclasas, presenta tres litotipos distintos: el filítico, el micáceo y la metarenisca. Presenta distintos espesores de meteorización entre los litotipos, lo cual genera diferentes respuestas a los fenómenos gravitacionales. Existe un patrón bastante marcado de la foliación promedio que tiene rumbo y buzamiento de N 76° W y 26° S. En cuanto a los sistemas de diaclasas, presenta un sistema muy complejo, lo cual implica que en el sector se pueden originar movimientos gravitacionales muy complejos, sin embargo el patrón más marcado es de rumbo N 74° E y es vertical.

#### **2.5.3.6. Sector “H” Unidad Micáceo – Calcárea**

En este sector se hicieron 47 mediciones de foliación y 83 de diaclasas y en el mismo se enumeran distintos tipos litológicos, como son: esquistos de la unidad micácea, los de la unidad calcárea y capas de calizas que pertenecen a la Formación Antemano. Además este sector presenta una fuerte intervención antrópica de tipo marginal y de tipo explotadora. La foliación no es muy marcada, presenta pliegues locales y el diaclasado es muy disperso, aunque con ángulos de buzamiento alto. Presenta deslizamiento de tipo rotacional y mixto.

#### **2.5.3.7. Sector “J” Unidad Calcárea**

Se realizaron 25 mediciones de foliación y 69 de diaclasas. Este sector pertenece al flanco sur del sinclinal de El Cementerio. Presenta pliegues y fallamientos loca-

les. Su rumbo de foliación promedio es N 66° E y 36° S de buzamiento. Persiste una alta fracturación de los materiales, con tendencia N – S y N 20° W, ambos subverticales. Puede presentar deslizamientos rotacionales y mixtos.

#### **2.5.3.8. Sector “K” Unidad Calcárea**

Se realizaron 49 observaciones de foliación y 176 de diaclasas. Presenta un patrón de foliación promedio muy marcada de N 60° E y 28° N de buzamiento. Presenta un diaclasado muy disperso y con alto buzamiento, lo que permite la ocurrencia de deslizamientos de tipo rotacional y de cuña.

#### **2.5.3.9. Sector “L” Unidad Calcárea**

Para este sector se realizaron 25 mediciones de foliación y 58 de diaclasas. Este sector representa la prolongación del flanco sur del anticlinal de El Junquito, pero a diferencia del sector H, la litología es mucho más uniforme y la intervención antrópica es incipiente. Los materiales se presentan con un patrón de foliación bastante marcado cuyo rumbo y buzamiento promedio es respectivamente N 46° E y 23° N. Presenta un diaclasado muy disperso, siendo el más marcado N 25° W y vertical. Puede presentar deslizamientos de tipo rotacional a causa del diaclasado.

## 2.6. ANTECEDENTES

En Venezuela se han realizado diversos estudios que buscan zonificar el riesgo causado por factores de índole geológicos, geotécnicos, dinámicos, estructurales, climáticos y naturales, investigaciones éstas que fueron realizadas en varias ciudades de la República, incluyendo el Distrito Capital entre dichas localidades. El Distrito Metropolitano de Caracas ha sido objeto de diversos estudios referentes a zonificación de riesgo, la mayoría de los cuales, como sucede en otras ciudades, han sido ejecutados por de empresas privadas. A continuación se mencionan los principales estudios concernientes al tema.

2.6.1 VI Congreso Geológico Venezolano, “**Estudio Geotécnico del Distrito Metropolitano de Caracas, Sector Central**” Estudio Culminado por FELICIANI, P., DELUCA, P.; BARRIENTOS, C.; BASTARDO, S.; RAMIREZ, R. Este es el principal antecedente de esta investigación, dicho trabajo empezó a mediados de los años 70, patrocinado inicialmente por el Ministerio de Energía y Minas (MEM), y dirigido inicialmente por el geólogo DÍAZ Q., A., quien tenía a su mando un grupo de especialistas en la materia, a este grupo se le unió el profesor SINGER, A., a finales de la década de 1970, a falta de presupuesto el estudio fue pausado para ser culminado en 1985, por un grupo de profesionales en el área de geología, geofísica, y ramas afines. En este trabajo se presentó una macro y microzonificación geotécnica de la región que se estudió, para lo cual se integraron varios factores geológicos y geotécnicos.

2.6.2 IV Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Barquisimeto, Venezuela. “**Análisis de Amenaza Sísmica para Caracas, Incluyendo Efectos de Sitio**” Realizado por ASUAJE, J. Y HERNÁNDEZ, J. (2005). Este estudio trata acerca de la amenaza causada por factores sísmicos, que está presente en el Distrito Metropolitano de Caracas, y menciona los antecedentes sísmicos de la región.

2.6.3 FUNVISIS, IV Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Barquisimeto “**Estudio de Deslizamientos de Laderas Activadas por Acción Sísmica en Caracas**” ZAMBRANO, H.; HERNANDEZ, J. (2005). Este estudio presenta los efectos producidos por la actividad sísmica en la región de estudio, además de atribuirle grados de riesgo a movimientos de masa, debido a la intensidad sísmica presente.

2.6.4 V Congreso Geológico Venezolano “**Síntesis Regional de la Evolución Geomorfológica de la Cordillera de la Costa en el Área de Caracas**”, SINGER, A. (1977). Este estudio es el aporte de mayor importancia referente a geomorfología del Distrito Metropolitano de Caracas, aunque no es el más detallado, tiene las características geomorfológicas más importantes.

2.6.5 II Jornadas Geológica Venezolanas “**Inventario de Riesgos Geológicos y Seguridad Geotécnica**” SINGER, A. (1983). Este trabajo contiene los movimientos de masa reportados y compilados por el organismo de Protección Civil y el Cuerpo de Bomberos. A partir de este inventario se obtienen los procesos geomorfológicos presentes en el Distrito Metropolitano de Caracas, siendo éstos claves para cualquier análisis de geodinámica externa.

Los antecedentes antes mencionados son los principales usados en este trabajo, a pesar de que existen muchos más que también aportaron ayuda en la realización del presente estudio.

## CAPÍTULO III

### Marco teórico

#### 3.1 Movimientos de remoción en masa

3.1.1. Derrumbes

3.1.2. Vuelcos o Volcamiento.

3.1.3. Deslizamientos.

3.1.4. Flujos.

3.1.5. Desprendimientos o Derrumbes

3.1.6. Avalanchas rocosas

3.1.7. Desplazamientos Laterales

3.1.8. Movimientos Complejos

#### 3.2 Factores que controlan la estabilidad de las laderas

3.2.1. Factores de Susceptibilidad

3.2.2 Factores de Disparo

3.2.3 Clasificación según el comportamiento geomecánico de los suelos

#### 3.3 Zonificación de la susceptibilidad o amenaza por movimientos de masa

3.3.1 Definición de Términos



3.3.2 Escala de trabajo

3.3.3. Técnicas de análisis para el modelado de la susceptibilidad

3.3.4. Metodología propuesta por Mora y Vahrson:

3.3.5 Precisión y objetividad

3.3.6 Uso de los sistemas de información geográficos en el modelado de la susceptibilidad y/o amenaza

## MARCO TEÓRICO

### 3.1 Movimientos de remoción en masa

La confusión en el empleo de esta terminología ha resultado de la incorporación y evolución en las ideas de diferentes especialistas en la materia desde hace algunas décadas. El origen del término movimiento de remoción en masa (mass movement) se remonta a las aportaciones de Penck (1894), quien hace la distinción entre este término (mass movement) y transporte de una masa (mass transport). El primer término se refiere a los movimientos originados bajo la influencia de la gravedad y sin el empleo de transporte alguno, en tanto que el segundo considera el material transportado por agentes como el agua, el aire y el hielo. Sharpe define un landslide como un movimiento perceptible ladera abajo de una masa relativamente seca de tierra, roca o de una mezcla de ambas, a través de un mecanismo de deslizamiento o desprendimiento (Sharpe, 1938). Terzaghi, el padre de la mecánica de suelos, centra su definición en un desplazamiento rápido de una masa de roca, suelo residual o sedimentos de una ladera, en el cual el centro de gravedad de la masa que se desplaza se mueve hacia abajo y hacia el exterior (Terzaghi, 1950). Tiempo después, Varnes especifica que este movimiento hacia abajo de los materiales formadores de las laderas puede incluir materiales naturales y artificiales (Varnes, 1958). Zaruba y Mencl hablan de un movimiento rápido de rocas en deslizamiento, las cuales están separadas por un plano definido en posición estacionaria infrayacente (Zaruba y Mencl, 1969). Skempton y Hutchinson definen el término deslizamiento (landslide) como un movimiento de ladera abajo de masas de suelo o roca, que ocurre en una superficie de cizallamiento en los límites de la masa desplazada (Skempton y Hutchinson, 1969). Para Gary y colaboradores (1972), la palabra landslide es un término general que considera una gran variedad de formas y procesos de remoción en masa, las cuales involucran el transporte gravitacional a una velocidad de moderadamente rápida a rápida, de un cuerpo de suelos o rocas ladera abajo, la cual no siempre ocurre sobre una superficie

de deslizamiento. Por otro lado, de acuerdo con Coates, un landslide representa una categoría de fenómenos incluidos dentro de los movimientos de remoción en masa, en los cuales la gravedad es la principal fuerza involucrada (Coates, 1977). Este tipo de movimiento debe ser moderadamente rápido y puede incluir desprendimiento, deslizamiento y flujo. La superficie del movimiento no es idéntica a un plano de falla y este debe ocurrir ladera abajo. El material desplazado tiene límites bien definidos y puede incluir partes de regolito y de la roca madre. Finalmente, Brunsten opta por el término proceso de remoción en masa e indica que este sirve para definir aquellos movimientos ladera abajo que no requieren el transporte de un medio como el agua, el aire o el hielo (Brunsten, 1979).

El análisis de los conceptos anteriores y de la literatura anglosajona de este tipo de procesos pone en relieve el uso que se le da a la palabra landslide - deslizamiento- como sinónimo de movimientos de ladera. Sin embargo, en español esto trae consigo una confusión e impide el uso correcto de los términos que corresponden a cada proceso, dependiendo del mecanismo de movimiento y del material involucrado. Dado lo anterior, se propone traducir el término landslide como "movimiento del terreno", acepción que tiene un carácter más informativo y preciso, y cuyo término es análogo a la traducción que se hace de la palabra del inglés al francés, mouvement de terrain. De esta manera, la terminología empleada hará posible diferenciar cada tipo de proceso e interpretar correctamente su significado.

Los procesos de remoción en masa se refieren al movimiento de masas de suelo, detritos o roca de los taludes, pudiendo actuar la gravedad y/o algún medio de transporte, cualquiera que sea el mecanismo particular del movimiento. Los procesos de remoción en masa ocurren cuando las fuerzas externas o motoras exceden a las fuerzas internas o resistentes.

Tanto los procesos de remoción en masa como los de erosión y desborde de los arroyos y ríos, constituyen fenómenos naturales en la evolución del relieve, que pueden generar grandes pérdidas materiales e incluso humanas. Es por ello que la

identificación de los sectores donde tienen lugar, así como también la comprensión de los factores que los controlan, son de fundamental importancia para una correcta planificación territorial.

Existen cuatro tipos principales de procesos de remoción en masa: derrumbes, deslizamiento, volcamientos y flujos. Cada uno de éstos se subdivide más detalladamente, pero existen varias clasificaciones de este fenómeno, siendo una de la más detallada la utilizada por Hutchinson.

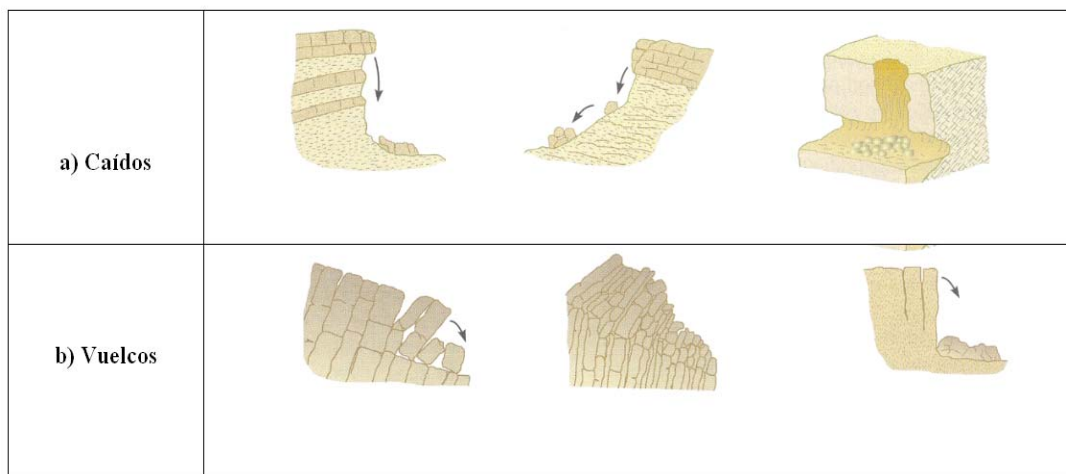
### 3.1.1. Derrumbes

Según el U.S. Geological Survey, en su pagina <http://landslides.usgs.gov/>, Los movimientos gravitacionales son aquellas caídas de fragmentos de rocas por causas inherentes a la fuerza de gravedad, siendo no solo provocados por efectos gravitacionales, sino por propiedades de la roca (estructuras y litología) y por acción de fluidos como el agua. Entre los movimientos más comunes están: caída de bloques, flujo de lodo, flujo de detritos, licuación de terreno, entre otros. La caída de bloque es un movimiento típicamente gravitacional en el cual se desprenden trozos de roca de laderas o taludes muy inclinados, provocados por factores estructurales como las diaclasas. Un flujo de lodo es un desplazamiento de roca, tierra y otros detritos muy saturados de agua, y se desarrolla cuando el agua rápidamente se acumula en el terreno como sucede durante una fuerte lluvia o un descongelamiento repentino. Este movimiento puede trasladarse rápidamente en distancias de varios kilómetros desde su origen, creciendo en velocidad y arrastrando árboles, peñascos, carros y cualquier material que consiga a su paso. Su composición es principalmente un 50% de partículas finas (limo y arcilla). El flujo de detritos posee grandes cantidades de sedimentos y son frecuentemente producidos por derrumbes que se mezclan con flujos de aguas. Estos fenómenos generalmente siguen cauces, pero su patrón exacto es impredecible, tiene granos más gruesos y es menos cohesivo que los flujos de lodo. La proporción es de 2 partes de sedimento por una de agua. La licuación de terreno ocurre cuando

el nivel freático está muy por encima de su límite y aunado a esto, ocurre un movimiento telúrico que literalmente “hunde” el terreno. (Fig. 3.1.1).

### 3.1.2. Vuelcos o Volcamiento.

Un vuelco o desplome consiste en la rotación de una masa de suelo, detritos o roca en torno a un eje o pivote determinado por su centro de gravedad. Su movimiento es hacia adelante o hacia la parte externa, por lo cual involucra inclinación o basculamiento, pero no implica colapsamiento. Frecuentemente ocurren en una o más superficies, en materiales que poseen un sistema de discontinuidades preferenciales como diaclasas, grietas de tensión o superficies columnares (Fig. 3.1.1).



**Figura 3.1.1. Movimientos de remoción en masa. a) Tipos de Caídos. b) Tipos de Vuelcos (González de Vallejo, 2002)**

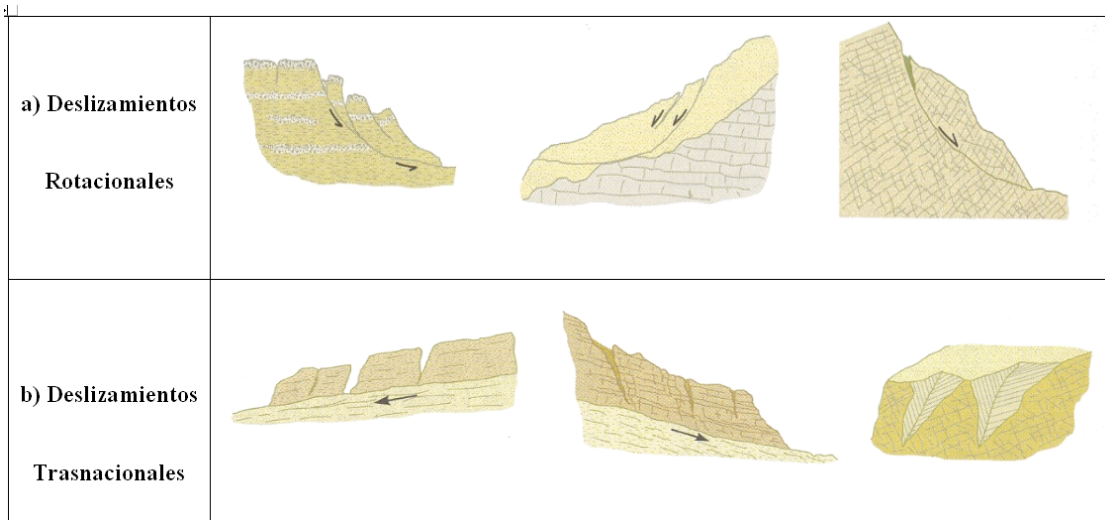
### 3.1.3. Deslizamientos.

Según Irasema Alcántara (2000), los deslizamientos son movimientos laterales abajo de una masa de suelo, detritos o roca, la cual ocurre sobre una superficie de ruptura reconocible. Con frecuencia, la formación de grietas transversales es la primera señal de la ocurrencia de este tipo de movimientos, las cuales se localizan en la zona que ocupa el escarpe principal. La superficie de ruptura define el tipo de deslizamiento. Los deslizamientos traslacionales son menos profundos que los rotacionales,

y al igual que los planos, involucran un movimiento paralelo a la superficie, el cual esta en gran medida controlado por superficies de debilidad de los materiales formadores. Son movimientos relativamente rápidos en los cuales la masa de suelo o roca se mueve a lo largo de una o más superficies bien definidas y que definen la geometría del deslizamiento (Fig. 3.1.2).

3.1.2.a) Deslizamiento rotacional. Se presenta por corte sobre una superficie de falla curva (circular o lítrica) y el movimiento se presenta a moderada velocidad (Figura 3.1.2 a).

3.1.2.b) Deslizamiento traslacional. Se presenta a lo largo de una superficie relativamente plana, en taludes formados por materiales secos y sin cohesión que yacen con una inclinación mayor a su ángulo de reposo, en suelos o en rocas. También se observa en rocas masivas cortadas por discontinuidades, tales como: estratificación, fallas, fracturas o discordancias. Cuando el movimiento se presenta a través de la línea de intersección de dos discontinuidades el mecanismo de movimiento se denomina “por cuña” (figura 3.1.2 b).



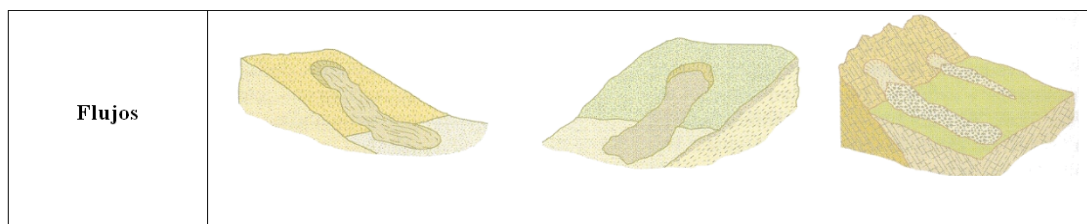
**Figura 3.1.2. Movimientos de remoción en masa. a) Deslizamientos rotacionales; b) Deslizamientos trasnacionales (González de Vallejo, 2002)**

### 3.1.4. Flujos.

Son movimientos plásticos o fluidos, en agua y raramente en aire, en los cuales la masa se rompe y fluye durante el movimiento. En muchos casos este proceso comienza como caída, deslizamiento o volteo y posteriormente es transformado en flujo (Fig.3.1.3).

Existen varios subtipos entre los que se encuentran: 1) Reptación, 2) Solifluxión, 3) Flujo de lodo, 4) Flujos de detritos y 5) Avalanchas.

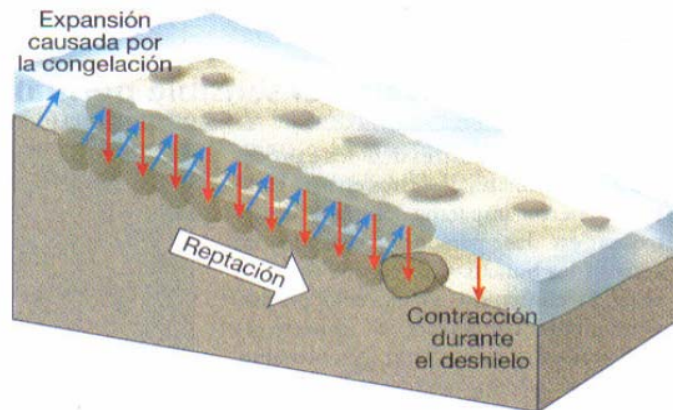
Movimientos complejos. Se refiere a la combinación de dos o más mecanismos de movimiento.



**Figura 3.1.3 Movimientos de remoción en masa. Flujos (González de Vallejo, 2002)**

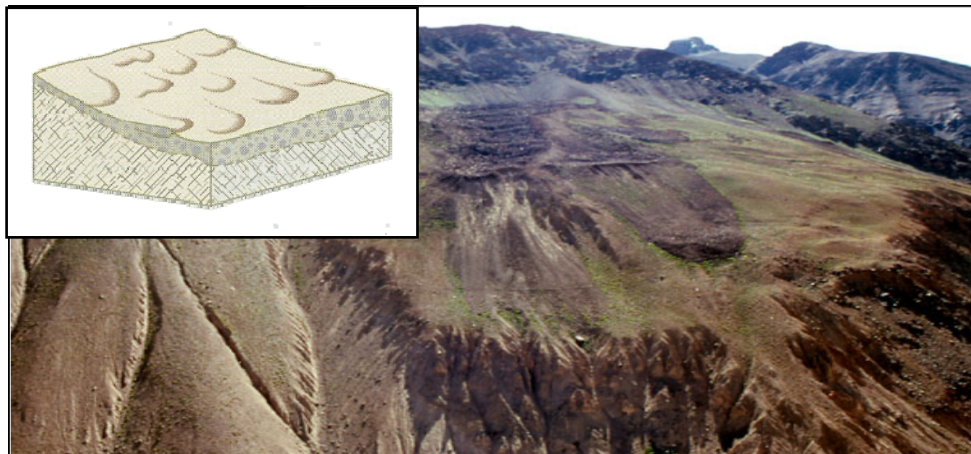
- 3.1.4.1. Reptación. Según Tarbuck y Lutgens (2001) es un tipo de proceso gravitacional que implica el movimiento descendente gradual del suelo y el regolito. Una de las causas principales de reptación es la expansión y contracción alternativas del material de superficie causadas por congelación y deshielo o por humectación y sequía. La congelación o la humectación elevan las partículas según un ángulo recto con respecto a la pendiente, y el deshielo o la sequía permiten que las partículas vuelvan a caer a un nivel ligeramente inferior. Cada ciclo, por consiguiente, mueve el material una cierta distancia colina abajo. La reptación puede iniciarse también si el suelo se satura de agua. Después de una intensa lluvia o del deshielo, el suelo saturado de agua puede perder su cohesión interna, permitiendo que la gravedad empuje el material pendiente abajo. Dado que este fenómeno es imperceptiblemente lento, en el proceso no puede detectarse movimien-

to. Lo que puede observarse, sin embargo, son los efectos, los cuales generan una inclinación en los cercados, tendidos eléctricos, y además pueden desplazar muros de contención (Figura 3.1.4).



**Figura 3.1.4 Reptación. La expansión y contracción repetidas del material de superficie produce una migración pendiente debajo de las partículas de roca (Tarbuck y Lutgens, 2001).**

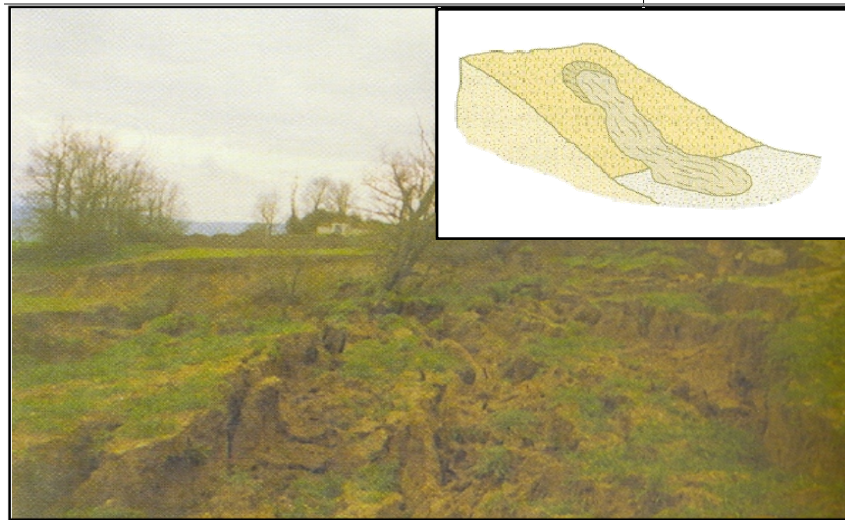
- **3.1.4.2. Solifluxión** Tarbuck y Lutgens (2001) describen este fenómeno como una forma de reptación en la cual el material no consolidado y saturado de agua se mueve lentamente, pendiente abajo. Se produce en una zona situada por encima del permafrost denominada *capa activa*, que se derrite en verano y se vuelve a congelar en invierno (Figura 3.1.5).



**Figura 3.1.5 Solifluxión. (<http://alerce.cnice.mecd.es/~mala0017/>).**



- **3.1.4.3. Flujo de lodo.** Se dan en materiales predominantes finos y homogéneos, y su velocidad puede alcanzar varios metros por segundos. La pérdida de resistencia suele estar motivada por la saturación de agua. Se clasifican según el tipo de material, las características resistentes y su contenido de agua. Los flujos de barro generalmente presentan pequeñas magnitudes, pero en ocasiones, sobre todo en condiciones de saturación, pueden ser muy extensos y rápidos. Los depósitos de materiales finos volcánicos, por sus propiedades físicas y geomecánicas son especialmente susceptibles a este tipo de procesos (Figuras 3.1.6 y 3.1.7)



**Figura 3.1.6 Cabecera de un flujo de barro desencadenado por precipitaciones (González de Vallejo, 2002).**



**Figura 3.1.7 Pie de un flujo de barro (González de Vallejo, 2002).**

### 3.1.5. Desprendimientos o Derrumbes

Son caídas libres muy rápidas de bloques o masa rocosas independizadas por planos de discontinuidades preexistentes (tectónicos, superficies de estratificación, grietas de tracción, etc.).

Son frecuentes en laderas de zonas montañosas escarpadas, en acantilados y, en general, en paredes rocosas, siendo usuales las roturas en forma de cuña y en bloques formados por varias familias de discontinuidades. Los factores que los provocan son la erosión y la pérdida de apoyo o descalce de los bloques previamente independizados o sueltos, el agua en las discontinuidades o grietas, las sacudidas sísmicas, etc. (Figura 3.1.8). Pueden también darse desprendimientos de masas de suelos en taludes verticales, generalmente a favor de grietas de tracción, generadas a causa del estado en la tensión o de grietas de retracción por desecación del terreno.

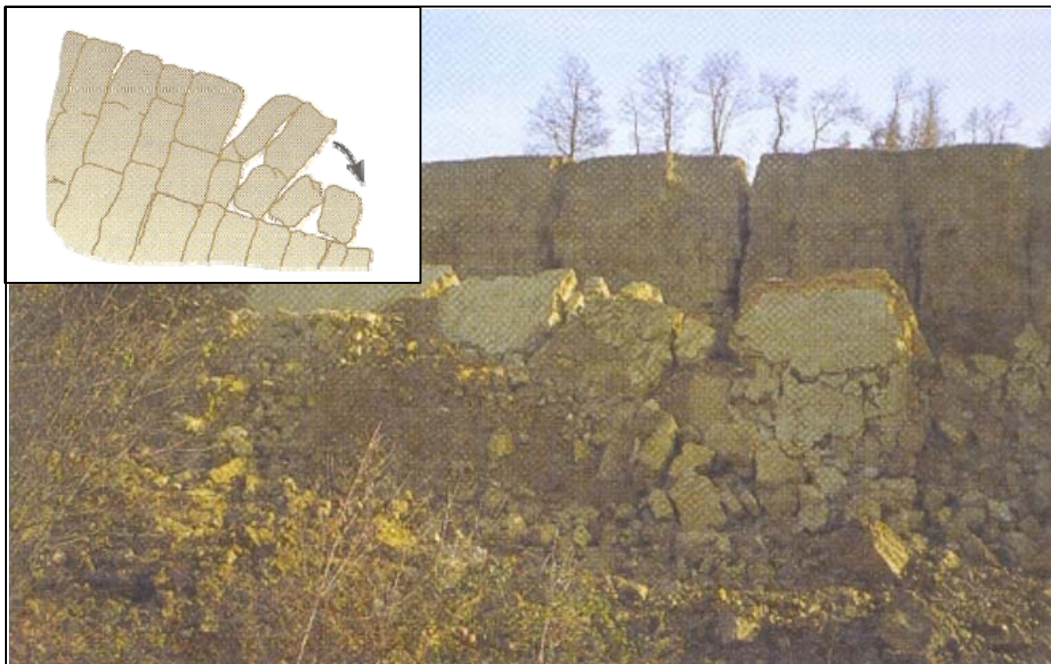


**Figura 3.1.8 Desprendimiento rocoso en la vía Puerto Cruz – Colonia Tovar (Cano, 2005).**

### 3.1.6. Avalanchas rocosas

Estos procesos, considerados como desprendimientos son muy rápidos, con caídas de masas de rocas o derrubios que se desprenden de laderas escarpadas.

Las masas rocosas se fragmentan y pulverizan durante la caída, dando lugar a depósitos con una distribución caótica de bloques, con tamaños muy diversos, sin estructura, prácticamente sin abrasión, y con gran porosidad (Figura 3.1.9).



**Figura 3.1.9 Vuelco de rocoso (González de Vallejo, 2002).**

Las avalanchas son generalmente el resultado de desprendimientos de gran magnitud, que por lo elevado de la pendiente y la falta de estructura y cohesión de los materiales, descienden a gran velocidad ladera abajo en zonas abruptas, pudiendo superar los 100 km/h, incluso si la masa está completamente seca, por la disminución de la fricción a que da lugar la presencia de aire entre los materiales y fragmentos rocosos desplazados (Figura 3.1.10). El agua de precipitación o deshielo, los movimientos sísmicos y las erupciones volcánicas pueden jugar un importante papel en el desencadenamiento de estos procesos. Las avalanchas de derrubios están formadas por mate-

rial rocoso muy heterométrico, pudiendo incluir grandes bloques y abundantes finos; los depósitos morrénicos constituyen un material propenso para estos procesos, así como las acumulaciones de materiales procedentes de erupciones volcánicas. La diferencia con los flujos de derrubios, además de la presencia de agua (no necesaria en las avalanchas) es la rapidez del proceso y la velocidad que alcanza la masa en zona con pendiente elevada.

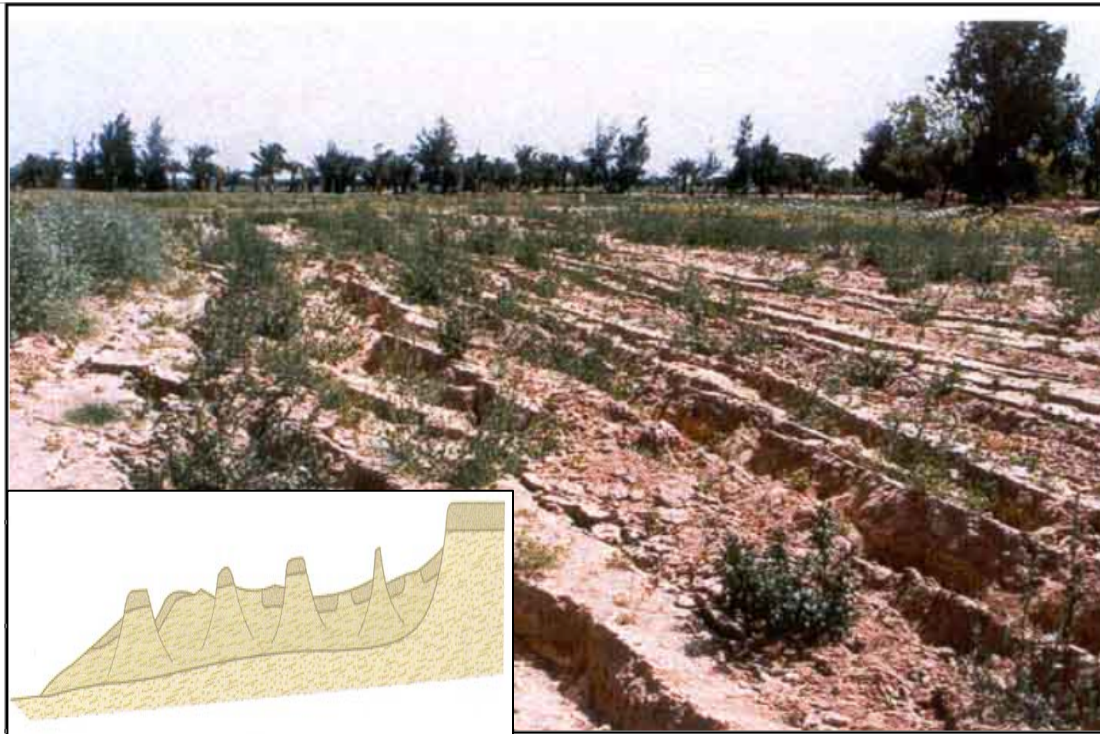


**Figura 3.1.10** Avalancha en Vargas en el año 1999 (Cano, 2005).

### 3.1.7. Desplazamientos Laterales

Este tipo de movimiento de remoción en masa (denominado también *lateral spreading*) hace referencia al movimiento de bloques rocosos o masas de suelo muy coherente y cementado sobre un material blando y deformable (Figura 3.1.11). Los bloques se desplazan muy lentamente a favor de pendientes muy bajas. Los movimientos

son debidos a la pérdida de resistencia del material subyacente, que fluye o se deforma bajo el peso de los bloques rígidos.



**Figura 3.1.11 Desplazamiento Lateral**

[http://home.iitk.ac.in/~javed/photogallery/bhuj\\_eqke\\_files/slide0012\\_image037.jpg](http://home.iitk.ac.in/~javed/photogallery/bhuj_eqke_files/slide0012_image037.jpg)

Los desplazamientos laterales también pueden ser provocados por licuación del material infrayacente, o por procesos de extrusión lateral de arcillas blandas y húmedas, bajo el peso de las masas superiores. Se dan en laderas suaves y pueden ser muy extensos.

### 3.1.8. Movimientos Complejos

Se les denomina complejos debido a que se producen por una combinación de dos o más tipos de movimiento de remoción en masa (Suárez, 1998).

## **3.2. Factores que controlan la estabilidad de las laderas**

Los factores que controlan los movimientos de las laderas son aquellos capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno. Existen diversas clasificaciones de estos factores. Mora y Vahrson (1993), Soeters y Van Westen (1996) distinguen sólo dos tipos de factores, los de susceptibilidad y los de disparo, que son los que desarrollaremos a continuación.

### 3.2.1. Factores de Susceptibilidad

Aquellos que intrínsecamente forman parte de las propiedades y comportamiento del medio, es decir, que constituyen los elementos pasivos. Tal es el caso del relieve del terreno, su constitución geológica y las condiciones naturales de humedad.

- **Topografía:** Son las características morfológicas de la superficie terrestre. En el proceso de los movimientos de masa, interesan parámetros como la pendiente, altura y extensión de la ladera, estas nos dan una idea del grado de equilibrio de los materiales que la componen. Las regiones montañosas son las más propensas a sufrir movimientos de ladera, no obstante, puede suceder que en pendientes muy bajas, de algunos grados, tengan lugar algunos tipos de inestabilidades
- **Caracterización Geológica:** el tipo de material que se encuentre en la ladera, sus propiedades químicas y físicas, resistencia a los esfuerzos y su modo de evolución a cada ambiente natural; incluye las estructuras de los materiales del sitio, fracturas, fallas, pliegues, planos de estratificación y foliación, y como éstos pueden favorecer o no los procesos de inestabilidad y por último la capacidad de drenaje de los materiales y el grado de meteorización de los materiales (Medina, 1991; Mora y Vahrson, 1993)
- **Contenido de Humedad:** este tiene la capacidad de acelerar la meteorización y disminuir la resistencia mecánica de los suelos. Deben estudiarse la intensidad, frecuencia y magnitud de precipitaciones; la acción de la escorrentía superficial, subterránea y la infiltración, en general, todos los procesos de carácter climático

e hidrológico presentes en la ladera, que afectan su contenido de humedad (Medina, 1991; Mora y Vahrson, 1993).

En regiones lluviosas, como la mayor parte de nuestro territorio, es frecuente la presencia de importantes espesores de materiales meteorizados sobre los sustratos rocosos y con niveles freáticos elevados que influyen decisivamente en las condiciones de estabilidad. El agua juega un doble papel negativo: reduce la resistencia la corte por la generación de presiones intersticiales y por la reducción de los parámetros resistentes en determinados tipos de suelos y aumenta los esfuerzos de corte por incremento del peso del terreno y por la generación de fuerzas desestabilizadoras en grietas y discontinuidades.

Diversos factores de tipo hidrometeorológico afectan la estabilidad de las laderas. Cuando la precipitación cae sobre una ladera un porcentaje de ella es interceptado por la vegetación, otro se almacena en las depresiones para luego infiltrarse; el proceso de infiltración continúa aún después que cesa la lluvia y en algún momento pueden crearse condiciones críticas, ya que la humedad del suelo y la posición del nivel freático han aumentado, incrementando la presión de poros, disminuyendo los esfuerzos efectivos y, por consiguiente, la resistencia al esfuerzo cortante. Entonces se pueden alcanzar los umbrales de inestabilidad que disparan el movimiento de una parte o toda la ladera (González y Millán, 1998).

### 3.2.2 Factores de Disparo

Son los que inducen desde el exterior, un comportamiento dinámico activo que, a partir de las condiciones iniciales generarán, con mayor o menor intensidad, los fenómenos de movilización.

Los factores de disparo son las variables decisivas en la activación de los movimientos de masa, desencadenando movimientos, aún en una ladera en equilibrio. Aunque se tratarán con mayor detalle la vibración sísmica y las lluvias, se hará una

breve descripción de otros mecanismos de disparo como son la actividad antrópica y sísmica.

- **Acciones Antrópicas:** Las actuaciones humanas ocupan un lugar importante dentro de los factores que modifican las condiciones y fuerzas que actúan sobre las laderas. La acción del hombre sobre las laderas pueden clasificarse en cuatro tipos:

*Cambios en la topografía y cargas del talud:* ocasionados por la extracción de suelos y rocas para la construcción; aumento del peso de la ladera debido a los procesos de urbanismo o rellenos ineficientes y por los efectos de la actividad subterránea, como la minería.

*Cambios en las condiciones de humedad:* debido a la alteración de los drenajes naturales por la construcción de zanjas y canales; alteración de los drenajes subterráneos y la presencia de infiltración y aumento de aguas superficiales por la deficiente instalación de acueductos y alcantarillado.

*Vibraciones:* en la construcción de carreteras e infraestructura; explosiones, transporte y movimiento de maquinaria pesada, que producen vibración en la ladera desestabilizándola.

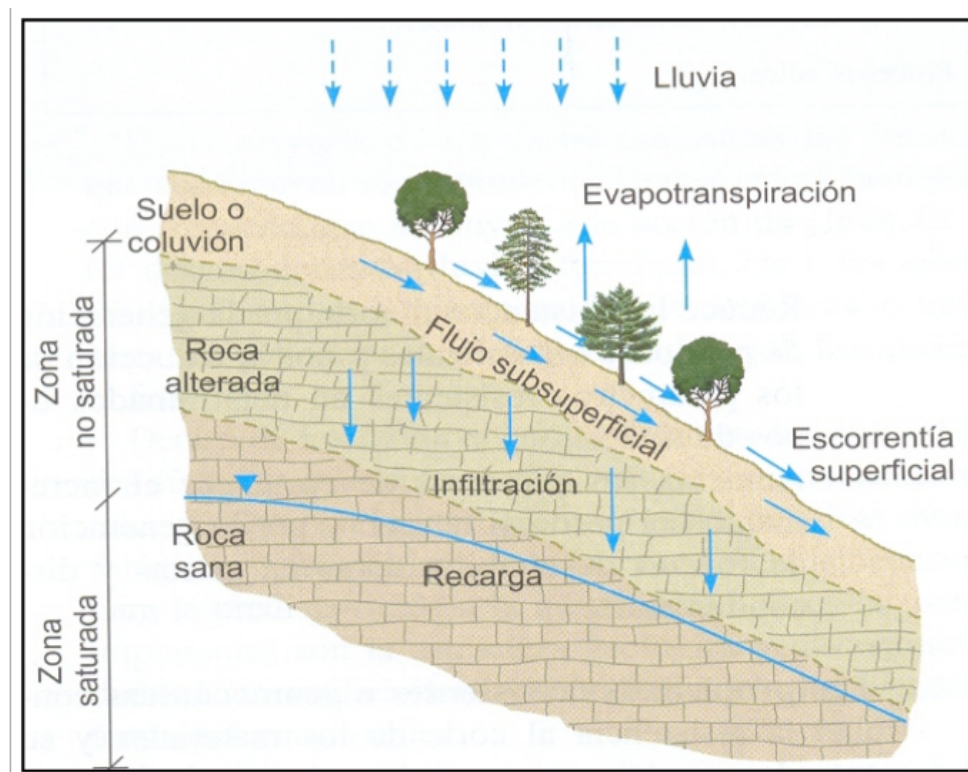
*Cambios en la cobertura vegetal:* se manifiesta en los procesos de deforestación; prácticas agrícolas y ganaderas inadecuadas y en modificaciones en el uso del suelo que resultan perjudiciales para la ladera.

- **Precipitaciones:** El desencadenamiento de los movimientos de ladera por causas meteorológicas y climáticas está relacionado fundamentalmente con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones y con el régimen climático. En consecuencia, debe considerarse la respuesta del terreno a precipitaciones intensas durante horas o días, y la respuesta estacional (épocas secas y lluviosas a lo largo del año) o plurianual (ciclos húmedos y de sequías).



El agua en el terreno da lugar a presiones que alteran los estados tensionales, por presiones intersticiales y aumento del peso, da lugar a procesos de erosión interna y externa, así como a cambios mineralógicos, aspecto todos ellos que modifican las propiedades y resistencia de los materiales sobre todo en los suelos.

La infiltración del agua de lluvia produce flujos subsuperficiales y subterráneos en las laderas, el aumento del contenido en agua de la zona no saturada y la elevación del nivel freático, recargando la zona saturada (Figura 3.2.1).



**Figura 3.2.1 Esquema de circulación de agua en una ladera (González de Vallejo, 2002).**

La cantidad de agua que se infiltra en el terreno depende de la intensidad y duración de la lluvia, tamaño de la cuenca de captación, contenido previo de agua en el terreno (posición del nivel freático y grado de saturación), de su permeabilidad y transmisividad y de la topografía y otras características de las laderas, como la presencia de vegetación.

Dependiendo de estos factores, se generan estados de desequilibrio que pueden dar lugar a la inestabilidad de las laderas.

- **Actividad Sísmica:** diversos autores han estudiado los movimientos de masa inducidos por sismos, intentando establecer relaciones entre los parámetros sísmicos y la distribución de los movimientos de masa disparados, usando para esto bases de datos de terremotos a los cuales se les ha documentado los procesos de inestabilidad generados.

Los parámetros sísmicos más usados en estas relaciones son: la magnitud y la aceleración.

*La magnitud:* C. Richter definió, en 1935, el concepto de "magnitud" pensando en un parámetro que describiera, de alguna manera, la energía sísmica liberada por un terremoto. *La magnitud de Richter* o *magnitud local*, indicada usualmente por  $M_L$ , está definida como el logaritmo (base 10) de la máxima amplitud ( $A_{max}$ , medida en cm) observada en un sismógrafo Wood-Anderson estándar (un sismógrafo de péndulo horizontal muy sencillo), menos una corrección por la distancia ( $D$ ) entre el epicentro y el lugar de registro, correspondiente al logaritmo de la amplitud ( $A_0$ ) que debe tener, a esa distancia, un sismo de magnitud cero:

$$M_L = \log(A_{max}) - \log A_0(D).$$

*Aceleración sísmica:* la aceleración sísmica es una medida instrumental de la intensidad del terremoto, expresada en porcentaje de la gravedad terrestre, registrada en acelerógrafos, cuyos registros muestran la aceleración del terreno en función del tiempo (Bolt, 1981; Sauter, 1989) en Aguilar y Mendoza (2002). La aceleración máxima horizontal es el valor absoluto de la aceleración horizontal obtenido en un acelerograma, tomando la suma de dos componentes ortogonales.

### 3.2.3 Clasificación según el comportamiento geomecánico de los suelos

A efecto de su incidencia en el comportamiento geomecánico de los suelos y las rocas, los factores o agentes que controlan los movimientos de laderas pueden agruparse también en aquellos que contribuyen a reducir la resistencia al corte y aquellos que incrementan los esfuerzos al corte. (Tabla 3.1)

**Tabla 3.1. Factores influyentes en el comportamiento geomecánico de los materiales de las laderas (Valleé, M., 2006).**

<b>Reducción de la resistencia al corte</b>	<b>Aumento de los esfuerzos cortantes</b>
<p>Condiciones iniciales:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Composición, textura y estructura.</li> <li>- Fracturas y fallas.</li> <li>- Planos de Estratificación y foliación.</li> <li>- Zonas de brechas.</li> </ul> <p>Rocas masivas sobre materiales con diferente permeabilidad.</p>	<p>Actuación de esfuerzos transitorios:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Movimientos sísmicos.</li> <li>- Vibraciones por voladuras, maquinarias y tráfico.</li> <li>- Deslizamientos cercanos.</li> </ul>
<p>Cambios en los materiales por meteorización y reacciones físico – químicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Desintegración física de las rocas.</li> <li>- Hidratación de minerales arcillosos.</li> <li>- Desecación de arcillas y rocas arcillosas.</li> <li>- Disolución y lavado de materiales.</li> <li>- Plastificación de arcillas.</li> </ul>	<p>Perdida de confinamiento lateral y en la base de las laderas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erosión del pie de las laderas por ríos, arroyos, olas, mareas, etc.</li> <li>- Lluvias.</li> <li>- Erosión interna o subterránea.</li> <li>- Disolución y lavado del material.</li> <li>- Labores mineras.</li> <li>- Presencias de materiales plásticos infrayacentes.</li> </ul>

<b>Continuación tabla 3.1.</b>	
<p>Cambios en las fuerzas intergranulares debidas al agua en poros y fracturas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Precipitaciones</li> <li>- Deshielo.</li> <li>- Lagos y embalses.</li> <li>- Riego.</li> <li>- Deforestación.</li> </ul>	<p>Cambios en la morfología:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Deslizamientos.</li> <li>- Grandes Fallas.</li> </ul>
<p>Cambios en la estructura:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Por fisuración en pizarras y arcillas sobreconsolidadas.</li> <li>- Por relajación de tensiones en laderas rocosas en valles o excavaciones.</li> <li>- Por remoldeo de suelos fino.</li> </ul>	<p>Sobrecargas naturales:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rellenos, escombreras y acopio de materiales.</li> <li>- Edificios y otras estructuras.</li> <li>- Cultivo y riego de laderas.</li> </ul>
<b>Reducción de la resistencia al corte</b>	<b>Aumento de los esfuerzos cortantes</b>
<p>Debilitamiento de la resistencia debido a procesos de creep.</p>	<p>Otras acciones antrópicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Excavaciones.</li> <li>- Retirada de elementos de contención.</li> <li>- Construcción de embalses y lagos.</li> </ul>
<p>Acción de las raíces de los árboles y arbustos.</p>	<p>Presión Lateral:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Agua en grietas y cavidades.</li> <li>- Hielo en grietas.</li> <li>- Presencia de materiales expansivos</li> </ul>
<p>Excavación de madrigueras de animales</p>	<p>Procesos volcánicos.</p>

Las propiedades resistentes o geomecánicas controlan la resistencia al corte de los materiales y su rotura. Los suelos, por su carácter homogéneo en el tamaño de sus partículas, presentan menor complejidad en su caracterización, mientras que los macizos rocosos, que pueden tener muy diferente grado de fracturación, serán las pro-

propiedades de la matriz, de las discontinuidades o del macizo rocoso en su conjunto, las que determinen la resistencia y el comportamiento.

### **3.3 Zonificación de la susceptibilidad o amenaza por movimientos de masa**

La zonificación de la susceptibilidad y/o amenaza es una herramienta útil y es usada en casi todos los lugares del mundo, donde existe propensión a los movimientos de masa. Se han elaborado diversas técnicas para desarrollar la zonificación, teniendo en cuenta factores como la escala de trabajo, la relación costo-beneficio, el objeto del estudio, información disponible, tiempo requerido, precisión de los resultados, capacidad de análisis, experiencia de los investigadores, etc.

La zonificación de la susceptibilidad y/o amenaza requiere un detallado inventario de los procesos de inestabilidad, a saber: Los estudios de estos procesos en relación con su marco ambiental, el análisis de los factores de susceptibilidad y disparo, la representación espacial de los factores y de los procesos de inestabilidad (Mora y Vahrson, 1993; Soeters y Van Westen, 1996; en Aguilar y Mendoza, 2002).

Nuevas herramientas como los Sistemas de Información Geográfica y el uso de sensores remotos, agilizan cada vez el tratamiento de la información, permitiendo rápidamente la actualización de la misma. Los estudios de susceptibilidad y/o amenaza multitemporal permiten predecir con más confiabilidad el comportamiento de las áreas, observando el desarrollo de la inestabilidad en el tiempo y más rapidez en la captura de variables involucradas en los análisis. Las técnicas de zonificación están en desarrollo constante, y cada día surgen nuevos métodos, más precisos y confiables, que pueden ser usados en diversas regiones a un costo razonable.

#### **3.3.1 Definición de Términos**

Los términos usados en este capítulo forman parte de las definiciones propuestas por Varnes (1984), adaptados con base en Soeters y Van Westen (1996) (Aguilar y Mendoza, 2002):

- Susceptibilidad: facilidad con que un fenómeno puede ocurrir con base en las condiciones locales del terreno.
- Amenaza: probabilidad de ocurrencia de un fenómeno, en un período específico de tiempo, en una área determinada.
- Zonificación: división de un territorio en zonas homogéneas según el grado de susceptibilidad y/o amenaza para cada una.
- Riesgo: pérdidas esperables en vidas humanas y económicas por daños a propiedades e infraestructura o por interrupción de actividades, debidas a la ocurrencia de una amenaza.

### 3.3.2 Escala de trabajo

Está determinada por los requerimientos del usuario y la aplicación que se le pretende dar a la investigación; por una relación riesgo - costo – beneficio razonable que garantice la aplicabilidad práctica, por el tipo específico de problema, por la calidad y cantidad de información, por los recursos financieros, por la disponibilidad de tiempo y por la experiencia de los investigadores, entre otras (Millan, 1998).

Para los estudios de susceptibilidad y/o amenaza se han establecido (Soeters y Van Westen, 1996; Millan, 1998), las siguientes escalas de trabajo:

- Escala Nacional (>1:1.000.000): inventario general de las áreas problemáticas para todo un país. El nivel de detalle es muy bajo, porque los análisis son hechos sobre reglas generales.
- Escala Regional (1:100 000 a 1: 500 000): para desarrollos regionales. Las áreas son de aproximadamente 1000 km<sup>2</sup> o más. El nivel de detalle es bajo, el mapa sólo indica áreas en las cuales los movimientos de masa podrían afectar desarrollos regionales y se supone que la susceptibilidad y/o amenaza es uniforme en toda la unidad de zonificación.
- Escala Intermedia (1:25 000 a 1:50 000): para la determinación de zonas de susceptibilidad y/o amenaza donde existen infraestructuras, caminos, y proce-

sos de urbanización. El área cubre unos pocos cientos de kilómetros cuadrados. Se tiene un nivel de detalle medio, de tal manera que se puede identificar niveles de susceptibilidad y/o amenaza entre segmentos de ladera de acuerdo con sus características ambientales.

- Escala grande (1:5000 a 1: 15 000): el tamaño del área es de pocos o decenas de kilómetros cuadrados. El nivel de detalle es alto y los resultados se presentan como clases de susceptibilidad y/o amenaza, que indican la propensión o la probabilidad del fenómeno en cada unidad.
- Escala de detalle (>1:5000): el tamaño del área abarcada por esta escala es de 0,41 hectáreas, el detalle generado por esta escala permite tener una imagen muy precisa de las propiedades y características de los suelos. El Área Metropolitana de Caracas está cubierta por restituciones a escala 1:1000, por lo que un estudio de susceptibilidad a movimientos de masa a una escala tan detallada generaría unos resultados muy útiles y de aplicación muy práctica. En esta escala se pueden cartografiar todos los procesos geodinámicos presentes, dando como resultados zonas de susceptibilidad y/o amenaza, los cuales indican la probabilidad de ocurrencia para los movimientos de masa.

La determinación de la escala es fundamental en cualquier estudio de susceptibilidad y/o amenaza y es una de las primeras preguntas que deben contestarse al iniciar una zonificación, teniendo en cuenta los factores mencionados anteriormente.

### 3.3.3. Técnicas de análisis para el modelado de la susceptibilidad

Las diferentes técnicas actualmente en uso proveen una evaluación de la susceptibilidad y/o amenaza con base en el estudio de las condiciones naturales de un área y en el análisis de los posibles factores involucrados en los procesos de inestabilidad. Van Westen (1993) por Soeters y Van Westen (1996) (Aguilar y Mendoza, 2002) revisaron diferentes aproximaciones metodológicas, como se reseña a continuación,

- **Inventario de movimientos de masa:** Es el método más directo para la zonificación de la susceptibilidad y/o amenaza, con base en la ocurrencia de movimientos de masa en un área. Se puede realizar por fotointerpretación, trabajo de campo o base de datos históricos del área en estudio. El producto final debe ser la distribución espacial de los movimientos, representados por áreas afectadas o puntos. Proveen información por un período corto y no dan ninguna idea de los cambios temporales en la distribución de movimientos de masa. Estos inventarios son la base de cualquier estudio de zonificación de susceptibilidad y/o amenaza, aunque su aplicación a escala regional es limitada (Soeters y Van Westen, 1996; Millán, 1998 en Aguilar y Mendoza, 2002).
  
- **Aproximación heurística:** Con base en la opinión de un experto, se combina un inventario de movimientos de masa con su marco geomorfológico como el principal factor de entrada en la evaluación. La calidad de la zonificación depende del conocimiento que se tenga de la zona de estudio y de la experiencia de los investigadores. Se puede aplicar a cualquier escala, pero es más útil a escalas nacional y regional.

Se clasifican en dos tipos de técnicas:

*Análisis geomorfológico:* Conocido también como método directo, la susceptibilidad y/o amenaza es determinada directamente en el campo por las observaciones del experto, con base en su experiencia personal y uso de razonamiento por analogías. Tiene un alto nivel de subjetividad y el error depende del conocimiento que se tenga de la zona de estudio.

*Combinación cualitativa de mapas:* Usa el conocimiento del experto para asignar pesos a una serie de mapas-parámetro. Las condiciones del terreno son representadas por la suma de los pesos y la evaluación del grado de zonificación se realiza por clases. Esta técnica ha sido muy popular, pero la desventaja es la determinación exacta del peso para cada mapa parámetro, que requiere un conocimiento detallado de



los factores en la zona de estudio (Soeters y Van Westen, 1996; Millán, 1998). Se los conoce también como métodos de cálculo de peso de los factores (Gee, 1992) o metodologías de cartografía indirecta (Cuervo, 1999) (Aguilar y Mendoza, 2002).

#### 3.3.4. Metodología propuesta por Mora y Vahrson:

A cada uno de los factores se les pondera con un valor, el cual define su grado de influencia en los deslizamientos de ladera. Luego, los valores se combinan mediante la expresión matemática siguiente:

$$H_1 = (S_r \cdot S_t \cdot S_h) \cdot (T_s + T_p) \quad 3.1$$

Donde:

$H_1$  = Susceptibilidad a deslizamientos de ladera.

$S_r$  = Valores del índice de relieve relativo.

$S_t$  = Valores del Factor de litología.

$S_h$  = Valores del índice de influencia de la humedad natural del suelo

$T_s$  = Valores del índice de influencia de la intensidad sísmica

$T_p$  = Valores del índice de influencia de la intensidad de las precipitaciones

Los valores obtenidos de la Ecuación 3.1 son categorizados de acuerdo a la tabla 3.2.

*Valores del índice de relieve relativo ( $S_r$ ):* es una estimación de la rugosidad natural del terreno. En otras palabras, este factor representa una medida del relieve ó la topografía de un área determinada.

**Tabla 3.2. Clases de susceptibilidad y/o amenaza de deslizamientos de laderas.  
(Mora y Vahrson, 1993).**

Susceptibilidad	Clase	Grado de Susceptibilidad
0 –6	I	Muy Bajo
7 -32	II	Bajo
33 –162	III	Moderado
163 – 512	IV	Mediano
513 –1250	V	Alto
> 1250	VI	Muy Alto

El Relieve Relativo se define como la máxima diferencia de elevación por unidad de área y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$S_r = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{A} \text{ (m/Km}^2\text{)}$$

Donde:

$h_{\max}$  = elevación máxima del área de estudio

$h_{\min}$  = elevación mínima del área de estudio

A = área que se está analizando

Los valores de relieve relativo también pueden ser expresados como valores de pendiente, ya sea en porcentaje o en grados. Una vez calculado el relieve relativo, el valor o peso de este factor se asigna según la tabla 3.3.

*Valores del Factor de litología ( $S_t$ ):* este factor cuantifica la influencia de los diferentes tipos de suelos y rocas en la activación de los deslizamientos de tierra (Tabla 3.4)

*Valores de la humedad natural del suelo ( $S_h$ ):* El factor humedad cuantifica la cantidad de agua que se encuentra retenida en el suelo. Se refiere a la cantidad de

agua que, por infiltración, se mantiene en el subsuelo rellenando vacíos entre las partículas de suelo.

**Tabla 3.3. Valores del índice de relieve relativo (Sr) (Mora y Vahrson, 1993).**

Relieve Relativo m/km <sup>2</sup>	Pendiente %	Pendiente en grados	Calificativo	Valor Sr
0 – 75	0 – 75	0 - 4,29	Muy Bajo	0
76 – 175	7,6 - 17,5	4,30 - 9,93	Bajo	1
175,6 – 300	17,6 - 30,0	9,94 - 16,7	Moderado	2
301 – 500	30,1 - 50,0	16,71 - 26,57	Mediano	3
501 – 800	50,1 - 80,0	26,58 - 38,66	Alto	4
> 800	>80,1	>38,66	Muy Alto	5

**Tabla 3.4. Valores del Factor de litología (S<sub>t</sub>) (Mora y Vahrson, 1993).**

Litología	Calificativo	Valor S <sub>t</sub>
Margas permeables, intrusiones fisuradas, basaltos, andesitas, granitos, gneis, hornfels, mesa de agua baja, bajo grado de meteorización diaclasas limpias y rugosas.	Baja	1
Alto grado de saturación en las litologías mencionadas anteriormente y rocas plásticas masivas duras, baja resistencia al corte, materiales que se pueden desmoronar.	Moderada	2
Rocas sedimentarias, intrusivas, metamórficas, volcánicas, areniscas compactas con suelos de regolitos con considerable grado de meteorización, abundante diaclasamiento, mesa de agua fluctuante, aluviones y coluviones compactos.	Media	3
Meteorización considerable, rocas alteradas por acciones hidrotermales, fuerte fracturamiento y fisuramiento, arcillas, piroclásticos poco compactos (cenizas volcánicas) y suelos fluvio-lacustres, mesa de agua somera	Alta	4
Rocas extremadamente alteradas, suelos aluviales, coluviales y residuales con baja resistencia al corte, mesa de agua somera	Muy alta	5

La ponderación del factor humedad se realiza mediante los pasos siguientes:

- a. Identificar una serie de estaciones pluviométricas distribuidas en la región a evaluar.

- b. Categorizar los promedios mensuales de cada estación, según la tabla 3.5:
- c. Sumar los doce valores asignados a cada mes. Los valores oscilarán entre 0 y 24.
- d. El valor obtenido de la suma se clasifica según la tabla 3.6:

**Tabla 3.5. Categorías de precipitación promedio mensual. (Mora y Vahrson, 1993).**

Precipitación Promedio mm/mes	Valor
< 125	0
125 – 250	1
> 250	2

**Tabla 3.6. Valores para el factor humedad natural del suelo ( $S_h$ ) (Mora y Vahrson, 1992).**

Valor Acumulado	Calificativo	Valor Factor Humedad
0 – 4	Muy Bajo	1
5 – 9	Bajo	2
10 – 14	Medio	3
15 – 19	Alto	4
20 – 24	Muy Alto	5

*Valores del índice de influencia de la intensidad sísmica ( $T_s$ ):* Este parámetro conocido también como factor de intensidad sísmica cuantifica la influencia de la actividad sísmica en los deslizamientos de tierra, se identifican en un mapa regional las aceleraciones a utilizar en el estudio y se le asignan valores a cada aceleración (si fuesen varias) obtenidas según la tabla 3.7:

*Valores del índice de influencia de la intensidad de las precipitaciones (lluvias) ( $T_p$ ):* Este factor mide la influencia de la lluvia, por unidad de tiempo, en los deslizamientos de tierra. El procesamiento de este factor se realiza según los pasos siguientes:

- a. Identificar una serie de estaciones pluviométricas distribuidas en todo el país.

- b. Determinar, para todas las estaciones, la serie de valores máximos diarios anuales.
- c. Analizar si existen valores fuera de la serie y sí los hay, eliminarlos.
- d. Si el número de registros es menor de 10 años, calcular para estos el promedio.
- e. Si el número de registros es mayor de 10 años, calcular por el método de Gumbel, la precipitación máxima para un período de retorno de 100 años.

A las cantidades obtenidas en los puntos 4 ó 5 se les asigna el valor del factor Lluvia según las ponderaciones que se muestran en la tabla 3.8.

**Tabla 3.7. Valores del factor de intensidad sísmica ( $T_s$ ). (Mora y Vahrson, 1993).**

<b>Intensidades Mercalli Modificado</b>	<b>Aceleraciones Pico %g</b>	<b>Aceleraciones Pico Gals</b>	<b>Calificativo</b>	<b>Valor Factor Sismicidad</b>
III	1 - 12	9,8 - 122,6	Leve	1
IV	13 - 20	122,7 - 201,1	Muy Bajo	2
V	21 - 29	201,2 - 289,4	Bajo	3
VI	30 - 37	289,5 - 367,9	Moderado	4
VII	38 - 44	368,0 - 436,5	Medio	5
VIII	45 - 55	436,6 - 544,5	Elevado	6
IX	56 - 65	544,6 - 642,6	Fuerte	7
X	66 - 73	642,7 - 721,0	Bastante Fuerte	8
XI	74 - 85	721,1 - 838,8	Muy Fuerte	9
XII	> 85	>838,9	Extrem. Fuerte	10

**Tabla 3.8. Valores del índice de influencia de la intensidad de las lluvias ( $T_p$ ). (Mora y Vahrson, 1993).**

<b>Lluvias máximas N &gt; 10 años Tr = 100 años</b>	<b>Lluvias máximas N &lt; 10 años promedio</b>	<b>Calificativo</b>	<b>Valor</b>
< 100	< 50	Muy Bajo	1
100 - 200	50 - 90	Bajo	2
200 - 300	90 - 130	Medio	3
300 - 400	130 - 175	Alto	4
>400	>175	Muy Alto	5

Finalmente, cada factor se combina mediante la ecuación 3.1 y usando un sistema de información geográfica se puede obtener un mapa de susceptibilidad de deslizamientos de laderas.

- **Análisis Estadísticos:** la combinación de factores que generan los movimientos de masa en el pasado se hace estadísticamente y se generan predicciones cuantitativas. El inventario de movimientos de masa es la base del estudio. Su aplicabilidad se encuentra en estudios de escala intermedia a grande y tiene la ventaja de su alta reproducibilidad y objetividad, lo que permite verificar los resultados. También se conocen como modelos de Caja Negra (*Black Box*) (Carrara, 1983) o técnicas de evaluación relativa (Hartlen y Viberg, 1988). Existen dos tipos de técnicas para realizar análisis estadísticos (Aguilar y Mendoza, 2002):

*Aproximación Determinística:* Son métodos indirectos, que emplean modelos físicos de estabilidad de laderas para evaluar la susceptibilidad y/o la amenaza. Son aplicables sólo cuando las condiciones geológicas y geomorfológicas son homogéneas sobre el área de estudio y los tipos de movimientos de masa son simples. La ventaja de esta técnica es que está basada en análisis cuantitativos. El principal problema es su alto grado de simplificación y generalmente requiere el uso de modelos hidrológicos. No obstante la cantidad de información detallada que requieren, su uso se ha incrementado, debido a la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica, que permiten la manipulación de gran cantidad de datos y rapidez en los cálculos, facilitando su aplicación a escalas regionales (Soeters y Van Westen, 1996; Millán, 1998). También se conocen como modelos de Caja Blanca (*White Box*) (Carrara, 1983) (Aguilar y Mendoza, 2002).

*Análisis probabilísticos o de frecuencias de movimientos de masa:* consisten en determinar la probabilidad o recurrencia de los movimientos en un lugar y en un periodo de tiempo dado. El cálculo se realiza con la ayuda de la modelación de los factores presentes en la formación de los movimientos de masa ocurridos en el pasado con características similares (Millán, 1998) (Aguilar y Mendoza, 2002).

- Metodología de taludes naturales: se enmarca dentro del campo natural de la macrogeotecnia y constituye un conjunto metodológico que permite la determinación y cálculo de parámetros geomecánicos y de estabilidad, a partir de información detallada. Permite el cálculo directo del factor de seguridad y su correspondiente probabilidad de falla. Se aplica a diferentes escalas, siempre y cuando la información requerida esté disponible (Millán, 1998). También se conocen como técnicas por monitoreo (Hartlen y Viberg, 1988) o métodos de evaluación de inestabilidad de taludes (Gee, 1992). Existe diversidad de métodos para el cálculo del factor de seguridad, como el método de tajadas, de talud infinito, del bloque deslizante y el de elementos finitos (Cuervo, 1999), (Aguilar y Mendoza, 2002).

### 3.3.5 Precisión y objetividad

La precisión de los resultados es la pregunta más importante en cada estudio de susceptibilidad y/o amenaza. El término indica si el resultado (mapa, tabla, matriz, o cualquiera sea su representación) de la zonificación hace una distinción correcta entre las áreas libres o no de movimientos de masa. Depende de las siguientes variables, todas ellas relacionadas:

1. Precisión del modelo.
2. Precisión de los datos.
3. Experiencia del investigador.
4. Tamaño del área de estudio.

La precisión de un mapa de susceptibilidad y/o amenaza sólo puede ser evaluada por observaciones directas de movimientos de masa en el tiempo pero, como siempre, se requiere la evaluación de los resultados. Un método muy usado para hacerlo consiste en comparar el mapa de susceptibilidad y/o amenaza con un mapa que contenga el patrón de movimientos de masa en la zona (inventario de movimientos de masa): se calcula el número de movimientos de masa encontrados en las zonas

predichas como estables en valor de porcentaje y éste se supone como el error del análisis, para áreas libres o no afectadas por movimientos de masa (Soeters y Van Westen, 1996).

Relacionada con la precisión esta la objetividad del análisis, término éste que se usa para indicar si los pasos usados en la determinación del grado de susceptibilidad y/o amenaza, son verificables y reproducibles. La objetividad no siempre implica precisión. El grado de objetividad depende de las técnicas usadas en la recolección y análisis de los datos. Las características propias de la evaluación de la susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa implican cierto grado de subjetividad, el cual no tiene que significar imprecisiones (Soeters y Van Westen, 1996).

### 3.3.6 Uso de los sistemas de información geográficos en el modelado de la susceptibilidad y/o amenaza

El término SIG procede del acrónimo de Sistema de Información Geográfica (en inglés GIS, *Geographic Information System*).

Técnicamente se puede definir un SIG como una tecnología de manejo de información geográfica formada por equipos electrónicos (*hardware*) programados adecuadamente (*software*) que permiten manejar una serie de datos espaciales (información geográfica) y realizar análisis complejos con éstos, siguiendo los criterios impuestos por el equipo científico (personal).

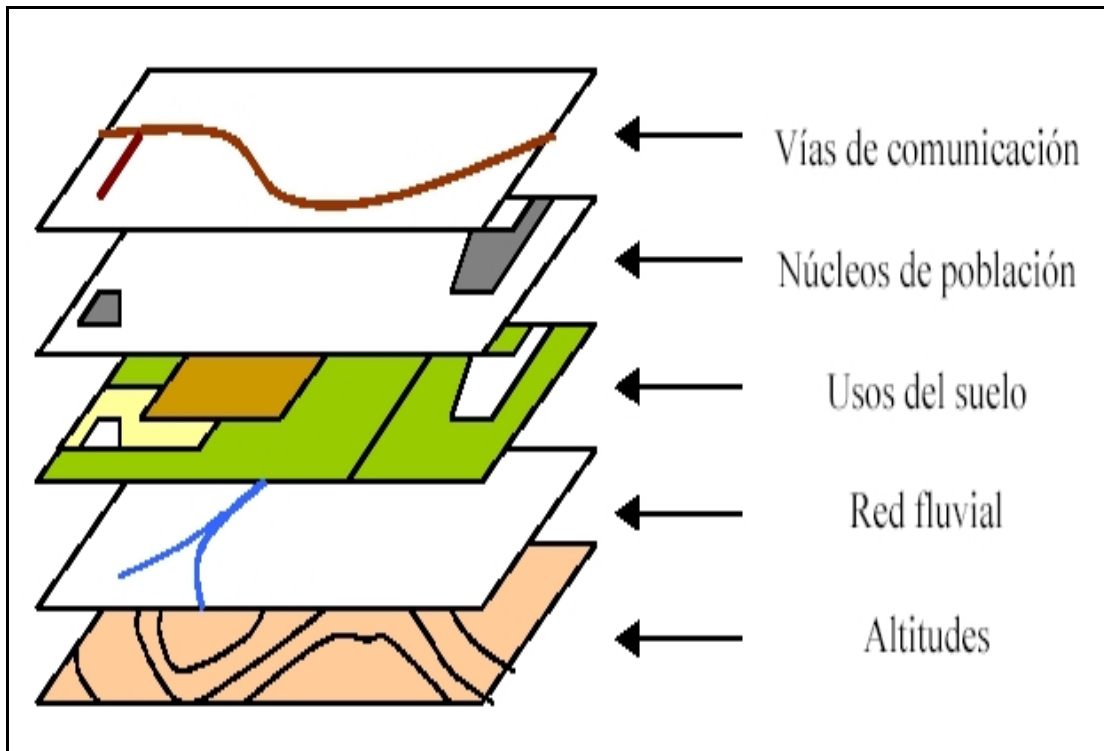
Un SIG está definido como una herramienta para recolectar, ordenar, recuperar, transformar y desplegar datos espaciales del mundo real, con un propósito específico. Funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.



El sistema de información geográfica separa la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma (Figura 3.3)

Las ventajas del uso de los SIG para la evaluación de la susceptibilidad y/o amenaza, son principalmente la capacidad de almacenar ordenadamente gran cantidad de datos georreferenciados, la rapidez de procesamiento y actualización de los mismos, así como la facilidad para la combinación y representación gráfica de ellos, incluyendo el procesamiento de múltiples fases del modelo que de otra manera tomarían demasiado tiempo.

La primera aplicación del uso de SIG para la zonificación de la susceptibilidad y/o amenaza, fue reportada por Newman (1978). Actualmente los SIG, son usados para casi todos los estudios de susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa en el mundo y se siguen desarrollando metodologías para la aplicación de las técnicas de análisis, la mayoría de las aplicaciones para análisis cualitativos.



**Figura 3.3. Análisis multicriterio complejo con SIG**  
 (<http://es.wikipedia.org/wiki/SIG>).

Cada metodología y técnica de modelado puede aportar valiosos resultados al conocimiento del problema, si se establecen con claridad tanto la escala de trabajo, como una objetiva recolección y manejo de los datos, sumado a una adecuada presentación de los resultados.

## **CAPÍTULO IV**

### **Metodología**

4.1. Recopilación de Información

4.2. Creación y estructuración de la base de datos en un Sistema de Información Geográfica (SIG)

4.3. Generación de mapas temáticos

4.4. Modificación de la metodología de Mora y Vahrson

4.5. Elaboración Modelo Final

4.6. Procesamiento de los datos en el SIG

## METODOLOGÍA DE TRABAJO

Esta investigación es de tipo documental, ya que trata una problemática compleja y se persigue ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con el apoyo de trabajos previos y es analítica debido a que, por medio de la interpretación e integración de parámetros geológicos, meteorológicos, geomorfológicos y geotécnicos, se busca obtener un valor que determine la susceptibilidad a movimientos de remoción en masa en el Distrito Metropolitano de Caracas. La información analizada fue tomada de investigaciones realizadas en la región de estudio e incluye mapas estructurales, geomorfológicos, análisis petrográficos, registros pluviométricos, cálculos de aceleraciones sísmicas e informes de inspecciones de campo.

La fase inicial, para la elaboración del modelo, abarcó la aplicación de la metodología desarrollada en el estudio geotécnico del Área Metropolitana de Caracas, (Feliciano et al, 1985). El modelo final se generó por medio de la metodología modificada de Mora y Varhson (1991), (Valleé, 2006) la cual cuantifica la probabilidad para la ocurrencia de movimientos a remoción en masa, por medio de la función H (Ecuación 4.1), que es la combinación de la influencia de los factores de susceptibilidad y de los factores detonantes. La figura 4.1 muestra el esquema metodológico seguido en esta investigación.

### 4.1 Recopilación de Información.

En esta fase inicial se realizó la recopilación de la información necesaria existente sobre la región de estudio, la cual implicó principalmente material calificado como **Mapas temáticos** cartográficos, incluyendo parte de los mapas temáticos elaborados por Feliciano et al (1985), en el estudio geotécnico del Área Metropolitana de Caracas, sector central.

## 4.2 Creación y estructuración de la base de datos en un Sistema de Información Geográfica (SIG)

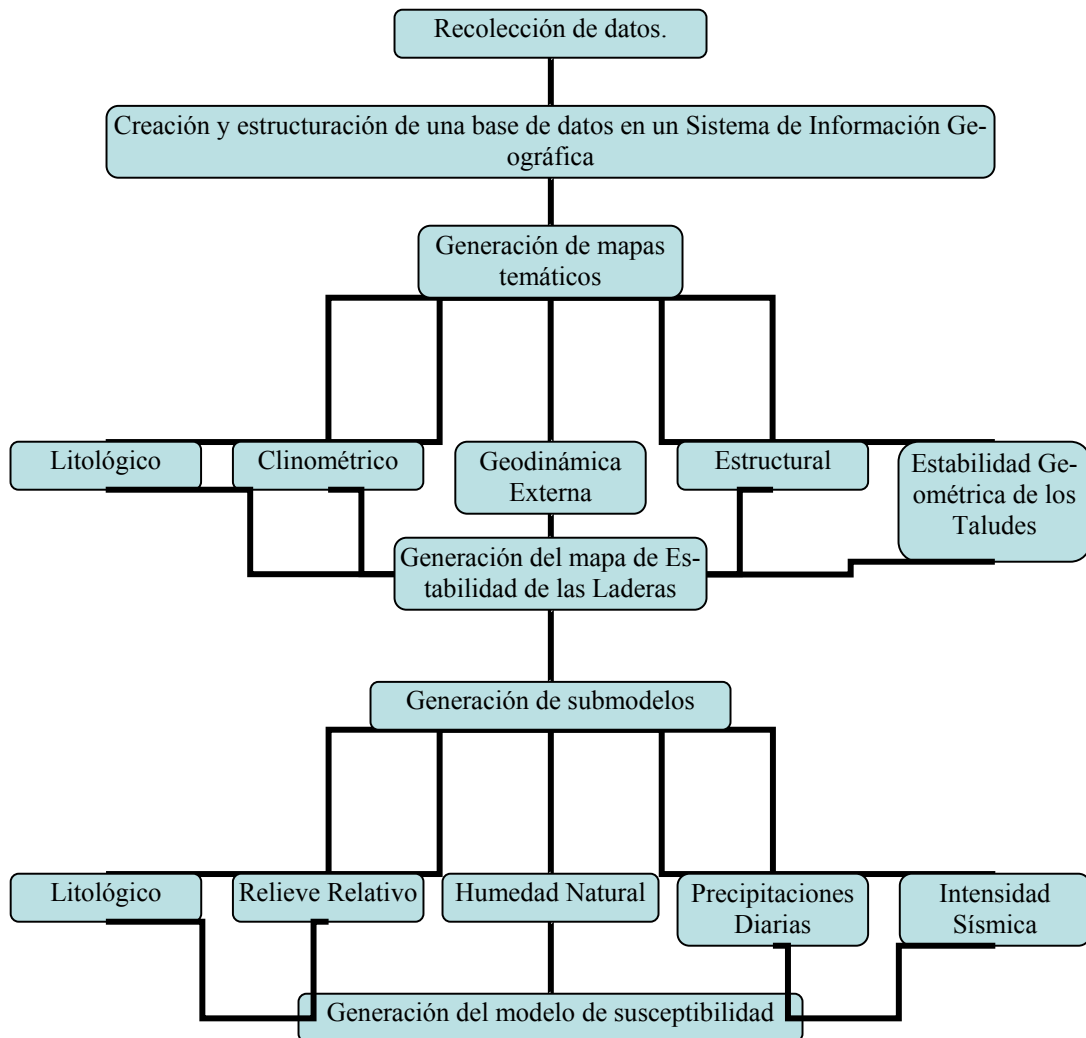
Esta etapa comprendió la digitalización y georeferenciación de los mapas litológicos, geomorfológicos, estructurales y de geodinámica externa, obtenidos del estudio geotécnico del Área Metropolitana de Caracas, sector central. Los datos de cada mapa fueron almacenados en capas, de acuerdo a la información que representan. Se utilizó un sistema de coordenadas UTM, huso 19, REGVEN a escala 1:25000. El software utilizado para la creación y estructuración de la base de datos fue *ArcGIS 9.1 ESRI*.

## 4.3 Generación de mapas temáticos

Una vez creada la base de datos, se procedió a la elaboración del mapa de estabilidad de las laderas. En la realización de este mapa se utilizó la metodología empleada por Feliciani *et al* (1985). Dicha metodología implica la suma de dos diagnósticos, el macro (que está constituido por los parámetros litológicos, geomorfológicos e hidrológicos, con sus respectivos sub-parámetros) y el micro (que resulta por la integración de la clinometría, estructuras y estabilidad geométrica de los taludes, con sus respectivos sub-parámetros). La figura 4.2 muestra el esquema de la metodología aplicada.

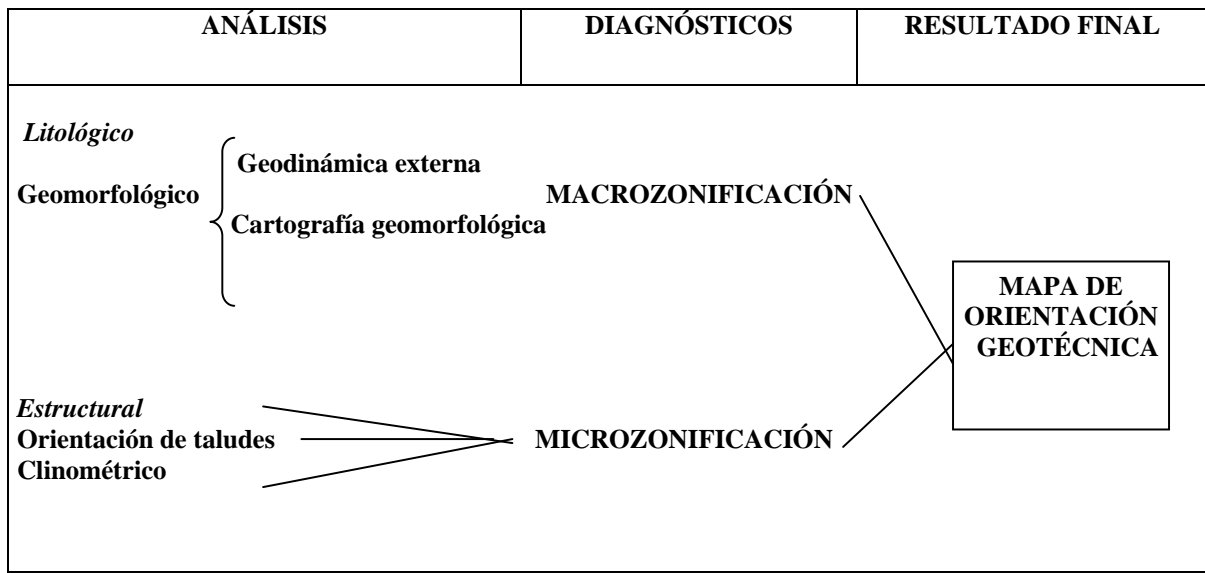
Los análisis realizados para elaborar el mapa de orientación geotécnica fueron los siguientes:

- a) **Análisis de las unidades litológicas:** es donde se describen las características y el comportamiento de las unidades litológicas que se han podido separar por medio de estudios petrográficos y geotécnicos.



**Figura 4.1 Esquema metodológico para generar el modelo de susceptibilidad**

- b) **Cartografía y geomorfología simplificada:** constituye el análisis de los factores del medio físico, involucrados directamente en las respuestas a las perturbaciones derivadas del uso de la tierra en los diversos sectores del área de estudio, tales como: tipos de depósitos, situación de transición entre los depósitos, tipo de material in situ, tipos de materiales residuales, características de la escorrentía, drenaje superficial, modalidades del relieve con trascendencia geotécnica y zonas de meteorización.



**Figura 4.2 Esquema de la metodología para la elaboración del mapa de orientación geotécnica (Valleé, M., 2006).**

- a) **Análisis estructural:** comprende el estudio en forma estadística de la distribución espacial de las discontinuidades estructurales, tales como: foliaciones, diaclasas y fallas, presentes en el área de estudio.
- b) **Orientación geométrica de los taludes:** se refiere a la representación simple y esquemática de la orientación de los taludes, cada sector tiene amplitud de 45° hasta cubrir los 360°. Luego se realiza una comparación de estos resultados con los obtenidos del análisis estructural, para evaluar la existencia de situaciones de inestabilidad geométrica en los taludes, por paralelismo o sub-paralelismo entre la orientación de la ladera y las estructuras geológicas.
- c) **Clinometría:** consiste en la determinación de los diferentes rangos de pendientes presentes en la zona considerada.
- d) **Análisis de geodinámica externa:** se estudian las estructuras y procesos espaciales asociados con el hombre y el ambiente físico. El análisis se lleva a cabo en dos etapas: en la primera se analizan formas y procesos

independientemente y en la segunda se efectúa una interrelación entre formas y procesos, para las diversas áreas y en un momento específico, considerando los aspectos mencionados inicialmente.

Una vez finalizado el análisis de todos los parámetros y elaborados sus respectivos mapas, se lleva a cabo la integración de los resultados para generar los dos diagnósticos, el macro y el micro. La combinación de estos dos diagnósticos da como resultado el mapa de orientación geotécnica.

La metodología utilizada en el presente trabajo para generar el mapa de orientación geotécnica del área en estudio incluyó la realización de análisis litológicos, estructurales, clinométricos, geomorfológicos (enfocados en la geodinámica externa) y estabilidad geométrica de los taludes. A partir de cada análisis se generaron los mapas temáticos de la siguiente manera.

#### **4.3.1 Mapa Litológico**

Es una representación de la distribución de las unidades litológicas en el área en estudio. La definición de las unidades se hizo con énfasis principalmente en el factor litológico, obviando la descripción formacional. Para su delimitación se tomaron como base las unidades cartografiadas en el Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa, Urbani (2000), para la zona de estudio y se ajustaron los límites de las unidades con datos de campo tomados del trabajo de Reyes (1979).

Posteriormente, se hizo una descripción de las características y el comportamiento de las unidades, tomando en cuenta rasgos petrográficos y geotécnicos; con base en perfiles de meteorización, análisis de petrografía y descripciones de campo de trabajos previos de Reyes (1979). Los aspectos geotécnicos considerados en la descripción son: el potencial morfogénico, la permeabilidad, la tendencia a la socavación, la capacidad de retención de humedad, la resistencia a la disgregación y la meteorización.



### **4.3.2 Mapa Clinométrico:**

Representa la distribución de los valores de pendientes de las laderas (naturales e intervenidas) que conforman el área en estudio. Los rangos de pendientes considerados para el análisis clinométrico fueron los siguientes: 0° a 3°, 3° a 11°, 11° a 21°, 21° a 31°, 31° a 45° y > 45°.

### **4.3.3 Mapa de geodinámica externa**

Para generar este mapa se realizó un análisis de los procesos espaciales asociados con el hombre y el ambiente físico, en función de su influencia en la estabilidad de las laderas. El resultado es una división del área de estudio en unidades representativas de diferentes grados de estabilidad. Dichos grados reflejan la repercusión en el equilibrio de las laderas de las diferentes formas de intervención a las que son sometidas, sumado a condiciones topográficas y a los procesos geomorfológicos presentes. El análisis se llevó a cabo en dos etapas: análisis de formas y procesos independientemente e integración de formas y procesos.

#### **4.3.3.1 Análisis de formas y procesos independientemente:**

Se delimitaron zonas homogéneas en cuanto a la diversidad de procesos geomorfológicos presentes y a las formas de intervención antrópica observadas. Para el análisis de las formas de intervención se consideraron dos aspectos, el primero es el tipo de intervención y el segundo la magnitud de ésta. Las variables evaluadas en cada aspecto se asociaron a un grado de estabilidad como se muestra en la tabla 4.1.

Con respecto a los tipos de procesos geomorfológicos presentes, se consideró el grado de diversidad de los mismos. Cada grupo diferenciado se asoció a un grado de estabilidad, como se presenta en la tabla 4.2.

En cuanto al análisis de la configuración topográfica, se utilizaron los mismos rangos de pendientes que en el análisis clinométrico. El grado de estabilidad asignado a cada rango se muestra en la tabla 4.3.

**Tabla 4.1 Variables consideradas en la intervención antrópica(Valleé, M., 2006).**

<b>Tipo de intervención</b>	<b>Grado de estabilidad asociado</b>
Ordenada	Parcialmente Estable
Desordenada	Inestable
<b>Magnitud de la intervención</b>	<b>Grado de estabilidad asociado</b>
Muy Intervenida	Inestable
Medianamente Intervenida	Parcialmente Inestable
Poco Intervenida	Parcialmente Estable
No Intervenida	Estable

**Tabla 4.2 Tipos de procesos geomorfológicos (Valleé, M., 2006).**

<b>Tipo de procesos</b>	<b>Grado de estabilidad asociado</b>
Ningún Tipo	Estable
Único (un solo tipo)	Parcialmente Inestable
Variados (2 o 3 tipos diferentes)	Inestable
Muy Variados (más de 3 tipos)	Muy inestable

#### **4.3.3.2 Integración de formas y procesos:**

Se realizó una integración de las variables consideradas en cada parámetro, utilizando para ello la herramienta *Model Builder* de *ArcGIS*.

#### **4.3.4 Mapa estructural**

Para la generación del mapa estructural se realizó un análisis estadístico de la distribución de los planos de foliación en cada unidad litológica del área. Esto se

logró utilizando el método de proyección hemisférica equiareal, con su correspondiente diagrama de polo y de frecuencia. El programa utilizado para generar los diagramas fue *Stereonet*.

**Tabla 4.3 Rangos de pendientes (Valleé, M., 2006).**

<b>Pendientes en grados</b>	<b>Grado de estabilidad</b>
0° a 3°	Estable
3° a 11°	Parcialmente Estable
11° a 21°	Parcialmente Inestable
21° a 31°	Inestable
31° a 45°	Muy Inestable
> 45°	Muy Inestable

#### **4.3.5 Mapa de orientación y estabilidad geométrica de los taludes**

Es la representación de forma simple y esquemática de la orientación de todos los taludes que definen la topografía del área de estudio. La definición del estado de estabilidad geométrica de los taludes, se hizo en función de la orientación del plano de foliación con respecto a la orientación del plano del talud, con base en la relación presentada en la tabla 4.4.

##### **4.3.5.1 Generación del mapa de orientación y estabilidad geométrica de los taludes**

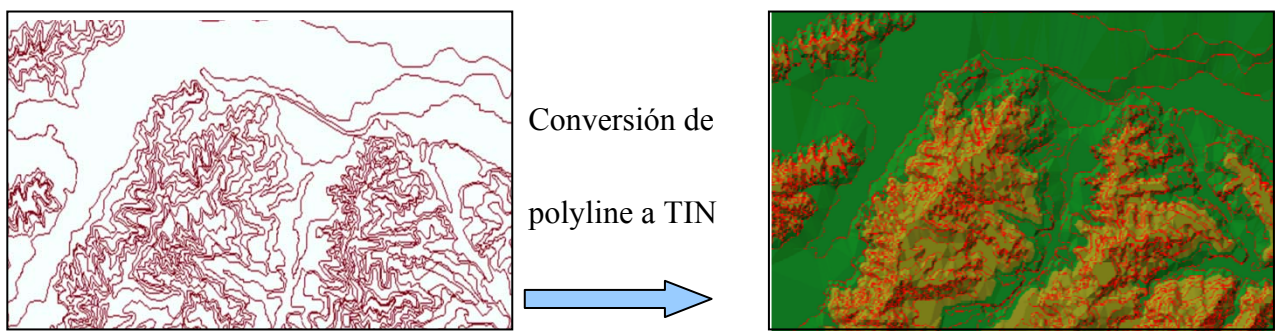
Para la obtención de esta carta, primero se generaron dos mapas base, los cuales fueron integrados por medio de la herramienta *Raster Calculator*, del software

*ArcGIS 9.1*. Los mapas que se integraron fueron el mapa de orientación de los taludes y el de promedio en las mediciones de foliación de acuerdo a las zonas litológicas.

#### 4.3.5.1.1 Mapa de orientación de los taludes

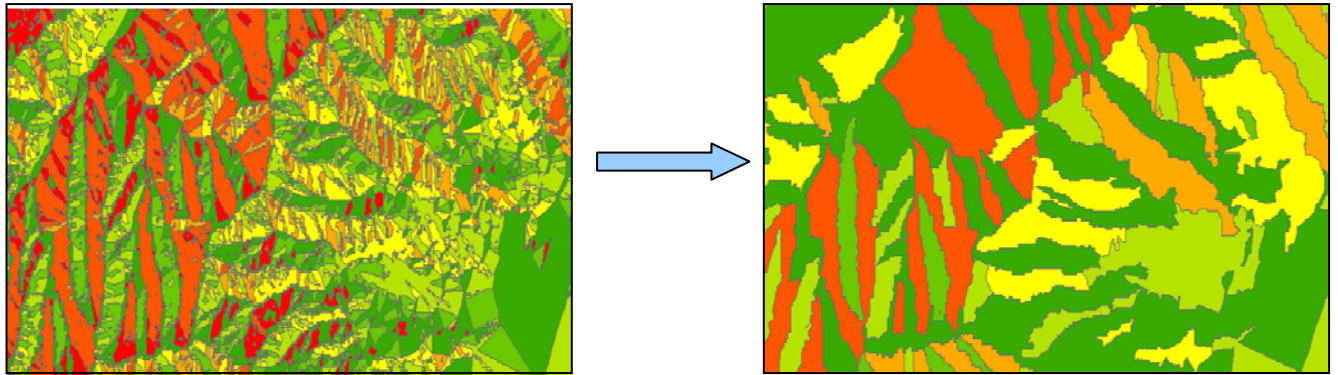
Este mapa se obtuvo por medio del análisis espacial realizado a las curvas de nivel, usando el software *ArcGIS 9.1*. Estas curvas están inicialmente como shapefile de tipo polyline, cada una de estas tiene en los atributos el valor correspondiente a su altura. Estas capas se convirtieron de shapefile a TIN (estos son modelos 3D de las curvas de nivel y el valor de su altura u orientación). Esta herramienta de conversión propone dos opciones, una usa la altura de las curvas de nivel, que está en sus atributos, y la otra genera el modelo 3D de la orientación de los taludes, que fue la opción usada en este caso. Esta conversión se muestra en la figura 4.3.1

Una vez obtenido el archivo TIN, éste se convierte de polygon a shapefile, de esta forma se generó una capa de polígonos, la cual, al haber sido generada de manera automática, presentó un nivel de detalle muy alto, por consiguiente se procedió a la generalización de los polígonos obtenidos, como se muestra en la figura 4.3.2



**Figura 4.3.1 conversión de imagen polyline a TIN**

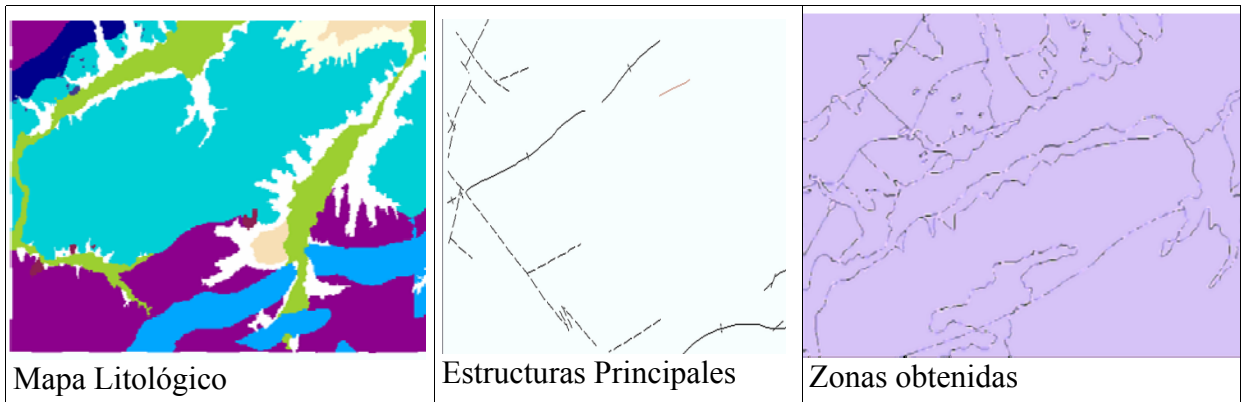
Esta generalización se realizó ya que fueron generados polígonos de tamaños mínimos, los cuales, debido a la escala de este estudio, no afectan el resultado obtenido.



**Figura 4.3.2 Corrección de polígonos**

#### **4.3.5.1.2 Mapa de promedio en foliaciones de acuerdo a las zonas litológicas**

La elaboración de este mapa implicó la integración del mapa litológico con los datos promedio de las mediciones de foliación. La región en estudio se dividió de acuerdo a las zonas litológicas establecidas, dicha zonificación presentó zonas muy grandes, y éstas fueron divididas de acuerdo a las estructuras principales como se muestra en la figura 4.3.3



**Figura 4.3.3 Partes de la zonificación en el mapa de promedio en foliaciones de acuerdo a las zonas litológicas**

Una vez obtenidas las zonas, se les colocó la capa con las mediciones de foliación como se muestra en la figura 4.3.4



**Figura 4.3.4 Partes integradas para obtener el mapa de promedio en foliaciones de acuerdo a las zonas litológicas**

De esta forma cada zona contiene algún número de mediciones de foliación, con estas mediciones se usó el software *StereoNett V. 2.45* para obtener el promedio de foliación para cada zona. Este valor se colocó en un atributo en la capa de las zonas. Una vez que todas las zonas tuvieran sus medidas se procedió a dividir estas zonas de acuerdo a las medidas de los promedios de foliación obtenidos, obteniendo así el mapa de promedio en foliaciones de acuerdo a las zonas litológicas.

Integrar los mapas mencionados anteriormente, consiste en obtener la diferencia entre el valor de orientación promedio por cada zona, en las mediciones de foliación, y el rumbo de los taludes, esta diferencia es la resta de los valores mencionados. Es evidente que existen fenómenos de inestabilidad geométrica cuando el plano de talud o ladera coincide con el plano de foliación, es decir, que buzcan hacia la misma dirección, mientras que serán geoméricamente estables aquellos que buzcan en sentido contrario.

Para la integración de estos mapas se convirtieron los shapefile a formato raster, y se tomó en cuenta para el campo *value* (valor) en el mapa de orientación de los taludes los rangos de las laderas (0-45; 45-90; 90-135; 135-180; 180-225; 225-315; 315-360) y para el mapa de promedio de foliaciones de acuerdo a las zonas litológi-

cas, los valores del rumbo promedio en las mediciones de foliación. Una vez obtenidos los raster se integraron usando la herramienta raster calculator con la fórmula:

$$|\text{Raster a} - \text{Raster b}|$$

Siendo Raster a el mapa de orientación de las laderas, y Raster b el de promedio en foliaciones de acuerdo a las zonas litológicas. Se usa el valor absoluto para obtener el valor positivo de esta diferencia.

Una vez obtenidos los valores de la resta entre los promedios de foliación, por zonas, y la orientación de los taludes, el software generó un mapa en formato raster el cual clasificó las zonas de acuerdo a los valores obtenidos en la diferencia mencionada. Siendo éste el mapa de estabilidad geométrica de los taludes o laderas, éste se sectorizó de acuerdo a los rangos mostrados en la tabla 4.4.

#### **4.3.6 Generación del mapa de orientación geotécnica:**

Constituye la integración ponderada de los mapas obtenidos a partir del análisis de cada uno de los parámetros: litología, clinometría, estructuras, estabilidad geométrica de los taludes y geodinámica externa. Para la integración de los parámetros se les asignó pesos a cada una de las variables evaluadas según su influencia en el grado de estabilidad.

El grado de estabilidad se representó en una escala del 1 al 5, donde 1 corresponde con los elementos más estables y 5 con los más inestables, la clasificación y ponderación utilizada fue la siguiente: (1) Estable, (2) Parcialmente Estable, (3) Parcialmente Inestable, (4) Inestable y (5) Muy Inestable. Por otro lado, el porcentaje de influencia en el grado de estabilidad de las laderas, asignado a cada parámetro fue de 25%, considerando de esta manera una influencia uniforme de todos los parámetros.

**Tabla 4.4 Estabilidad geométrica de las laderas (Valleé, M., 2006).**

<b>Diferencia entre la orientación del plano del talud y el plano de foliación (ot - of)</b>	<b>Grado de Estabilidad</b>
$\leq 22,5^\circ$	Muy Inestable
$22,5^\circ < \text{ot} - \text{of} \leq 45^\circ$	Inestable
$45^\circ < \text{ot} - \text{of} \leq 90^\circ$	Parcialmente Inestable
$90 < \text{ot} - \text{of} \leq 135$	Parcialmente Estable
$\text{ot} - \text{of} > 135$	Estable

Los valores de estabilidad asignados a cada variable se presentan en la tabla 4.5. En el caso de la geodinámica externa el valor de estabilidad asignado a cada zona diferenciada corresponde con el número utilizado para su denominación. Para la integración de los mapas temáticos se utilizó la herramienta *Model Builder* de *ArcGIS*.

#### **4.4 Modificación de la metodología de Mora y Vahrson**

Luego del análisis y estudio de las diferentes metodologías se decidió utilizar la metodología propuesta por Mora y Vahrson en 1993, con la finalidad de obtener un modelo final de susceptibilidad a movimientos de remoción en masa. Esta metodología utiliza cinco factores agrupados en dos categorías (factores intrínsecos y factores externos) para evaluar la susceptibilidad. Estos factores son el relieve relativo, la litología, la humedad del suelo, la sismicidad y la lluvia. Cada uno de los factores define un índice de influencia para determinado lugar, zona o área de estudio, los cuales al combinarse permiten obtener un valor relativo de la susceptibilidad a movimientos de remoción en masa en laderas.



**Tabla 4.5 Valores de estabilidad de las variables (Valleé, M., 2006).**

<b>Litología</b>	
<b>Unidad Litológica</b>	<b>Valor de estabilidad</b>
Unidad Micácea	4
Unidad de los Esquistos Calcáreos	4
Zona de Influencia de la Caliza	4
Depósitos Coluviales	5
Depósitos Aluviales	3
Serpentinitas	4
Unidad Metarenisca	3
Unidad Calcárea	2
Unidad Filítica	4
Anfibolitas	3
<b>Clinometría</b>	
<b>Pendientes en grados</b>	<b>Valor de estabilidad</b>
0° a 3°	1
3° a 11°	2
11° a 21°	3
21° a 31°	4
31° a 45°	5
> 45°	5
<b>Estabilidad geométrica de los taludes</b>	
<b>Diferencias de orientación (ot - of)</b>	<b>Valor de estabilidad</b>
$\leq 22,5^\circ$	1
$22,5^\circ < \text{ot} - \text{of} \leq 45^\circ$	2
$45^\circ < \text{ot} - \text{of} \leq 90^\circ$	3
$90 < \text{ot} - \text{of} \leq 135$	4
$\text{ot} - \text{of} > 135$	5

Con el objetivo de ajustar las variables a evaluar en cada uno de los parámetros considerados por Mora y Vahrson (1993), a las condiciones del área de estudio, se usó la modificación realizada por Valleé, M (2006). Esta modificación es explicada, en cada parámetro evaluado, a continuación:

#### 4.4.1 Parámetro Litológico ( $S_t$ )

Para el caso del factor litológico se tomó como base el mapa de orientación geotécnica generado utilizando el método de Feliciano *et al* (1985). En primer lugar se identificaron en este mapa las características litológicas correspondientes a cada grado de estabilidad presente en el área de estudio. Luego a los parámetros obtenidos se les asignó un calificativo en función de su influencia en la susceptibilidad a movimientos de remoción en masa al ser combinados con otros factores. Los calificativos y la escala de valores del factor litológico propuestos por Mora y Vahrson (1992) no fueron sujetos a modificaciones. La reclasificación de los parámetros se presenta en la tabla 4.6.

**Tabla 4.6 Valores del Factor de litología ( $S_t$ ) (Valleé, M., 2006)**

<b>Litología</b>	<b>Calificativo</b>	<b>Valor <math>S_t</math></b>
Serpentinita, Unidad Filítica, Anfíbolitas	Moderada	2
Unidad Metarenisca, Depósitos Aluviales, Unidad de los Esquistos Calcáreos, Unidad Micácea, Zona de Influencia de la Caliza	Media	3
Depósitos Coluviales, Unidad Calcárea	Alta	4

#### 4.4.2 Parámetro de Relieve Relativo ( $S_r$ )

Los valores de relieve relativo se expresaron como rangos de pendientes en grados. Los rangos utilizados para evaluar el índice de relieve relativo fueron los mismos utilizados para la elaboración del mapa de orientación geotécnica. En cuanto a los ca-

lificativos y escala de valores empleados se consideraron los usados por Mora y Vahrson (1993), generando la clasificación mostrada en la tabla 4.7.

**Tabla 4.7 Valores del índice de relieve relativo (Sr) (Valleé, M., 2006)**

<b>Pendientes en grados</b>	<b>Calificativo</b>	<b>Valor Sr</b>
0° a 3°	Muy Bajo	0
3° a 11°	Bajo	1
11° a 21°	Moderado	2
21° a 31°	Mediano	3
31° a 45°	Alto	4
> 45°	Muy Alto	5

#### **4.4.3 Parámetro Humedad Natural del Suelo (Sh)**

En este caso se recurre a los promedios mensuales de precipitación, efectuando con ellos un balance hídrico simplificado, en donde se asume una evapotranspiración potencial de 125 mm/mes, por lo tanto, precipitaciones mensuales inferiores a 125 mm no conducen a un aumento de la humedad del terreno, mientras que una precipitación entre 125 y 250 mm si la incrementa, y precipitaciones mensuales superiores a 250 mm conducen a una humedad del suelo muy alta (Mora, R. et al., 1992). Seguidamente, a los promedios mensuales se les asignan los valores del cuadro 5 y se efectúa la suma de estos valores para los doce meses del año, con lo que se obtiene un valor que puede oscilar entre 0 y 24 unidades. El resultado refleja los aspectos relacionados con la saturación y la distribución temporal de humedad en el terreno (Mora, R. et al., 1992). La valoración del parámetro se presenta en el cuadro 6.

**Tabla 4.8.1. Valores asignados a los promedios mensuales de lluvia (Mora, R. et al., 1992).**

<b>Promedio de precipitación mensual [mm]</b>	<b>Valor asignado</b>
125	0
125-250	1
>250	2

**Tabla 4.8.2 Valoración del parámetro humedad del terreno ( $S_h$ ) (Mora, R. et al., 1992).**

Suma de valores asignados a cada mes	Descripción	Valoración 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

Los rangos utilizados para categorizar los valores de precipitaciones promedios mensuales, se reclasificaron de la siguiente manera:

- A. Se identificaron una serie de estaciones pluviométricas distribuidas en el Área Metropolitana.
- B. Se estableció el promedio de las precipitaciones mensuales en las estaciones identificadas inicialmente, desde 1998 hasta 1999. El período escogido responde a la falta de disponibilidad de datos pluviométricos más actualizados.
- C. Los rangos utilizados para categorizar los promedios de precipitaciones mensuales obtenidos de la correlación se presentan en la tabla 4.8.

**Tabla 4.8.3. Modificación de los valores para las categorías de precipitación promedio mensual en el Distrito Metropolitano de Caracas (Valleé, M., 2006).**

Precipitación Promedio (mm/mes)	Valor ( $S_h$ )
< 80	0
80 - 135	1
> 135	2

#### **4.4.4. Parámetro Intensidad de Precipitaciones ( $T_p$ )**

Debido a que los rangos utilizados por Mora y Vahrson (1993), para la ponderación del factor intensidad de precipitaciones, exceden en un porcentaje considerable a las intensidades asociadas a movimientos de remoción en masa que se han registra-

do para el Área Metropolitana de Caracas, fue necesario ajustar los rangos de precipitaciones considerados a las características pluviométricas del área.

Para la modificación de estos rangos, en primer lugar, se elaboró un registro de los movimientos de remoción en masa ocurridos en Distrito Metropolitano de Caracas en el año 2005. Luego se registraron las intensidades de precipitaciones correspondientes al día del evento y a los días anteriores hasta un total de tres días.

Una vez obtenido el valor máximo de precipitaciones diarias asociadas a movimientos de remoción en masa, se calcularon los valores equivalentes a los valores límite de cada calificativo propuesto por Mora y Vahrson (1993). Tabla 4.8.

**Tabla 4.9. Valores del índice de influencia de la intensidad de las lluvias ( $T_p$ )**  
(Valleé, M., 2006).

<b>Lluvias máximas N &lt; 10 años promedio</b>	<b>Calificativo</b>	<b>Valor</b>
< 20	Muy Bajo	1
20 - 40	Bajo	2
40 - 55	Medio	3
55 - 75	Alto	4
> 75	Muy Alto	5

#### **4.4.5. Parámetro Intensidad Sísmica ( $T_s$ )**

El parámetro utilizado para evaluar la influencia de la actividad sísmica en los taludes es la aceleración producida por el sismo, la cual está relacionada con la intensidad del movimiento en un determinado sitio.

Los rangos de aceleraciones considerados para evaluar la influencia de este parámetro en el área de estudio fueron los mismos empleados por Mora y Vahrson (1993).

## 4.5 Elaboración Modelo Final

Cada uno de los factores se pondera con un valor, el cual define su grado de influencia en la activación de movimientos de remoción en masa. Luego los valores se combinaron mediante la expresión 4.1 (Mora y Vahrson, 1993).

$$\mathbf{H_1} = ( S_r \cdot S_t \cdot S_h ) \cdot (T_s + T_p) \quad 4.1$$

Donde:

$H_1$  = Susceptibilidad a deslizamientos de ladera.

$S_r$  = Valores del índice de relieve relativo.

$S_t$  = Valores del Factor de litología.

$S_h$  = Valores del índice de influencia de la humedad natural del suelo.

$T_s$  = Valores del índice de influencia de la intensidad sísmica

$T_p$  = Valores del índice de influencia de la intensidad de las precipitaciones.

Los valores obtenidos de la Ecuación 4.1 son clasificados de acuerdo a la tabla 4.9.

### 4.5.1 Sub-modelo de litología ( $S_t$ )

Este factor cuantifica la influencia de los diferentes tipos de suelo y rocas presentes en el área de estudio a producir movimientos de remoción en masa. Para la elaboración de este sub-modelo se le asignaron valores a los diferentes tipos de litología presentes en el área de estudio, según la clasificación propuesta en la tabla 4.6.

**Tabla 4.10. Clases de susceptibilidad y/o amenaza de deslizamientos de laderas. (Mora y Vahrson, 1993).**

<b>Susceptibilidad</b>	<b>Clase</b>	<b>Grado de susceptibilidad</b>
0 -6	I	Muy Bajo
7 -32	II	Bajo
33 -162	III	Moderado
163 - 512	IV	Mediano
513 -1250	V	Alto
> 1250	VI	Muy Alto

#### **4.5.2 Sub-modelo humedad natural del suelo (Sh)**

Se refiere a la cantidad de agua que se mantiene en el subsuelo ocupando vacíos entre las partículas de suelo, la ponderación del factor humedad se realizó mediante los siguientes pasos:

- a) Identificación de las estaciones pluviométricas distribuidas en la región a evaluar.
- b) Elaboración de un promedio de las precipitaciones mensuales de todas las estaciones,
- c) Categorización de los promedios mensuales de cada estación.
- d) Suma de los doce valores asignados a cada mes.
- e) Calificación del valor acumulado, según la tabla 4.10.

Por ocupar el área de estudio una extensión de 160 km<sup>2</sup>, no se consideraron variaciones en los promedios de precipitaciones mensuales dentro de ésta. El valor acumulado en la parte (d) corresponde al valor del factor humedad para toda el área.

**Tabla 4.11. Valores para el factor humedad natural del suelo (Sh) (Valleé, M., 2006).**

Valor Acumulado	Calificativo	Valor Factor Humedad
0 - 4	Muy Bajo	1
5 - 9	Bajo	2
10 - 14	Medio	3
15 - 19	Alto	4
20 - 24	Muy Alto	5

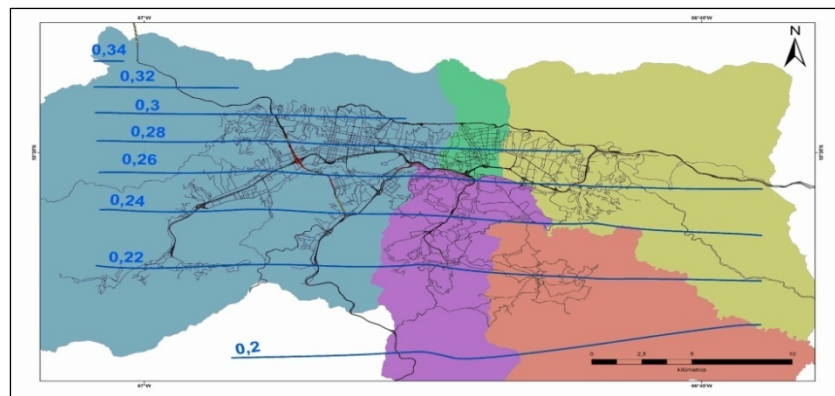
#### 4.5.3 Sub-modelo Relieve Relativo (Sr)

Los valores de relieve relativo expresados como valores de pendiente en grados se les asignaron una ponderación según la tabla 4.7.

#### 4.5.4 Sub-modelo del índice de influencia de intensidad sísmica (Ts)

Para realizar este sub-modelo se identificó en un mapa regional de aceleraciones (Figura 4.5) los valores correspondientes al área de estudio. Como no existen variaciones de estos valores de aceleración dentro del área, se consideró un valor único para toda su extensión y se clasificó según la tabla 4.11.

Las aceleraciones consideradas en este estudio son aceleraciones pico en basamento rocoso, con una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años.



**Figura 4.5 Mapa de aceleraciones pico en el basamento rocoso con un 10% de excedencia en 50 años (Azuaje et al, 2005).**



**Tabla 4.12. Valores del factor de intensidad sísmica ( $T_s$ ), (Mora y Vahrson, 1992)**

<b>Intensidades Mercalli Modificado</b>	<b>Aceleraciones Pico %g</b>	<b>Aceleraciones Pico Gals</b>	<b>Calificativo</b>	<b>Valor Fac- tor Sismicidad</b>
III	1 – 12	9,8 - 122,6	Leve	1
IV	13 – 20	122,7 - 201,1	Muy Bajo	2
V	21 – 29	201,2 - 289,4	Bajo	3
VI	30 – 37	289,5 - 367,9	Moderado	4
VII	38 – 44	368,0 436,5	Medio	5
VIII	45 – 55	436,6 544,5	Elevado	6
IX	56 – 65	544,6 642,6	Fuerte	7
X	66 – 73	642,7 721,0	Bastante Fuerte	8
XI	74 – 85	721,1 838,8	Muy Fuerte	9
XII	> 85	>838,9	Extrem. Fuerte	10

#### **4.5.5 Sub-modelo del índice de influencia de la intensidad de las precipitaciones ( $T_p$ )**

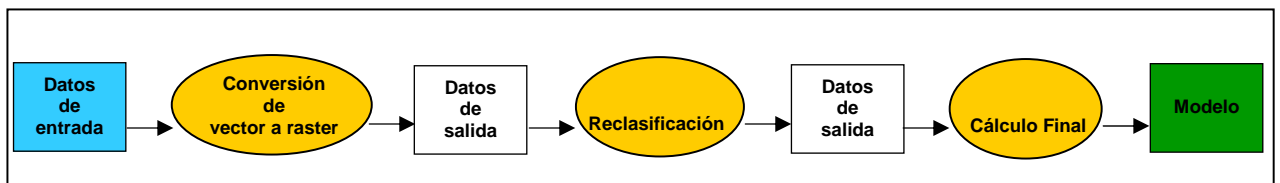
El procesamiento de este factor se llevó a cabo de la siguiente manera:

- b) Identificación de las estaciones pluviométricas distribuidas en el área metropolitana. Las estaciones seleccionadas fueron: San Isidro, Manzanares, Macuto, San Francisco, Los Venados, San José, Humboldt, Picacho Galipán, Campo Alegre, UCV y Cagigal.
- c) Determinación de la serie de valores máximos diarios anuales para todas las estaciones.
- d) Exclusión de los valores fuera de serie.
- e) Cálculo del promedio de los valores de precipitaciones.
- f) Determinación del valor correspondiente al factor lluvia.

Finalmente cada factor se combinó mediante la ecuación 4.1 utilizando el *Raster Calculator* de la extensión *Spatial Analyst* de *ArcGIS 9.1*.

## 4.6 Procesamiento de los datos en el SIG

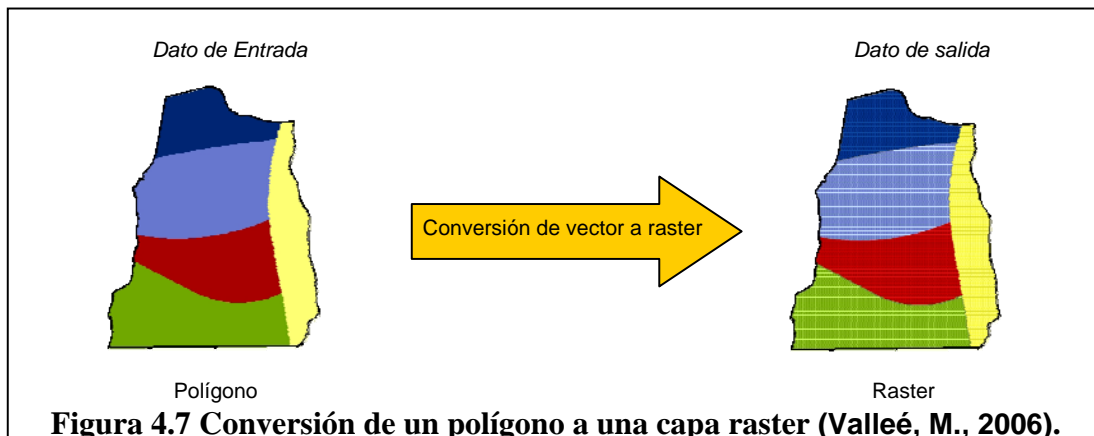
La elaboración de ambos modelos requirió de un procesamiento de los datos de campo, realizado en tres fases. Cada fase cuenta con una entrada de datos, una función de transformación de éstos y datos resultantes. La secuencia utilizada se muestra en la figura 4.6, donde los cuadros azules representan los datos de entrada, los óvalos amarillos las funciones ejecutadas y los cuadros verdes los datos derivados, que en algunos casos constituían los datos de entrada para una siguiente fase.



**Figura 4.6 Diagrama de proceso para la elaboración del modelo (Valleé, M., 2006).**

### 4.6.1 Conversión de los datos de vectoriales a raster

El formato utilizado para almacenar la información en la base de datos fue de tipo vectorial, el cual utiliza puntos, líneas o polígonos para la representación de los objetos geográficos. Para realizar las operaciones algebraicas o de superposición por peso para la integración de los mapas, fue necesario hacer una conversión de los datos a formato raster, que es la representación de la información por medio de una malla regular de tipo mosaico (Figura 4.7) donde cada celda *-píxel-* es la unidad mínima de información que lleva asociado un número. Este número se corresponde con el valor de un fenómeno geográfico en el punto de la superficie terrestre que representa la celda. El tamaño de la celda utilizado para este estudio fue de 5 m<sup>2</sup>.



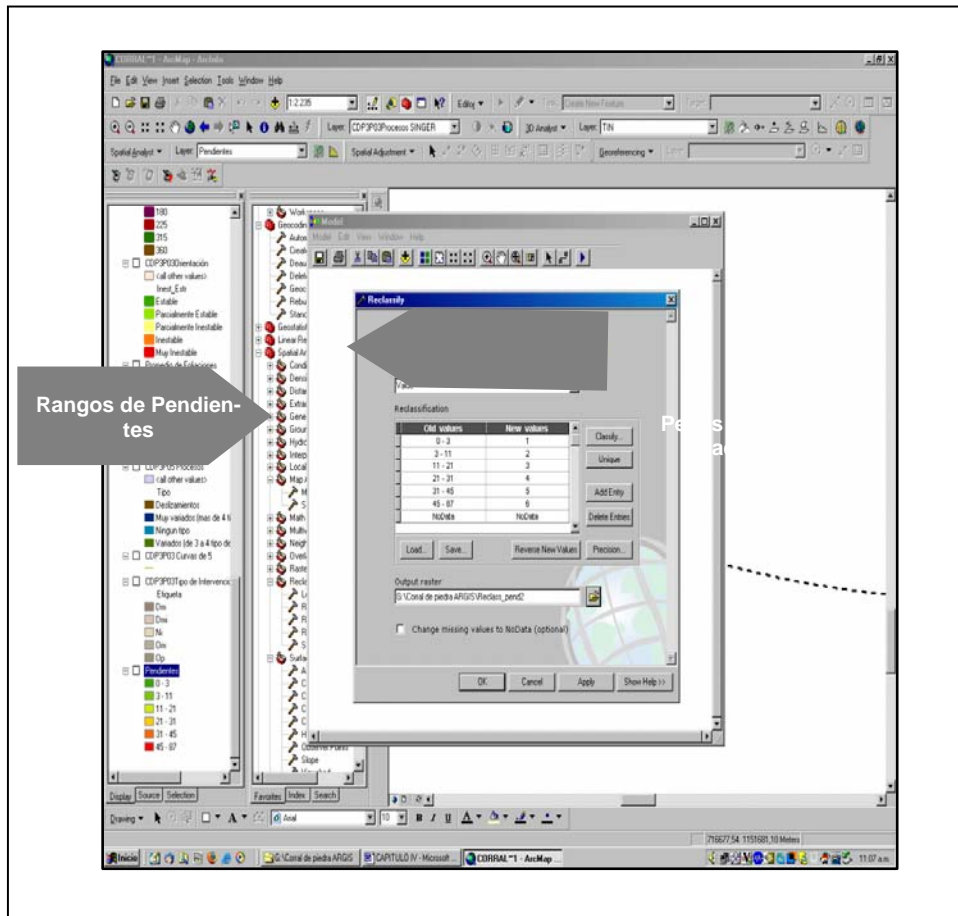
#### 4.6.2 Reclasificación de atributos

En este proceso se reemplazaron los valores de los atributos de los datos almacenados en función de criterios de rango aplicados sobre los datos originales, siendo los valores asignados a cada píxel en el proceso de conversión a raster modificados por nuevos valores.

En el caso del mapa de orientación geotécnica estos nuevos valores corresponden al grado de estabilidad asignados a cada variable evaluada, mientras que para el modelo de susceptibilidad constituyen los valores de los índices de influencia de cada parámetro, un ejemplo de este proceso se muestra en la figura 4.8.

#### 4.6.3 Cálculo final

Para generar el mapa de geodinámica externa y el mapa de orientación geotécnica, la integración de las capas convertidas a formatos raster y reclasificadas se hizo a través de un proceso de *Overlay* por peso, que consistió en la combinación de los múltiples valores de las capas de entrada. En cuanto al modelo de susceptibilidad a movimientos de remoción en masa, los valores de las capas de entrada se combinaron a través de una operación algebraica.



**Figura 4.8** Proceso de reclasificación de la capa de pendientes (Valleé, M., 2006).

## **CAPÍTULO V**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

5.1. Análisis de Estabilidad Geométrica de las Laderas

5.2. Análisis Clinométrico

5.3. Análisis de Estabilidad de las Laderas (Orientación Geotécnica)

5.4. Análisis de los Sub – Modelos Usados en la Metodología de Mora & Vahrson  
Modificada

5.5. Modelo de Susceptibilidad a Movimientos de Masa

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza la descripción de los mapas temáticos, y de los mapas finales. Una vez aplicada la metodología explicada anteriormente, se generaron los mapas temáticos de litología, pendientes, geodinámica externa, estructural, estabilidad geométrica de las laderas y el mapa de estabilidad de laderas u orientación geotécnica, además de los sub - modelos de litología, humedad natural de los suelos, pendientes, precipitaciones diarias e intensidad sísmica, y el modelo final de susceptibilidad a movimientos de masa. Los mapas temáticos de litología, geodinámica externa y el estructural son los que se obtuvieron en el estudio geotécnico del Área Metropolitana de Caracas, Sector Central, elaborado en 1985 por Feliciani, P. *et al.* Por lo tanto el análisis de los mismos será el que se empleó en dicho estudio, y es mencionado en el capítulo II del presente trabajo, los otros mapas fueron generados para este estudio. De acuerdo a estos se puede analizar lo siguiente:

### 5.1. ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD GEOMÉTRICA DE LAS LADERAS

Para la elaboración de este mapa se zonificó el área de estudio en 5 rangos para la diferencia entre el rumbo de las laderas y el rumbo de los patrones de foliación obtenidos del mapa de orientación de las laderas y del mapa de zonas de orientación (mapas ----- y -----, respectivamente).

#### 5.1.1. Diferencia $\leq 22,5^\circ$ Zonas Muy Inestables

Abarca la menor área en la región de estudio, su principal ubicación se encuentra al sur de la autopista Francisco Fajardo, al sur de Montalbán. Abarca un porcentaje del 12% del área estudiada, aproximadamente. Estas zonas se consideran las de mayor riesgo, puesto que el rumbo de las laderas es similar al rumbo de los planos de foliación que dominan en estos sectores, teniendo como máxima diferencia  $22,5^\circ$ ; esta baja diferencia implica que existe una mayor probabilidad de ocurrencia de desliza-

mientos de tipo gravitacional. Muchas de estas zonas son resultado de un corte o relleno del material, hecho de manera desordenada por razones urbanísticas. Estas zonas se encuentran dispersas en la región de estudio, pero predominan en sectores urbanizados de forma desordenada. Esta zona se encuentra generalmente en la unidad de los esquistos micáceos, razón por la cual debe ser considerada la inestabilidad geométrica de las laderas, ya que los planos de foliación están más marcados en esta unidad litológica, y cuando la roca está meteorizada es más propensa a un movimiento de remoción en masa.

#### **5.1.2. $22,5^\circ < \text{Diferencia} \leq 45^\circ$ Zonas Inestables**

Estas zonas se encuentran dispersas en toda la región de estudio, están principalmente ubicadas en los depósitos aluviales. Sus principales sectores son la autopista Francisco Fajardo, la autopista Valle – Coche, al Oeste de La Trinidad y Petare. Abarca un porcentaje de 19% sobre el total del área estudiada, aproximadamente. Este sector se caracteriza por ser inestable, debido a que la diferencia entre los ángulos es relativamente baja. Los sectores de mayor tamaño están ubicados en los depósitos aluviales, es decir, en zonas de pendientes suaves. En aquellos sectores que se encuentran en laderas, las cuales presenten cierta pendiente, pueden presentarse movimientos de remoción en masa, en los cuales, una de las principales causas puede ser la inestabilidad geométrica de las laderas.

#### **5.1.3. $45^\circ < \text{Diferencia} \leq 90^\circ$ Zonas Parcialmente Inestables**

Las zonas parcialmente inestables tienen como principales sectores la parte norte de la autopista Francisco Fajardo (Carapita), Caricua, la parte norte de la autopista Valle – Coche (Al norte del sector Coche), al sur de Macaracuay y la parte sur – este de El Llanito. Abarca un porcentaje aproximado de 20% sobre el total del área de estudio. Estas zonas tienen una mayor diferencia entre el rumbo de la foliación y la orientación de la ladera, lo cual se traduce a una disminución (respecto a las zonas anteriores) en la probabilidad de ocurrencia de un movimiento de masa. Sin embargo,

estas zonas, generalmente se encuentran cercanas a zonas muy inestables o inestables, por lo tanto el riesgo existente debe ser considerado. Esta zona se encuentra generalmente en las unidades: calcárea y de esquistos micáceos principalmente, dichas unidades cuando se encuentran meteorizadas aumentan la probabilidad de algún movimiento de remoción en masa en estas zonas.

#### **5.1.4. $90^\circ < \text{Diferencia} \leq 135^\circ$ Zonas Parcialmente Estables**

Esta zona al igual que las anteriores está dispersa en todo el Distrito Metropolitano de Caracas. Sus principales sectores son al Sur –Este de La Vega, la parte nor - oeste de Caricuao, en el Cementerio, en la parte Nor-Este del Fuerte Tiuna, en El Hatillo y al Este de La Lagunita. Abarca el 18%, aproximadamente, en el total de la región de estudio. Este sector se encuentra en las unidades litológicas: Filítica, Micácea, Calcárea y de esquistos calcáreos. Estas zonas son relativamente estables, puesto que tiene una diferencia considerablemente alta, entre el rumbo de la foliación y la orientación de las laderas. Estas zonas aún presentan probabilidad de ocurrencia de un movimiento de remoción en masa, pero esta posibilidad es relativamente baja.

#### **5.1.5. $\text{Diferencia} > 135^\circ$ Zonas Estables**

Estas zonas son las que abarcan mayor área sobre el total de la región de estudio, con un 31%. Se encuentran dispersas en todo el Distrito Metropolitano de Caracas, La Vega, Carapita, la parte sur y norte de Caricuao, al sur de Coche, en Fuerte Tiuna, al norte de Prados del Este, en la Trinidad, en Macaracuay y al norte de La Lagunita. Como es una zona que se encuentra tan dispersa abarca muchas de las unidades litológicas. En estas zonas existe una marcada diferencia entre los ángulos de foliación y la orientación de las laderas, lo que indica que son estables, basados en la geometría de las laderas, puesto que estos planos se encuentran en geoméricamente en contracuesta.



## 5.2 ANÁLISIS CLINOMÉTRICO

El estudio clinométrico del Distrito Metropolitano de Caracas, sector central, se realizó teniendo en cuenta 6 (seis) rangos de pendientes para las laderas. La división de estos se muestra en la tabla 5.5:

Rango de Pendientes	Clasificación
0° -3°	Muy Suave
3° - 11°	Suave
11° - 21°	Mediana
21° - 31°	Fuerte
31° -45°	Abrupta
> 45°	Muy Abrupta

**Tabla 5.5. Clasificación aplicada a los rangos de pendientes usados.**

### 5.2.1. Pendientes Muy Suaves

Esta zona se encuentra principalmente en la Autopista Francisco Fajardo y en la carretera Valle – Coche, La Trinidad y la parte oeste de Petare. Abarca un área del 11% sobre el total de la región estudiada. Estas zonas tienen la menor probabilidad en la ocurrencia de movimientos de remoción en masa. Se encuentran dispersas en todo el Distrito Metropolitano de Caracas. Principalmente dominan en las unidades litológicas de depósitos aluviales.

### 5.2.2. Pendientes Suaves

Se encuentran dispersas en todo el Distrito Metropolitano de Caracas, sector central, abarcando un área aproximada del 12% sobre el total de la región de estudio. Principalmente se pueden observar al este, en el Llanito, en Macaracuay, Prados del Este, la parte este de Caricuao y La Lagunita. En vista de que las pendientes son suaves, el riesgo presente en estos sectores es bajo. Esta presente de forma más notoria

en la mitad este de la región de estudio. Domina en litotipos variados, principalmente en la Unidad de Esquistos Calcáreos.

### **5.2.3. Pendientes Medianas**

Estas zonas se encuentran principalmente en Fuerte Tiuna, y en proporción menos abundante, hacia la mitad este de la región de estudio. Abarca un porcentaje de un 7% sobre el total. Estas zonas tienen como principal característica la probabilidad de baja a media para la ocurrencia de movimientos de remoción en masa, por lo tanto el valor que se le asignó es medio. Se presenta dispersa en la mitad este del Distrito Metropolitano de Caracas.

### **5.2.4. Pendientes Fuertes**

Estas zonas se encuentran principalmente en la mitad este del mapa, aunque se observan, de manera menos abundante en la parte oeste. Tienen un porcentaje en área de un 30% sobre el total del Distrito Metropolitano de Caracas, sector central, aproximadamente. Estas zonas presentan un riesgo de mediano a alto, que debe ser considerado, debido a que en la región de estudio dominan unidades litológicas de poca resistencia y, en varios casos, meteorizadas, lo cual es un factor detonante para que se presenten fenómenos de movimientos de remoción en masa.

### **5.2.5. Pendientes Abruptas**

Estas zonas se encuentran principalmente en la mitad oeste de la región de estudio. Abarcan un área aproximada del 35% sobre el total del mapa, siendo las zonas de mayor extensión en el Distrito Metropolitano de Caracas, sector central. Al abarcar un área tan extensa, se encuentran en diferentes unidades litológicas. Presentan un riesgo alto, que debe tenerse en cuenta, ya que pueden ocurrir con cierta facilidad movimientos de remoción en masa. Estas zonas se encuentran en varios sectores sobrepoblados, urbanísticamente, lo cual aumenta el riesgo que debe ser considerado.

### **5.2.6. Pendientes Muy Abruptas**

Estas zonas son las de menor extensión, con un 5% sobre el total de la región de estudio. Se pueden observar al sur de Macaracuay, en Fuerte Tiuna, al sur de Montalbán y al norte de Caricuao. Corresponden a las zonas de mayor riesgo, y al igual que las anteriores en el presente estudio se consideraron con un riesgo alto. Son las zonas de mayor probabilidad de ocurrencia de movimientos de remoción en masa, lo que implica que deben ser sometidas a rigurosos estudios geotécnicos para un aprovechamiento óptimo.

## **5.3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LAS LADERAS (ORIENTACIÓN GEOTÉCNICA)**

Una vez integrados los parámetros geológicos (litología, geodinámica externa, estabilidad geométrica de las laderas y pendientes) se obtuvo el mapa de estabilidad de laderas, en el cual se observa una zonificación de acuerdo al grado de estabilidad. Dicha zonificación se explica a continuación:

### **5.3.1. Zona Estable**

Se presenta al norte de la autopista Francisco Fajardo y en la parte sur de la Av. Intercomunal de Baruta. Es la zona que abarca la menor área en la región estudiada. Esta zona presenta una litología compuesta por las unidades litológicas calcáreas y de esquistos calcáreos. Esta zona presenta un relieve muy suave que tiende a ser estable, presentando ángulos de inclinación entre  $0^{\circ}$  -  $3^{\circ}$ . La estabilidad geométrica de los taludes presenta una contra cuesta que varía entre  $90^{\circ}$  -  $135^{\circ}$ , y  $< 135^{\circ}$ , lo cual implica que las laderas son geoméricamente estables en esta zona. La geodinámica externa que presenta es de Medios aluviales holocenos y del pleistoceno superior. Coluvial estabilizado. Relleno artificial. Vestigios de terrazas abandonadas. Cubetas de decan-

tación muy localizadas, algunos sectores bastante intervenidos urbanísticamente (procesos geomorfológicos incipientes). Esta zona es la de mayor estabilidad.

### **5.3.2. Zona Parcialmente Estable**

Estas zonas se encuentran dispersas en todo el mapa, pero de manera mayoritaria en los límites de la autopista Francisco Fajardo, hacia La Vega, rodeando el distribuidor La California, limitando la autopista Valle-Coche, En el flanco norte de la Av. Principal de Caricua, en la Trinidad, y en el Hatillo. Se caracteriza por presentar una litología variada. Destacando entre las unidades: de Depósitos aluviales, Depósitos coluviales, de los esquistos calcáreos y micáceos. Presentan un relieve suave, con pendientes entre  $0^{\circ}$  y  $11^{\circ}$ . Su estabilidad geométrica de laderas viene dada por una contra cuesta de que va desde el intervalo comprendido entre  $22,5^{\circ}$ - $45^{\circ}$ , hasta  $> 135^{\circ}$ , lo que implica variados grados de estabilidad, aportados por esta variable. La geodinámica externa presente en esta zona está caracterizada por: Medios aluviales holocenos y del pleistoceno superior, Coluvial estabilizado, Relleno artificial, Vestigios de terrazas abandonadas, Cubetas de decantación muy localizadas, algunos sectores bastante intervenidos urbanísticamente (procesos geomorfológicos incipientes), Medios montañosos. Buena protección vegetal. Esguerramiento difuso sin acción importante. Poco intervenida (procesos geomorfológicos incipientes); Medios montañosos con problemas de erosión incipiente por la exposición de la vertiente. Riesgo de desequilibrio al intervenir. Esta zona es la tercera en cuanto a mayor área abarcada, de la zona de estudio, lo cual implica que un porcentaje relativamente importante del terreno posee un grado de estabilidad relativamente bueno.

### **5.3.3. Zona Parcialmente Inestable**

Esta zona está distribuida uniformemente en toda la región de estudio. Es la que abarca mayor área, y se puede clasificar como parcialmente inestable debido a las características que predominan. Está presente tanto en el lado este del mapa, como en el oeste. La litología que presenta es: Unidad de los esquistos calcáreos, Depósitos co-

luviales, Unidad Metarenisca, Unidad micácea y Zona de influencia de la caliza, además de presentar Serpentinitas, Unidad Calcárea y Unidad Filítica. El relieve característico en esta zona es muy variado, al igual que la litología, y va desde  $11^\circ$  hasta  $45^\circ$ . La estabilidad geométrica de las laderas, viene dada por el ángulo en contra cuesta que varía entre  $22,5^\circ$ - $45^\circ$  y  $>135^\circ$ . Las características de geodinámica externa son: Medios montañosos con ciertos problemas de erosión laminar y concentrada protección vegetal intervenida. Desequilibrio latente; Medios con problemas inducidos. Drenajes obstruidos. Movimientos en masa lentos. Taludes mal preservados. Equilibrio precario. Vegetación muy intervenida en algunos sectores; Medios correspondientes a zonas marginales. Percolación de aguas negras que alteran químicamente el material. Bolsones de alteración esporádicos y difíciles de mapear; y Medios muy intervenidos arbitrariamente. Cortes y rellenos mal preservados. Taludes en equilibrio precario. Comprende sectores de crecimiento urbano desordenado, con poca o ninguna vegetación. Problemas de erosión.

#### **5.3.4. Zona Inestable**

En esta zona la geología es desfavorable, desde el punto de vista de la resistencia de los materiales. Al igual que la zona 3, se encuentra distribuido en toda la región de estudio, teniendo importantes áreas al sur de Caricua, al sur de Prados del Este, en el flanco norte de la Av. Intercomunal del Valle. Comprende una litología de: Unidad de los esquistos calcáreos y Unidad micácea. Tiene un relieve de medio a fuerte, con pendientes que tienen inclinaciones que van desde el intervalo  $21^\circ$ - $31^\circ$  hasta el intervalo  $>45^\circ$ . La estabilidad geométrica de los taludes viene desde el intervalo de  $45^\circ$ - $90^\circ$ , hasta  $<22,5^\circ$ , siendo ésta una característica de inestabilidad geométrica de las laderas. La geodinámica externa presente viene dada por: Medios correspondientes a zonas marginales. Percolación de aguas negras que alteran químicamente el material. Bolsones de alteración esporádicos y difíciles de mapear; Medios muy intervenidos arbitrariamente. Cortes y rellenos mal preservados. Taludes en equilibrio precario. Comprende sectores de crecimiento urbano desordenado, con poca o ninguna vegetación. Problemas de erosión; Medios con problemas de erosión concentrada.

Escurrimiento de concentración inicial. Posibilidad de erosión regresiva. Posibilidad de derrumbes en la base de las vertientes. Esta zona abarca la segunda mayor cantidad de área de la región estudiada.

### **5.3.5. Zona Muy Inestable**

Esta zona se encuentra en la parte sur de la región estudiada, al este y oeste de la carretera Panamericana y al nor - este de La Trinidad. Presenta una litología de: Unidad micácea, Depósitos coluviales y Unidad Filítica. Principalmente presenta pendientes mayores a  $45^\circ$ . En ángulo de contra cuesta, dado por la estabilidad geométrica de las laderas es menor a  $22,5^\circ$ , lo cual la hace la inestable geoméricamente. Sus características de geodinámica externa son: Medios con problemas de erosión concentrada. Escurrimiento de concentración inicial. Posibilidad de erosión regresiva. Posibilidad de derrumbes en la base de las vertientes; y Medios con problemas de erosión en cárcavas. Degradación en surcos inducidos por intervención. Erosión regresiva. Es la segunda zona de menor área en toda la región de estudio.

A manera general la parte central del Distrito Metropolitano de Caracas, presenta un terreno parcialmente inestable, lo cual la hace más susceptible a fallamientos del terreno. Esto implica que muchas de las zonas construidas están en lugares de riesgo que debería ser considerado. Predominan las zonas parcialmente inestables, seguidas de las zonas inestables, luego las zonas parcialmente estables, después las zonas muy inestables y por último las zonas estables. Esto da una idea general del riesgo existente en la región de estudio.

## **5.4. ANÁLISIS DE LOS SUBMODELOS USADOS EN LA METODOLOGÍA DE MORA & VARHSON MODIFICADA**

### **5.4.1. Sub – Modelo de Humedad Natural de los Suelos Sh**

Este estudio incluye la humedad natural en los suelos, a causa del agua que se filtra a través del material, debido a la permeabilidad del mismo. El resultado obtenido de este estudio es bastante general, debido a que la región presenta un solo grado de humedad natural. Se observa que en el Distrito Metropolitano de Caracas, sector central, la humedad natural de los suelos es de baja a media y se clasificó con el valor 2, lo que indica que, en general, la litología tiene una permeabilidad de baja a media, generando una probabilidad para la ocurrencia de movimientos a remoción en masa relativamente baja.

### **5.4.2. Sub – Modelo de Intensidad Sísmica Ts**

Este modelo presenta la intensidad sísmica presente en el Distrito Metropolitano de Caracas, sector central. El resultado obtenido es bastante uniforme, presentando una variación de escasa proporción en la esquina nor – este de la región de estudio. La intensidad sísmica que domina es de tipo medio y se clasificó con el valor 3, lo cual implica que existe cierta probabilidad a que ocurran movimientos sísmicos en la región de estudio. Este riesgo presente, aumenta la susceptibilidad a movimientos de remoción en masa.

### **5.4.3. Sub – Modelo Litológico St**

Este modelo presenta tres valores de susceptibilidad a movimientos de remoción en masa. Las zonas de valor 2 son las más escasas, se encuentran principalmente en el depósito de aluvión que está al oeste en la autopista Francisco Fajardo, se observa también en Petare y en La Lagunita. Estas zonas de tipo 2, son las menos susceptibles a movimientos de remoción de masa, aunque presentan una probabilidad de baja a media, la cual debe ser considerada. Las zonas de tipo 3 están de manera más

marcada en la mitad este del modelo obtenido, éstas se caracterizan por estar presentes en distintos tipos litológicos, presentando una estabilidad media de las laderas, lo cual se traduce a una susceptibilidad media a movimientos de remoción en masa. El último tipo de zonas son las de valor 3, son las más extensas y abundantes en el Distrito Metropolitano de Caracas, sector central, estas zonas, al igual que las anteriores, presentan varias unidades litológicas, y principalmente se encuentran en zonas de estabilidad en laderas muy baja, lo cual implica que sus características litológicas las hace susceptibles a movimientos de remoción en masa. En general este modelo permite ver que, litológicamente hablando, el Distrito Metropolitano de Caracas, sector central, presenta distintos grados de susceptibilidad a movimientos de masa, pues las características litológicas presentan resistencia a los movimientos de masa de acuerdo a la composición, a la meteorización y a la intervención que tenga.

#### **5.4.4. Sub – Modelo de Pendientes Sr**

Este modelo, se trabajó a partir del mapa de pendientes, usando los mismos rangos de pendientes. Siendo de  $0^{\circ}$  -  $11^{\circ}$  las zonas estables, las cuales por tener un bajo ángulo de inclinación, son de baja susceptibilidad a deslizamientos, con un valor 1. Las pendientes entre  $11^{\circ}$  -  $21^{\circ}$ , son parcialmente estables, se les clasificó con un valor de susceptibilidad 2. El rango comprendido entre  $21^{\circ}$  -  $31^{\circ}$ , se clasificaron como parcialmente inestables, y se les asignó un valor de susceptibilidad 3, lo cual implica que es medio. Las zonas entre  $31^{\circ}$  -  $45^{\circ}$ , se clasificaron como inestables, y el valor de susceptibilidad asignado a estas es de 4. y las pendientes mayores a  $45^{\circ}$ , se asignaron a la categoría de muy inestables, lo cual implica que el valor de susceptibilidad que se les asignó es de 5, el más alto. La descripción más detallada de estas zonas se puede ver en el análisis clinométrico en este mismo capítulo.

#### **5.4.5. Sub – Modelo de Precipitaciones Diarias Tp**

Este modelo se realizó usando los datos de tres estaciones pluviométricas. El resultado obtenido implica un valor general en todo el Distrito Metropolitano de Cara-



cas, sector central. La cantidad obtenida fue de ...mm/día, a partir de este valor se le asignó el grado de susceptibilidad presente en la región de estudio, el cual es 3, es decir, mediano.

## **5.5. MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA**

El modelo obtenido al aplicar la metodología modificada de Mora y Vahrson, 1993, permitió la zonificación de la región estudiada de acuerdo al grado de susceptibilidad a movimientos de remoción en masa, de acuerdo a los parámetros incluidos en la formula (sub - modelos de: litología, relieve relativo, humedad natural del terreno, intensidad sísmica y precipitaciones diarias) generando en la zona de estudio cuatro zonas con diferentes grados de susceptibilidad. Estas zonas son las siguientes:

### **5.5.1. Susceptibilidad Muy Baja**

Teniendo su ubicación en la zona norte de la región de estudio, se pueden observar al norte de la autopista Francisco Fajardo, en Carapita, entre la autopista Francisco Fajardo y la Av. Principal de Montalbán, al norte de la Av. Roosevelt, en la parte nor.-central de la región de estudio, en la Trinidad, al igual que en Caricuaó y en la California, al este en la región de estudio, siendo esas las principales zonas con este tipo de susceptibilidad. Son zonas, en las cuales la pendiente es muy suave, con un rango entre 0° y 3°. Litológicamente esta conformada por Unidad de los esquistos calcáreos. Son las zonas más estables.

### **5.5.2. Susceptibilidad baja**

Esta zona tiene su ubicación principal en la parte este de Caricuaó, en la parte este de la región estudiada, en la zona entre la California y el Llanito, en la localidad de el Hatillo, y al oeste limitando la autopista Francisco Fajardo a la altura de la Vega.

Esta zona de susceptibilidad presenta principalmente un relieve relativo con pendientes entre 3° y 11°, la litología presente está caracterizada por Depósitos Aluviales limo-arenosos, areno-gravosos y arcillo-arenosos, y Depósitos coluviales arcillosos y arenosos.

### **5.5.3. Susceptibilidad Moderada**

Este tipo de zonas está distribuido en toda la región de estudio, pero su máxima ocupación de área está hacia el este. Se puede apreciar notablemente en la Trinidad, hacia el oeste también es abundante, aunque en menor cantidad, se puede apreciar en Caricuao. Predomina el relieve relativo con pendientes entre 11° y 31°. La litología presente es: Unidad Metarenisca, Unidad micácea, Unidad de los esquistos calcáreos, Depósitos coluviales, Aluviones limo-arenosos, areno-gravosos y arcillo-arenosos y Zona de influencia de la caliza. Esta zona es la segunda de mayor abundancia en la región de estudio.

### **5.5.4. Susceptibilidad Mediana**

Esta es la zona más abundante, se encuentra en todo el mapa, principalmente se puede observar hacia la parte oeste. El relieve que presenta está dominado por pendientes entre 31° y 90°. La litología que presenta es: Unidad de los esquistos calcáreos y Unidad micácea.

Este modelo de susceptibilidad permite dar un valor probable de la ocurrencia de un movimiento de remoción en masa. La zona central del Distrito Metropolitano de Caracas, a rasgos generales, presenta una susceptibilidad, a movimientos de remoción en masa, mediana. Lo cual implica que existe un riesgo a considerarse. Los sub -modelos de humedad natural, precipitaciones diarias e intensidad sísmica, generaron valores, que se podrían considerar homogéneos, debido a que la zona de estudio es relativamente pequeña para estos estudios, por esta razón los factores detonantes en este estudio, son, principalmente, el relieve relativo y la litología.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la actualidad en el Distrito Metropolitano de Caracas, sector central, así como en cualquier localidad, existe una problemática que se busca ser estimada, con el presente estudio, dicha problemática es la de movimientos de masa.

En el presente trabajo se creó una base de datos en SIG (Sistema de Información Geográfica), con la finalidad de permitir la actualización de la información geológica – geotécnica existente. Esta base de datos contiene capas con información litológica, estructural, geomorfológico, de geodinámica externa, clinométrica y de estabilidad geométrica de las laderas, la cual contiene las características principales de cada capa, como descripción, ángulos de rumbo y buzamiento, y en algunos casos espesores de meteorización, cumpliendo de esta forma con el primer objetivo planteado de actualizar la información de orientación geotécnica del Distrito Metropolitano de Caracas, sector central. Algunos mapas contenidos en esta base de datos se obtuvieron del “Estudio Geotécnico de Distrito Metropolitano de Caracas, sector central”, culminado en 1985 por PIERO, F; DELUCA, P.; BARRIENTOS, C.; BASTARDO, S.; RAMIREZ, R.. Dicho estudio empezó a mediados de los años 70.

Una vez creada la base de datos, se integraron las capas de mapas: litológico, clinométrico, de estabilidad geométrica de las laderas y la de geodinámica externa, para obtener el mapa de estabilidad de las laderas, o de orientación geotécnica. Cada capa tiene sus atributos, y a cada uno de estos se les asignó un valor del 1 al 5, siendo el 1 estable y el 5 muy inestable, para poder integrar las capas. Una vez realizada la integración de las 4 (cuatro) capas, se obtuvo el mapa de orientación geotécnica o estabilidad de las laderas. En dicho mapa se observa que en el Distrito Metropolitano de Caracas, sector central, se caracteriza por que predominan las zonas parcialmente inestables, lo cual implica que en las zonas de mayor desarrollo urbanístico está presente un grado de inestabilidad, debido a factores geológicos – geotécnicos. Este grado

de inestabilidad debe ser considerado en muchos de los sectores, ya que para el crecimiento de dichos sectores no se tomó en cuenta este riesgo existente. La determinación de estas zonas de riesgo en la región de estudio, sirve como base en un estudio general del Distrito Metropolitano de Caracas, sector central, para tener una idea acerca del riesgo existente en dicha región. Se puede concluir que existe una probabilidad relativamente alta de la ocurrencia de movimientos de masa, debido a las características geológicas – geotécnicas presentes. El presente estudio se puede usar como base para algún estudio de problemáticas presentes en la región capital.

Al aplicarse la metodología modificada de Mora y Varhson, se pudo obtener el mapa de susceptibilidad. Este mapa indica que el Distrito Metropolitano de Caracas, sector central, presenta un grado medio de susceptibilidad a movimientos de masa. Esto indica que dicha región presenta ciertas características naturales desfavorables, ésto, aunado al crecimiento desordenado en los sectores marginales, genera un riesgo a movimientos de masa latente. La aplicación de una metodología modificada se realizó debido a que las características naturales para las cuales fue desarrollada la metodología original son diferentes a las presentes en el Distrito Metropolitano de Caracas, sector central. Del mapa de susceptibilidad se puede concluir que en la región de estudio deben tenerse normativas de prevención en las zonas donde el riesgo a movimientos de masa es mayor. Al momento de la comprobación del mapa de susceptibilidad se obtuvo, que las zonas de riesgo coinciden con zonas donde se han presentado movimientos de masa, lo cual indica que el modelo obtenido presenta cierto grado de confiabilidad.

Los objetivos planteados en el capítulo I del presente trabajo, fueron completados de manera satisfactoria, obteniéndose una zonificación de la susceptibilidad, además de un mapa de orientación geotécnica. Fué creada una base de datos que contiene información de carácter geológica – geotécnica, la cual se encuentra en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

La litología que domina en la región de estudio corresponde a las formaciones Las Brisas, Las Mercedes y Antímamo, las cuales están compuestas principalmente por esquistos micáceos calcáreos. Estas unidades son las que abarcan las zonas de mayor tamaño. Como estas características son las dominantes, y las zonas de estabilidad dominantes son las parcialmente inestables e inestables, se puede concluir que esta litología no es favorable en un estudio de orientación geotécnica. Los depósitos aluviales se encuentran en las zonas de mayor estabilidad, de acuerdo a esto se concluye que estos materiales, por estar en zonas de morfología plana, y por ser un relleno natural, son los más favorables geotécnicamente hablando.

La intensidad sísmica presente en el área de estudio presenta un factor de mediana influencia, ya que el Distrito Metropolitano de Caracas, sector central, presenta uniformidad en la variación de las curvas de aceleración sísmica, pero esta influencia mediana puede aumentar de acuerdo a factores externos presentes.

En vista de que las zonas de mayor susceptibilidad a movimientos de masa se encuentran en áreas altamente urbanizadas, se concluye que el factor antrópico es fundamental en el aumento del riesgo a movimientos de masa, más aún cuando las zonas son marginales. Los espesores de meteorización encontrados presentan una variación entre 3 y 30 metros, esto aumenta la inestabilidad de estos sectores, debido a que la meteorización presente es, principalmente, química, esto a causa de botaderos de basura, aguas negras y otros factores causados por efectos del hombre.

El submodelo de precipitaciones diarias se obtuvo a través de las mediciones de tres estaciones pluviométricas. Este submodelo presentó una zonificación uniforme a causa de precipitaciones en la región de estudio. La uniformidad de esta zonificación es causada por la intensidad de las lluvias presentes, ya que las mismas se extienden, en muchos de los casos, más de los 160 kilómetros cuadrados, que corresponden al Distrito Metropolitano de Caracas.

La diferencia entre la orientación de las laderas y las estructuras presentes en la región de estudio, permite obtener las zonas de estabilidad geométrica de las laderas. En el Distrito Metropolitano de Caracas, sector central, predominan zonas de estabilidad media a buena. Las pendientes existentes también producen influencia en la susceptibilidad a movimientos de masa, y en la zona dominan pendientes medianas a fuertes, por lo tanto se concluye que las laderas o taludes de la región de estudio presentan una inestabilidad natural o artificial a causa de la clinometría.

En general, los factores de mayor influencia en este estudio, para el modelo de susceptibilidad fueron los submodelos de litología y de relieve relativo, ya que los submodelos de intensidad sísmica, de humedad natural de los suelos y de precipitaciones diarias, presentan uniformidad. Estos submodelos presentan una influencia media en la región de estudio, mientras que los de litología y relieve relativo, presentan muchas variaciones y de acuerdo a estos se obtiene la zonificación principal de la susceptibilidad a movimientos de remoción en masa.

Como principales recomendaciones, se realizan las siguientes propuestas:

- Incorporar los estudios de susceptibilidad a movimientos de remoción en masa en los planes de ordenamiento territorial, debido a la importancia de los mismos para poder valorar los riesgos naturales existentes, y poder determinar cuáles son las zonas de mayor vulnerabilidad y las más seguras, para poder tomar las medidas necesarias al momento de disponer del terreno.
- Se recomienda extender este estudio a todo el Distrito Metropolitano de Caracas, utilizando la metodología de este trabajo. Al extender el área a todo el Distrito Metropolitano de Caracas, se pueden conocer las zonas más vulnerables y su densidad de población, para tener las previsiones necesarias en dichos sectores, e incluso plantear un reordenamiento de los sectores de mayor población y vulnerabilidad, para evitar la ocurrencia de una tragedia.
- En los sectores de mayor susceptibilidad a movimientos de remoción en masa, se debe promover la creación de programas de orientación a las comunidades

acerca de las causas y efectos de los procesos de remoción en masa, cómo pueden identificar indicios de este tipo de procesos y las principales medidas de prevención que deben adoptar, para que en el momento de la ocurrencia, de alguno de estos fenómenos, las comunidades estén informadas y preparadas.

- Desarrollar conciencia en la comunidad para el desarrollo urbano ordenado, evitando así el crecimiento urbanístico desordenado. Cuando hay crecimiento desordenado, se construyen edificaciones en sitios de considerable inestabilidad geotécnica, y muchas veces estas construcciones no toman las previsiones requeridas para los tipos de terreno, también ocurre que en muchos sectores se construyen viviendas con características infrahumanas, esta falta de conciencia permite que el factor humano incremente la susceptibilidad a movimientos de remoción en masa existente en el Distrito Metropolitano de Caracas.
- Plantear un posible reordenamiento territorial en los sectores de mayor inestabilidad, debido a que la sobrepoblación en dichos sectores incrementa la posibilidad de ocurrencia de un movimiento de masa.