

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL
ECUADOR**

Facultad de Ciencias Humanas

Escuela de Ciencias Geográficas

TESIS DE GRADO PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGISTER EN: PLANIFICACIÓN Y ORDENAMIENTO
TERRITORIAL PARA EL DESARROLLO

**“Caracterización geotécnica del centro norte de
Quito relacionada con el uso y ocupación del
suelo por obras civiles”**

Eddy Fernando Sánchez Sánchez

Galo Manrique, Msc., Director de Tesis

QUITO, enero de 2018

DEDICATORIA

Esta Tesis se la dedico a la luz y guía en mi camino, Dios, el que me acompaña y levanta en mis continuas caídas. Creador de los seres más significativos de mi vida:
mi abuelita, mis padres, mis hermanos y mi hijo.

A la gente humilde de las comunidades campesinas y barrios urbano-marginales del
Ecuador.

A los profesores y colegas de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Estar atento a la Polar,
tener mano firme en el timón,
fuerza, coraje, constancia, atención:
esto me ha enseñado mi pobre vida...

Simón Pedro

AGRADECIMIENTOS

Sus esfuerzos y sacrificios son invaluable. Sus valores guía. Junto con mi padre me ha educado y me ha proporcionado todo lo que necesitaba. Su escucha fue fundamental para la culminación de mi Tesis.

Gracias, Madre.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue agregar e integrar información válida, para generar un mapa de caracterización geotécnica basado en SIG y su relación con el uso y ocupación del suelo, para una zona del centro norte de la ciudad de Quito. Esta información técnica ayudará al desarrollo de infraestructura sostenible y resiliente, y alcanzar un desarrollo sostenible de la zona de estudio.

En la zona de estudio; el 55% de los suelos son ML (Limos inorgánicos de baja compresibilidad), el 26% son CL (arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad), el 15% son CL_{ML} y sólo el 3% son MH (limo inorgánico de alta compresibilidad). Los valores NSPT₆₋₁₂ a 6 y 12 metros de profundidad se encuentran entre 3 y 50, y la velocidad de onda sísmica V_{s6-12} entre 155 m/s y 329 m/s. El área de estudio ocupa 404 Ha. y 3.366 edificaciones. El 69% de las mismas son de uno a tres pisos de altura. El 24% son de cuatro a diez pisos de altura. Sólo el 7% son edificios de 10 a 22 pisos de altura.

Para realizar el Mapa de Susceptibilidad Geotécnica se utilizó las variables: geología, pendiente, clasificación de suelos SUCS y velocidad de onda sísmica V_{s6} . Se hizo una calificación de 4 para un suelo más competente y 1 para un suelo menos competente para obras civiles. Luego se valoró las variables con una carga de 1 a 6 en orden de importancia para la caracterización geotécnica, y aplicamos la herramienta Raster Calculator de ArcMap.

Los resultados identifican: 822 edificaciones para la zona de susceptibilidad muy alta, 644 edificaciones para la zona de susceptibilidad alta, 951 edificaciones para la zona de susceptibilidad moderada y 682 edificaciones para la zona de susceptibilidad baja. No existe una relación técnica entre el número de pisos de los edificios y las zonas de susceptibilidad geotécnica.

Con el 69% de las edificaciones menores a tres pisos, se prevé que para los próximos años el centro norte de Quito crezca verticalmente. Las zonas de susceptibilidad geotécnica estudiadas, integran datos físico-mecánicos que pueden ser

usados como referencia para cálculo y diseño estructural sísmo-resistente de cimentaciones e infraestructura civil.

ABSTRACT

The objective of this research was to add and integrate valid information, to generate a map of geotechnical characterization based on GIS and its relation to land use and occupation, for an area of the northern center of the city of Quito. This technical information will help the development of sustainable, resilient infrastructure, and achieve sustainable development of the study area.

In the study area; 55% of the soils are ML (inorganic loams of low compressibility), 26% are CL (inorganic clays of low to medium compressibility), 15% are CL_{ML} and only 3% are MH (inorganic silt of high compressibility). The NSPT₆₋₁₂ to 6 and 12 meters depth values are between 3 and 50, and the seismic wave velocity V_{s6-12} between 155 m / s and 329 m / s. The study area occupies 404 Ha and 3,366 buildings. 69% of them are one to three stories high. 24% are four to ten stories high. Only 7% are buildings of 10 to 22 stories high.

To make the Geotechnical Susceptibility Map, the following variables were used: geology, slope, SUCS soil classification and V_{s6} seismic wave velocity. A grade of 4 was made for a more competent floor and 1 for a less competent floor for civil works. Then the variables with a load of 1 to 6 in order of importance for the geotechnical characterization were evaluated and we applied the tool Raster Calculator of ArcMap.

The results identify: 822 buildings for the very high susceptibility area, 644 buildings for the high susceptibility area, 951 buildings for the moderate susceptibility area and 682 buildings for the low susceptibility area. There is no technical relationship between the number of floors of the buildings and the areas of geotechnical susceptibility.

With 69% of the buildings under three floors, it is expected that for the next few years the northern center of Quito will grow vertically. The geotechnical

susceptibility zones studied, integrate physico-mechanical data that can be used as a reference for calculation and seismic-resistant structural design of foundations and civil infrastructure.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	1
1.1 Justificación.....	1
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3. Pregunta de investigación.....	4
1.4. Objetivos	5
1.5. Hipótesis.....	5
1.6. Operacionalización de la investigación	5
1.7. Metodología y técnicas de investigación.....	6
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	8
2.1. Marco teórico	8
2.2. Marco conceptual	17
CAPITULO 3. PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	22
3.1. Plan de obtención de información cartográfica y numérica.	22
3.2. Diseño del procesamiento de datos usando algebra de mapas.	25
CAPITULO 4. DISPONIBILIDAD, PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	26
4.1. Datos geo-tectónicos del centro norte de Quito.	26
4.2. Datos hidrogeológicos del centro norte de Quito.	27
4.3. Datos de suelos del centro norte de Quito (SUCS).	28
4.4. Datos SPT del centro norte de Quito.....	30
4.5. Datos de velocidad de onda de corte (Vs) del centro norte de Quito.	32
4.6. Datos de densidad de vivienda, ocupación predio y altura de pisos del centro norte de Quito.	35
4.7. Análisis, procesamiento de datos y caracterización geotécnica.	36

4.8. Relación de la caracterización geotécnica del centro norte de Quito con el uso y ocupación del suelo por obras civiles.	40
CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
5.1. Conclusiones	43
5.2 Recomendaciones	45
Bibliografía	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables e indicadores propuestos en la investigación _____	6
Tabla 2. Metodología y técnicas a utilizarse en la presente investigación _____	7
Tabla 3. Datos de sismos históricos que han afectado a la ciudad de Quito entre los años 1587 – 1990 _____	8
Tabla 4. Valores de: Vs, Resistencia al corte no drenado, N del SPT, Espesor del estrato _____	11
Tabla 5. Valores de Vs para Quito _____	12
Tabla 6. Tipo de perfil de suelo, Vs, SPT, Su (resistencia al corte no drenado) __	12
Tabla 7. Ecuaciones empíricas de correlación N del SPT con la velocidad de onda de corte Vs _____	13
Tabla 8. Algunas correlaciones existentes que presentan Vs en función del conteo de golpes NSPT _____	14
Tabla 9. Caracterización física de los suelos SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) _____	19
Tabla 10. Ponderación por geofoma – pendiente _____	22
Tabla 11. Ponderación por amenaza de asentamiento, deslizamientos y cimentaciones en suelo utilizando la caracterización de suelos SUCS _____	23
Tabla 12. Valores típicos de coeficiente de consolidación Cv _____	24
Tabla 13. Prof. Juan M. Pestana Nascimento (University of California, Berkeley) ofrece los valores típicos de coeficiente de compresión Cc _____	24
Tabla 14. Ponderación por velocidad de onda sísmica Vs _____	25

Tabla 15. Clasificación SUCS por zonas W1..W4. _____	30
Tabla 16. Ponderación por geología en la zona de estudio _____	38
Tabla 17. Ponderación por pendiente _____	38
Tabla 18. Ponderación por clasificación SUCS por zonas W1..W4 _____	38
Tabla 19. Clasificación por velocidad de onda sísmica V_s _____	38
Tabla 20. Importancia de las variables _____	39
Tabla 21. Número de pisos por zona de susceptibilidad geotécnica _____	41
Tabla 22. Porcentaje de uso de suelo por zona de susceptibilidad geotécnica _____	42
Tabla 23. Porcentaje de pisos en edificaciones de la zona de estudio _____	44
Tabla 24. Descripción de la zona de estudio en cantidades y unidades _____	44
Tabla 25. Susceptibilidad geotécnica vs. número edificaciones y hectáreas _____	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sismicidad registrada en Quito entre 1990 y 2011 (Quishpe y Quishpe, 2011). _____	9
Figura 2. Amplificación en Umbria 1997 (Suárez, s. f.). _____	11
Figura 3. Espectro de aceleración sísmica para la ciudad de Quito en suelos con una $V_s=300$ m/s (ILB: Falla Llumbisí La Bota; Falla BC: Bellavista-Catequilla ; Falla CEI: Carcelen-El Inca; Falla P: Puengasí). Valores máximos de 1.1 g para la Falla de Puengasí (Quizanga, 2015, p. 123). _____	15
Figura 4. Zonas sísmicas para propósitos de diseño (NEC, 2015, p. 27). _____	15
Figura 5. Espectro de aceleración sísmica para la ciudad de Quito en suelos tipo E con una $V_{s30}=200$ m/s, comparados con el espectro de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC, 2015 en suelos tipo E, calculados para una activación de la falla de Puengasí. Valores máximos de 1.5 g superiores a 1 g de la NEC, 2015 (Quizanga, 2015, p. 136). _____	16
Figura 6. Relaciones de Aceleración Máxima con Intensidad Mercalli Modificada según diferentes autores. (Silva, E., Gioacchini, G., Panella, S., Tornello, M., & Frau, C., 2005) _____	16
Figura 7. Geología Estructural de la ciudad de Quito. Elaboración: Propia. _____	26

Figura 8. Hidrogeología de la zona de estudio. Elaboración: Propia. _____	28
Figura 9. Clasificación SUCS, Centro Norte de Quito. Elaboración: Propia. ____	29
Figura 10. Zonificación SPT a 6 m de profundidad. Elaboración: Propia. _____	31
Figura 11. Zonificación SPT a 12 m de profundidad. Elaboración: Propia. _____	32
Figura 12. Zonificación V_{s6} a 6 m de profundidad. Elaboración: Propia. _____	33
Figura 13. Zonificación V_{s12} a 12 m de profundidad. Elaboración: Propia. _____	34
Figura 14. Ocupación del Suelo - Edificios. Elaboración: Propia. _____	35
Figura 15. Porcentaje de clasificación SUCS en la zona de estudio. _____	36
Figura 16. Correlación SPT_{6-12} a 6 m y 12 m de profundidad. _____	37
Figura 17. Correlación V_{s6-12} a 6 m y 12 m de profundidad. _____	37
Figura 18. Mapa de Susceptibilidad Geotécnica. Elaboración: Propia. _____	39
Figura 19. Clasificación de edificaciones por número de pisos. Elaboración: Propia. _____	40

Tema:

“Aplicación SIG en la caracterización físico-mecánica de los suelos del centro norte de Quito, como aporte al uso del territorio por infraestructura civil”

Título:

“Caracterización geotécnica del centro norte¹ de Quito relacionada con el uso y ocupación del suelo por obras civiles”

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1 Justificación

En la ciudad de Quito se han realizado algunos estudios geológicos, geomorfológicos, geotécnicos y geofísicos cuyos datos se encuentran dispersos y desagregados. El objetivo de esta investigación es agregar e integrar información válida, para general un mapa de caracterización geotécnica basado en Sistemas de Información Geográfica SIG y su relación con el uso y ocupación del suelo para una zona del centro norte de la ciudad. Los datos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, ensayo de Penetración Estándar SPT y Velocidad de Onda de Corte en los primeros 6 y 12 metros de profundidad V_{s6-12} encontrados en los suelos de Quito en algunas publicaciones técnicas serán de gran utilidad en la presente Tesis y servirán de base de estudio de: estabilidad de taludes, diseño de cimentaciones, muros de contención, vías, acueductos y otras obras civiles.

Se debe priorizar la correcta reorganización urbana en las grandes ciudades como Quito, así como concienciar a la población sobre la definición del desarrollo sostenible que se estableció en el informe de Brundtland: “Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para

¹ Zona de estudio: Al norte la Avenida Naciones Unidas; al sur la Avenida Patria; al este la Avenida 6 de Diciembre; al oeste Avenida 10 de Agosto.

atender sus propias necesidades” (Sande, 2013). Pero, no es un proceso simple. Demanda de mejoras en el ordenamiento de las ciudades, a través de legislaciones y normativas locales que aseguren que esa optimización del espacio sea integral y se enmarque en procesos de planificación urbana.

Cada cierto período de tiempo el crecimiento de nuestras ciudades ha obligado a quienes planean su desarrollo, a establecer estrategias que permitan dar saltos cualitativos y cuantitativos en su forma e infraestructura, que adecuen la ciudad a los requerimientos cada vez más apremiantes de expansión, rehabilitación, densificación, crecimiento, etc. (Peñañiel, Pérez y Pérez, 2012, p. 704). Existen muchos aspectos que argumentan que las edificaciones altas tienen un impacto medioambiental mucho más reducido, pero principalmente lo que podemos destacar como ventajas es: “la eficiencia energética y la optimización del suelo urbanizable”(Sande, 2013). El crecimiento de la infraestructura de edificios de gran altura en el centro norte de la ciudad de Quito, especialmente en el período entre 2010 y 2014, debido al incremento de población, demanda de vivienda y la topografía, limita el crecimiento horizontal de la ciudad (Quizanga, 2015, p. 8). En Quito, los edificios están concentrados en el centro norte, sector que representa una tercera parte de la superficie urbana (El Comercio, 2016).

“La ciudad de Quito se encuentra en una zona de alto peligro sísmico, afectado por un sistema de fallas corticales (QFS²), a este sistema de fallas puede atribuirse la generación de sismos severos que podrían ser 40 veces más fuertes a los ocurridos en agosto del 2014” (Quizanga, 2015, p. 9). La norma Ecuatoriana de la Construcción, señala la importancia de estudios a nivel local, en ciudades con poblaciones mayores a 100.000 habitantes. Indica que se debe contar con estudios geotécnicos y sísmicos determinados (NEC, 2015).

Los terremotos generan sobre el suelo efectos de sitio³, aumentando el factor de amplificación de la aceleración sísmica de la superficie del terreno comparada con la aceleración en la roca a profundidad. La respuesta sísmica en el sismo de Loma

² Sistema de Fallas Quito.

³ Según el Prof. Silvestri el efecto de sitio se relaciona con: amplificación de ondas sísmicas, licuación, compactación dinámica y deslizamientos (Como se cita en Suárez, s. f.).

Prieta mostró amplificaciones superficiales de 3 a 8 en los sitios de arcillas profundas (Bray, 1995). La amplificación de onda sísmica transmitida en suelos y rocas depende de la profundidad del suelo sobre roca y la velocidad de onda sísmica V_s (m/s), calculada por ensayos in situ (Suárez, s. f.).

Actualmente el parámetro más utilizado en el diseño sismo-resistente de Ingeniería Civil son los espectros de respuesta (Quizanga, 2015, p. 36). Los espectros de respuesta para diseño sismo-resistente de edificios dependen de la velocidad de onda sísmica transformada a aceleración espectral g (cm/s^2) y periodo de vibración de la infraestructura t en segundos. La capacidad de carga admisible del suelo permite diseñar edificios de mayor altura que transmiten al suelo mayor carga viva y carga muerta; y la velocidad de onda sísmica permite diseños estructurales sismo-resistentes. El Ensayo de Penetración Estándar o SPT permite determinar mediante correlación: la velocidad de onda sísmica, capacidad de carga admisible y otras variables de caracterización físico-mecánicas de los suelos (Alfaro, 2007, p. 16).

Al enfrentar un sismo, la infraestructura civil trabaja como un sistema único con las características físico-mecánicas del suelo donde se encuentra, por tanto se necesita desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes⁴ y de calidad, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano. Según el PNUD, para el año 2030, se propone mejorar la infraestructura para que sea sostenible, aumentando la eficiencia en el uso de los recursos y promoviendo una mayor adopción de tecnologías. Es necesario facilitar el desarrollo de infraestructura sostenible y resiliente en los países en desarrollo con un mayor apoyo financiero, tecnológico y técnico (El País, 2015).

⁴ Para el International Council for Local Environmental Initiatives, ICLEI, la resiliencia “es la habilidad de un sistema, una comunidad o una sociedad expuesta a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse, y recuperarse de una crisis o desastre de una manera eficiente y a tiempo, y poder seguir rápidamente hacia adelante” (Como se cita en Solano, 2012).

1.2. Planteamiento del problema

El desarrollo urbano sostenible y el ordenamiento territorial es un proceso político que involucra la toma de decisiones concertadas de los actores sociales, económicos, políticos y técnicos, para la ocupación ordenada y uso sostenible del territorio⁵ (CONAM/GTZ, 2006).

Dentro de los parámetros técnicos de uso del territorio para la construcción de infraestructura civil, se entiende que el comportamiento del suelo es complejo y depende de características mineralógicas, físicas y mecánicas. Los ensayos de penetración estándar SPT, clasificación de suelos SUCS, las características hidrogeológicas, geomorfológicas y sísmicas determinan el comportamiento de los suelos sometidos a infraestructura civil en la ciudad de Quito. La aceleración sísmica transmitida de los suelos a la infraestructura civil en zonas de significativo riesgo⁶ sísmico como la ciudad de Quito obliga a investigar y comparar diferentes métodos de análisis.

La información geotécnica ayuda a entender el comportamiento de los materiales ante desastres⁷ naturales, fortaleciéndose la hipótesis de que estos sucesos pueden convertirse en un obstáculo para el desarrollo por el impacto económico negativo (Bravo, 2011, p. 1). La transferencia del presente estudio sirve para la investigación y docencia, para la planificación y gestión pública (acciones para el ordenamiento territorial) realizada por organismos gubernamentales y hacia la gestión privada (estrategias de competencia espacial) realizada por empresas comerciales y de servicios.

1.3. Pregunta de investigación

¿Cómo apoya la caracterización físico-mecánica de los suelos del centro norte de Quito al uso y ocupación del suelo, por parte de obras civiles?

⁵ En el Perú el tema se regula a partir del Artículo 11, Ley 26821 de junio de 1997.

⁶ Riesgo.- Es la estimación probable de pérdidas y daños esperados (personas, bienes, materiales, recursos económicos) ante la ocurrencia de un fenómeno de origen natural (Ministerio del Ambiente Perú, s. f., p. 5).

⁷ Desastre.- Es la interrupción severa del funcionamiento de una comunidad causada por la activación de un peligro de origen natural o antrópico, ocasionando pérdidas económicas, de vidas humanas, de infraestructura, entre otros (Ministerio del Ambiente Perú, s. f., p. 5).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general:

Crear un mapa de clasificación físico-mecánica de los suelos del centro norte de Quito y analizar su influencia en el uso y ocupación del suelo por obras civiles.

1.4.2. Objetivos específicos:

- O1. Recolectar y sistematizar cartografía analógica, datos físico-mecánicos y datos de uso y ocupación de los suelos del centro norte de Quito.
- O2. Procesar los datos gráficos y numéricos utilizando algebra de mapas.
- O3. Analizar e interpretar los resultados numéricos y cartográficos, relacionados con el uso y ocupación del suelo por obras civiles.

1.5. Hipótesis

La caracterización físico-mecánica de los suelos del centro norte de Quito, apoyará técnicamente el uso y ocupación del suelo de obras civiles en la zona de estudio⁸.

1.6. Operacionalización de la investigación

Variables e indicadores a ser evaluados en la zona de estudio, Tabla 1:

⁸ Hipótesis de relación causa-efecto (Buzai, 2013, p. 61). La causalidad es el método filosófico-científico que procura el conocimiento de las cosas (o de las verdades) a través del estudio y análisis de sus causas (Bunge, 1961).

Tabla 1.
Variables e indicadores propuestos en la investigación

VARIABLES	INDICADORES
GEOLÓGICAS - TECTÓNICAS	Fallas tectónicas.
	Litología.
	Formaciones geológicas.
HIDROLÓGICAS	Quebradas, Acuíferos, Nivel piezométrico.
FÍSICO – MECÁNICA DE SUELOS	Clasificación de suelos SUCS.
	Ensayos de penetración estándar in-situ SPT.
ACELERACIÓN ONDAS SÍSMICAS EN SUELO	Periodo natural de vibración del suelo.
	Velocidad de onda de corte.
USO Y OCUPACIÓN SUELO	Área de lotes, vías, zonas verdes.
	Altura de edificación.
	Población.

1.7. Metodología y técnicas de investigación.

Mediante la presente investigación geográfica se obtiene conocimientos de carácter clasificatorio, en donde se diferencian clases de suelos en base a sus propiedades comunes con la finalidad de planificación (Buzai, 2013).

La metodología utilizada en la presente investigación sirve para medir la hipótesis usando las siguientes técnicas:

- Recolección y sistematización de datos mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica. La recolección incluyó un componente gráfico (Cartografía analógica a ser digitalizada) y un componente numérico (base de datos de atributos para las entidades geográficas consideradas).
- Con los datos obtenidos y organizados se realizó un procesamiento de datos usando algebra de mapas.
- A partir del procesamiento de datos se obtuvieron los resultados en forma numérica, gráfica o cartográfica.
- Se analizó e interpretó los resultados a partir del marco teórico base de la investigación.
- Con la finalización del análisis se realizó la validación de la hipótesis.

La metodología y técnicas de investigación se exponen en la Tabla 2.

Tabla 2.

Metodología y técnicas a utilizarse en la presente investigación

METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION
<i>Descripción técnica del estudio de caso</i>
<i>Pregunta de investigación</i>
La investigación responde a la siguiente pregunta: <i>¿Cómo apoya la caracterización físico-mecánica de los suelos del centro norte de Quito al uso y ocupación del suelo, por parte de obras civiles?</i>
<i>Metodología de investigación</i>
Análisis basado en publicaciones científicas y criterio lógico del autor - Método híbrido cualitativo-cuantitativo (Universidad San Francisco de Quito, s. f.)
<i>Unidad de análisis</i>
Centro Norte de la ciudad de Quito.
<i>Ámbito geográfico</i>
Al norte la Avenida Naciones Unidas; al sur la Avenida Patria; al este la Avenida 6 de Diciembre; al oeste Avenida 10 de Agosto.
<i>Tipo de muestra</i>
Datos geológicos-geotécnicos geo-referenciados. Forma de ocupación del suelo, altura de edificación y uso predominante del territorio.
<i>Muestra</i>
Datos geológicos, ensayos in-situ y de laboratorio de suelos. Predios de la zona de estudio.
<i>Métodos de recogida de la evidencia</i>
Levantar datos de laboratorio de suelos e investigaciones geológico-geotécnicas previas. Censo de uso y ocupación del suelo de la zona de estudio.
<i>Fuentes de información secundaria</i>
Documentación (memorias, informes y estudios técnicos), archivos (páginas Web, archivos de presentaciones) y publicaciones (actualidad).
<i>Métodos de análisis de la evidencia</i>
Fundamentalmente de tipo cuantitativo: • Identificación y clasificación de las relaciones existentes entre todos los conceptos del tema de estudio. • Búsqueda de factores explicativos clave. • Búsqueda de patrón de comportamiento común.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1. Marco teórico

En la ciudad de Quito y territorios cercanos se han presentado algunos sismos históricos investigados por técnicos, que han definido su intensidad en escala Medvédev-Sponheuer-Kárník (MSK), de acuerdo a los daños causados en construcciones civiles, terreno y población (Tabla 3). Se debe destacar el sismo más destructivo ocurrido en Quito en 1859 con una intensidad IX.

Tabla 3.

Datos de sismos históricos que han afectado a la ciudad de Quito entre los años 1587 – 1990

Año	Zona	Mw	MSK	Daños	Referencias
1587	Guayllabamba	6.4		Iglesias sufren daños significativos	
1627	Quito	7	VII	Daños casas	Del Pino y Yepes, 1990
1645	Quito	7		casas, conventos dañados	
1661	Quito		VI-VII	Flujos de escombros y lodo que afectaron los valles de Los Chillos y Tumbaco	Del Pino y Yepes, 1990
1736	Quito			Daños moderados en la Iglesia de Santo Domingo	
1755	Quito		IX	Colapso iglesia de Santa Catalina y daños generalizados en la Catedral, San Agustín, Santo Domingo, San Francisco, La Merced y El Sagrario	Del Pino y Yepes, 1990
1797	Guayllabamba	6.4		Destrucción en Guayllabamba. Pomasqui y el norte de Quito	
1797	Riobamba Quito		IX-X, VI-VII	Riobamba destruida, Afectados todos los templos de Quito	
1859	Quito	7.2	IX	Grandes daños en edificios, iglesias, colegios y casas.	Beauval, et al., 2010)
1868	Otavalo	7.7		Ruina casi total de Cotacachi, Ibarra y Otavalo	
1914	Pintag	6.44			
1923	Quito		VII		Almeida et al, 1998
1929	Murco, Tambillo	5.88		Destrucción de 46 casas de Murco	
1938	Sangolquí	5.8		Destruídas El Tingo y Alangasí	
1987	Baeza	7		Daños de consideración en templos coloniales de Quito	
1990	Pomasqui	5		900 viviendas afectadas	

Fuente: (Astudillo, 2013)

Los epicentros de los sismos registrados entre 1990 y 2011 se presentan en la Fig. 1, la cantidad que se indica corresponde a la profundidad focal. Todos estos sismos están asociados a las Fallas de Quito, las magnitudes varían entre 3 y 5. Todo demuestra que son fallas activas (Quishpe y Quishpe, 2011).

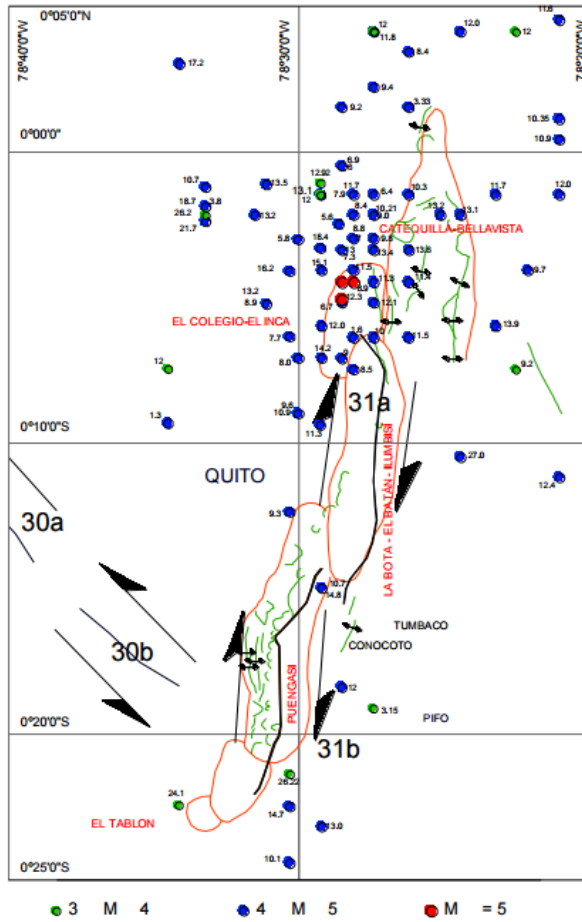


Figura 1. Sismicidad registrada en Quito entre 1990 y 2011 (Quishpe y Quishpe, 2011).

Las características sísmicas de la zona de estudio sugieren realizar estudios que sirvan para evaluar la vulnerabilidad física de la infraestructura. La reducción de la vulnerabilidad es una inversión clave, no solo para disminuir los costos humanos y materiales de los desastres sino también para alcanzar un *desarrollo sostenible* (Bravo, 2011).

Al igual que las erupciones volcánicas y los terremotos, las amenazas geomorfológicas pueden afectar gran parte de la ciudad de Quito. La amenaza geomorfológica se puede definir como la manifestación del desplazamiento

gravitacional de masas de terreno desestabilizadas bajo el efecto de fenómenos naturales (precipitaciones anormalmente fuertes, sismos) o de acciones antrópicas (remoción de tierra, vibraciones, deforestación, explotación de materiales en canteras). En aproximadamente el 50% del área metropolitana, las condiciones son particularmente propicias al desencadenamiento de amenazas geomorfológicas. Se pueden distinguir tres tipos de amenazas geomorfológicas en el DMQ: los deslizamientos, los derrumbes y los hundimientos (D'Ercole & Metzger, 2004, p. 60).

Para encontrar los parámetros físico-mecánicos de la zona de estudio se utilizó estudios previos que definen la profundidad y litología de los perfiles de suelo, que incluyen formaciones: geológicas, volcánicas y depósitos secundarios (lacustres y coluviales) y otras técnicas que identifican la profundidad de las estructuras geológicas en forma indirecta. Además, la clasificación SUCS y el SPT permiten delimitar los bordes de los estratos considerando un cambio de SUCS de un estrato a otro. Algunos datos de velocidades de onda de corte en Quito se han realizado mediante ensayos in situ Cross-Hole obteniendo: $V_{S0-25} = 200$ y 400 m/s para estratos superficiales de 0 a 25 metros de profundidad, cuya clasificación SUCS determinó suelos: SC (arenas arcillosas), ML (limos inorgánicos) y SM (arenas limosas) (Valverde, Fernández, Jiménez, Vaca y Alarcón, 2001).

Es muy importante estudiar el efecto de amplificación sísmica que puede ocurrir en el área de estudio debido al tipo de suelo. Según Zeevaert (1972), en arcillas blandas la amplificación puede ser el doble que en gravas o arenas compactas (Como se cita en Suárez, s. f.)

Suárez (s. f.) afirma que:

El período de vibración del suelo depende del tipo de material y la altura H entre el suelo y la roca.

$$T = 4H/V_s$$

T : período(s), H : altura entre suelo y roca (m), V_s : velocidad de onda sísmica del suelo (m/s).

En la Fig. 2, se observa que la velocidad de onda sísmica, es menor en los suelos y dependiendo de la profundidad de: $V_{S0-10} = 80 - 100$ m/s a $V_{S10-35} = 200 - 400$ m/s, que en la roca con $V_s = 1000$ a 2000 m/s. El período de vibración es mayor en suelo (0.5 a 0.7 s) que en roca (0.1 - 0.2 s). Lo que indica que a menor velocidad de onda de corte (V_s), mayor período de vibración del suelo y más afectación de obras civiles.

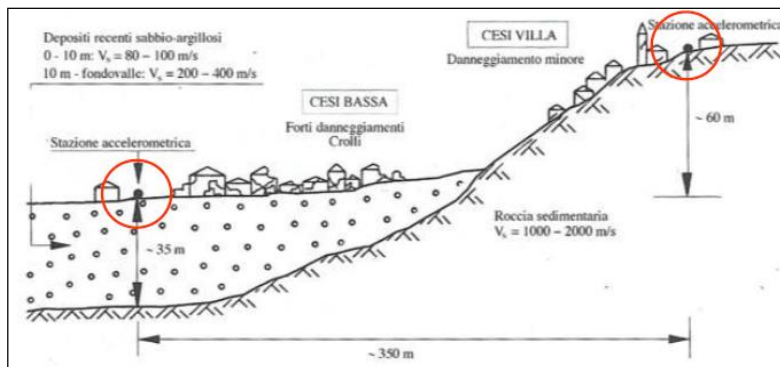


Figura 2. Amplificación en Umbria 1997 (Suárez, s. f.).

En la Tabla 4 se presentan varias características en suelos blandos, cohesivos y granulares.

Tabla 4.

Valores de: V_s , Resistencia al corte no drenado, N del SPT, Espesor del estrato

Suelos Cohesivos	V_s (m/s)	Resistencia al corte no drenado	Espesor del estrato
Blandos	< 200	< 25 Kpa	> 20 m.
Semiblandos	200 - 400	25 - 50 Kpa	> 25 m.
Duros	400 - 750	50 - 100 Kpa	> 40 m.
Muy Duros	> 750	100 - 200 Kpa	> 60 m.
Suelos Granulares	V_s (m/s)	Valores N del SPT	Espesor del estrato
Sueltos	< 200	4 - 10	> 40 m.
Semidensos	200 - 750	10 - 30	> 45 m
Densos	> 750	> 30	> 100 m

Fuente: (Quishpe y Quishpe, 2011, p. 110)

En Quito en suelos blandos se ha encontrado los siguientes valores de velocidad de onda sísmica V_s (Tabla 5).

Tabla 5.
Valores de V_s para Quito

Ubicación	V_s (m/s)
El Bosque	263.5
Carolina	190.23
Las Casas	234.52
C. Histórico	236.51
C. Histórico	249.1
Pinar	256.67
Pinar	245.08
Mariscal	253.71
Mariscal	245.08
Floresta	221.37
Floresta	208.37
Quitumbe	134.33
Quitumbe	228.59
San Bartolo	188.41
Garrochal	132.93

Fuente: (Quishpe y Quishpe, 2011, p. 113)

Los estudios del metro de Quito, para suelos de clase C (Tabla 6), valores de V_{s30} entre 380 a 400 m/s; para suelos de clase D, valores de V_{s30} entre 175 a 380 m/s, con periodos de vibración fundamental entre 0.2 y 0.5 s. En roca profunda: $V_s = 1000 - 1100$ m/s. (Quizanga, 2015, p. 114).

Tabla 6.
Tipo de perfil de suelo, V_s , SPT, S_u (resistencia al corte no drenado)

Tipo de perfil	Descripción	Definición V_s (m/s)	N SPT	S_u (Kpa)
A	Perfil de roca competente	$V_s > 1500$ m/s		
B	Perfil de roca de rigidez media	$760 < V_s < 1500$		

C	Perfil de suelos muy densos o roca blanda	$360 < V_s < 760$	$N > 50$	$> 100 \text{ Kpa}$
D	Perfil de suelo rígido	$180 < V_s < 360$	$15 < N < 50$	$50 < S_u < 100$
E	Perfil de arcillas blandas $> 3m$.	$V_s < 180$	$N < 15$	$S_u < 50$

Fuente: (NEC, 2015, p. 30)

Siendo N, el número de golpes de penetración estándar en cualquier perfil de suelo y dada la importancia de la medición de las velocidades de ondas de corte V_s (ensayo poco común, excepto en proyectos especiales). Se recurre a correlaciones entre el N del SPT y V_s (Tabla 7), fórmulas de laboratorio desarrolladas en diferentes partes del mundo: Imai y Yoshimura, 1970; Ohba y Toriumi, 1970; Hara et al., 1974; Imai, 1977; Ohta y Goto, 1978; Wroth et al., 1979; Imai y Tonouchi, 1982; Okamoto et al., 1989; Japan Road Association, 2002, entre otras (Alfaro, 2007).

Tabla 7.

Ecuaciones empíricas de correlación N del SPT con la velocidad de onda de corte V_s

Investigadores	Ecuación	Observaciones
Imai y Yoshimura (1970)	$V_s = 76N^{0.33}$	
Ohba y Toriumi (1970)	$V_s = 84N^{0.31}$	
Imai (1977)	$V_s = aN^b$	a=102, b=0.29 Arcilla Holoceno a= 81, b=0.33 Arena Holoceno a=114, b=0.29 Arcilla Pleistoceno a= 97, b=0.32 Arena Pleistoceno
Ohta y Goto (1978)	$V_s = 85.34N^{0.348}$	Para todo tipo de suelo
Okamoto <i>et al.</i> (1989)	$V_s = 125N^{0.3}$	Arena del Pleistoceno
Japan Road Association (2002)	$V_s = 80N^{1/3}$ $V_s = 100N^{1/3}$	Arenas Arcilla
Vs=velocidad de ondas de corte en m/s; N= numero de golpes del SPT		

Fuente: (Alfaro, 2007, p. 16)

Observando la Tabla 8. Los valores de N, normalmente no se corrigen por estrés de sobrecarga, pero a veces se corrigen por la energía del martillo, la longitud

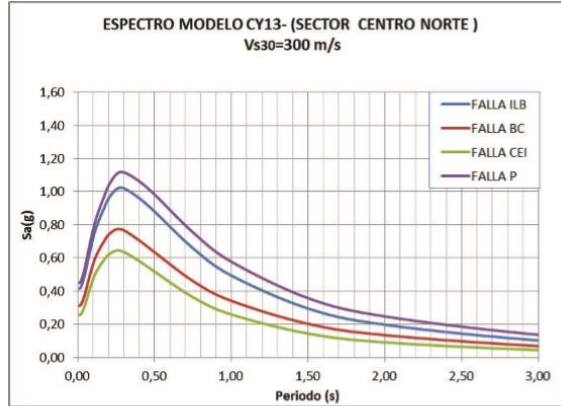
de la varilla y el diámetro interior de la muestra, en este caso N es reemplazado por N60 (Brandemberg, S., Ballana, N., & Shantz, T., 2010, p. 2).

Tabla 8. Algunas correlaciones existentes que presentan Vs en función del conteo de golpes NSPT

Author(s)	I.D.	All soils	Sand	Silt	Clay
Shibata (1970)	A	-	$V_s = 31.7 N^{0.54}$	-	-
Ohba and Toriuma (1970)	B	$V_s = 84 N^{0.31}$	-	-	-
Imai and Yoshimura (1975)	C	$V_s = 76 N^{0.33}$	-	-	-
Ohta et al (1972)	D	-	$V_s = 87.2 N^{0.36}$	-	-
Fujivara (1972)	E	$V_s = 92.1 N^{0.337}$	-	-	-
Ohsaki and Iwasaki (1973)	F	$V_s = 81.4 N^{0.39}$	-	-	-
Imai et al (1975)	G	$V_s = 89.9 N^{0.341}$	-	-	-
Imai (1977)	H	$V_s = 91 N^{0.337}$	$V_s = 80.6 N^{0.331}$	-	$V_s = 80.2 N^{0.292}$
Ohta and Goto (1978)	I	$V_s = 85.35 N^{0.348}$	-	-	-
Seed and Idriss (1981)	J	$V_s = 61.4 N^{0.5}$	-	-	-
Imai and Tonouchi (1982)	K	$V_s = 96.9 N^{0.314}$	-	-	-
Sykora and Stokoe (1983)	L	-	$V_s = 100.5 N^{0.29}$	-	-
Jinan (1987)	M	$V_s = 116.1 (N+0.3185)^{0.202}$	-	-	-
Okamoto et al (1989)	N	-	$V_s = 125 N^{0.3}$	-	-
Lee (1990)	O	-	$V_s = 57.4 N^{0.49}$	$V_s = 105.64 N^{0.32}$	$V_s = 114.43 N^{0.31}$
Athanasopoulos (1995)	P	$V_s = 107.6 N^{0.36}$	-	-	$V_s = 76.55 N^{0.445}$
Sisman (1995)	Q	$V_s = 32.8 N^{0.51}$	-	-	-
Iyisan (1996)	R	$V_s = 51.5 N^{0.516}$	-	-	-
Kanai (1966)	S	$V_s = 19 N^{0.6}$	-	-	-
Jafari et al (1997)	T	$V_s = 22 N^{0.85}$	-	-	-
Kiku et al (2001)	U	$V_s = 68.3 N^{0.292}$	-	-	-
Jafari et al (2002)	V	-	-	$V_s = 22 N^{0.77}$	$V_s = 27 N^{0.73}$
Hasancebi and Uhsay (2006)	W	$V_s = 90 N^{0.309}$	$V_s = 90.82 N^{0.319}$	-	$V_s = 97.89 N^{0.269}$
Uhgergerli and Uyank (2007)	X	${}^a V_{SU} = 23.291 \ln(N) + 405.61$	-	-	-
Uhgergerli and Uyank (2007)	Y	${}^b V_{SL} = 52.9 e^{-0.011N}$	-	-	-
Dikmen (2009)	Z	$V_s = 58 N^{0.39}$	$V_s = 73 N^{0.33}$	$V_s = 60 N^{0.36}$	$V_s = 44 N^{0.48}$
Pitilakis et al. (1999)	AA	-	$V_s = 145(N_{60})^{0.178}$	-	$V_s = 132(N_{60})^{0.271}$
Hasancebi and Uhsay (2006)	AB	$V_s = 104.79(N_{60})^{0.26}$	$V_s = 131(N_{60})^{0.205}$	-	$V_s = 107.63(N_{60})^{0.237}$

Fuente: (Brandemberg, S. et al., 2010)

Una vez obtenida la velocidad de onda de corte Vs se puede calcular los espectros sísmicos de aceleración de la gravedad Sa = f (g [m/seg²]) versus Período (s [seg]). (Fig. 3). Con el espectro sísmico de aceleración se puede diseñar elementos estructurales sismo-resistentes de gran interés en Ingeniería Civil.



ELABORACIÓN: Diego Quizanga

Figura 3. Espectro de aceleración sísmica para la ciudad de Quito en suelos con una $V_s=300$ m/s (ILB: Falla Llumbisí La Bota; Falla BC: Bellavista-Catequilla ; Falla CEI: Carcelen-El Inca; Falla P: Puengasí). Valores máximos de 1.1 g para la Falla de Puengasí (Quizanga, 2015, p. 123).

En el norte de Quito el espectro crítico está asociado al segmento de falla Llumbisí-La Bota. Usando un nivel de confianza del 84%, se podría esperar aceleraciones sísmicas de hasta 1.8g. Pese a ser menores que las encontradas en el sur de Quito (1.2 y 2.2 g). Son valores altos si se los compara con el espectro normativo de la NEC (2015), (Fig. 4, 5) (Quizanga 2015, p. 146).

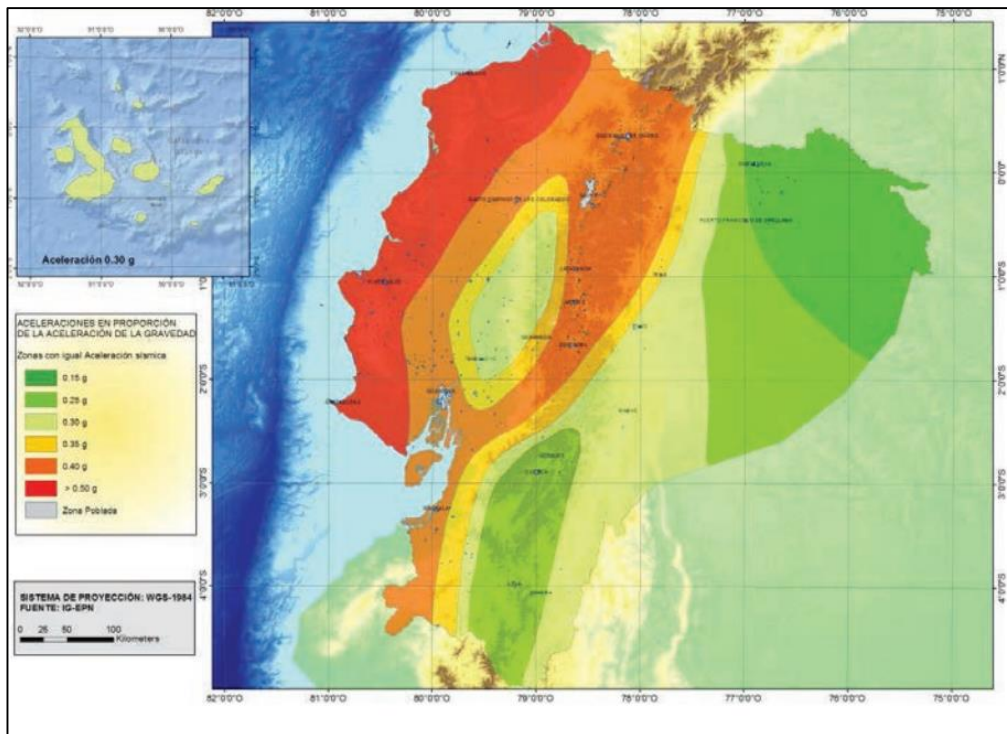
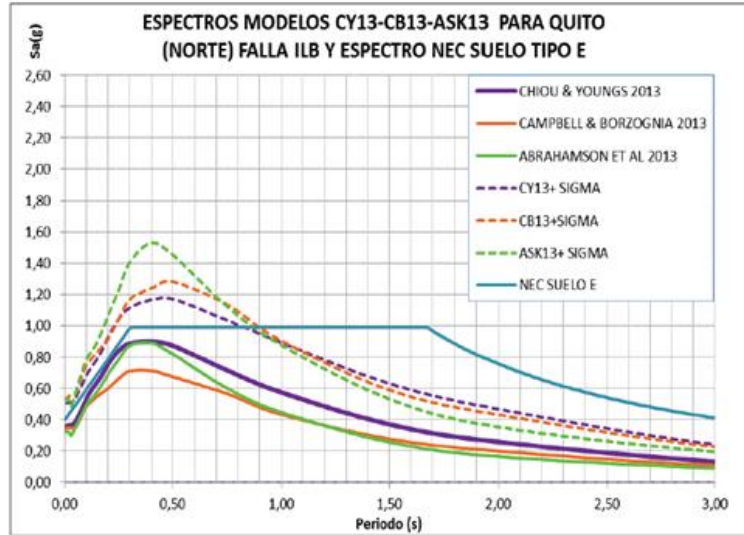


Figura 4. Zonas sísmicas para propósitos de diseño (NEC, 2015, p. 27).



ELABORACIÓN: Diego Quizanga

Figura 5. Espectro de aceleración sísmica para la ciudad de Quito en suelos tipo E con una $V_{s30}=200$ m/s, comparados con el espectro de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC, 2015 en suelos tipo E, calculados para una activación de la falla de Puengasí. Valores máximos de 1.5 g superiores a 1 g de la NEC, 2015 (Quizanga, 2015, p. 136).

El la Fig. 6, se observan las curvas logarítmicas que relacionan aceleración máxima con Intensidad de Mercalli Modificada propuesta por diferentes autores y que indican que, a mayor intensidad del sismo, mayor aceleración sísmica transferida a la infraestructura civil.

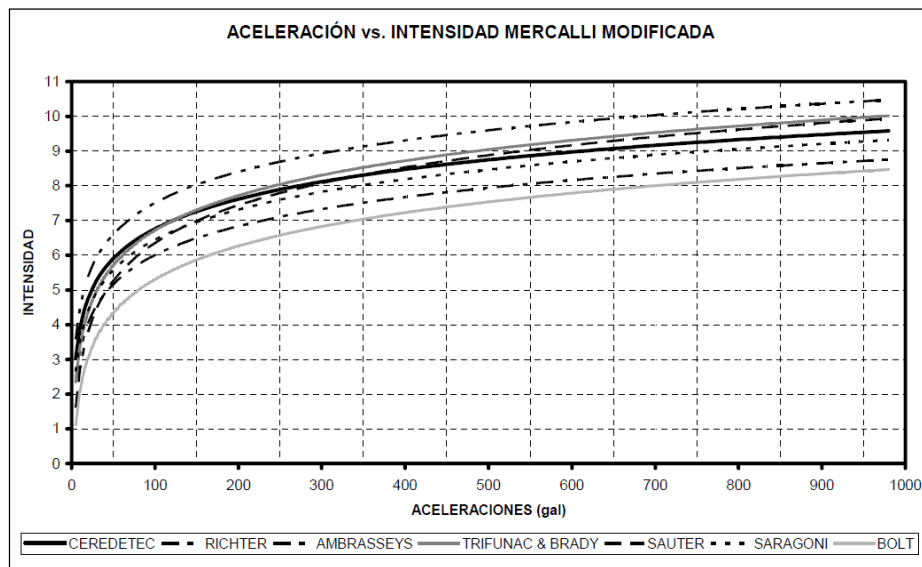


Figura 6. Relaciones de Aceleración Máxima con Intensidad Mercalli Modificada según diferentes autores. (Silva, E., Gioacchini, G., Panella, S., Tornello, M., & Frau, C., 2005)

2.2. Marco conceptual

Geología

Ciencia que estudia la tierra, se divide en dos grandes áreas: geología física y geología histórica. La geología física es el estudio de los materiales de la Tierra; estudia los minerales de las rocas, así como los procesos que operan dentro y sobre la superficie de la Tierra. La geología histórica trata del origen y evolución de la Tierra, sus continentes, océanos, atmosfera y la vida (Wicander & Monroe, 2000, p. 7).

Tectónica - Geología Estructural

Según el Departamento de Geodinámica de la (Universidad Complutense de Madrid, s. f.):

La Tectónica y la Geología Estructural estudian la deformación de las rocas de la litosfera y tratan de reconstruir los movimientos y procesos que han originado su estructura.

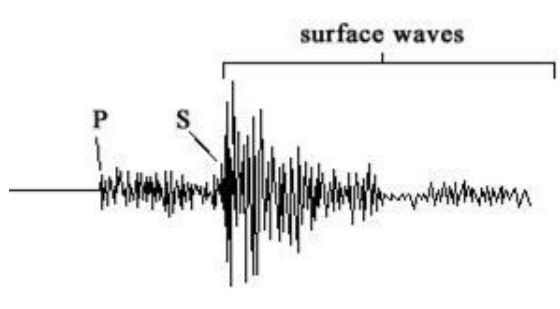
La Geología Estructural estudia la deformación de las rocas desde una escala submicroscópica a una escala regional. Comprende el estudio de la geometría de las estructuras, los procesos y mecanismos de la deformación, las propiedades mecánicas de las rocas y los sistemas de fuerzas que originan la deformación.

Ondas Sísmicas

(Wicander & Monroe, 2000, p. 183) afirman que:

La conmoción y destrucción resultantes de los terremotos son causadas por dos tipos diferentes de ondas sísmicas: las ondas de cuerpo, que viajan a través de la Tierra y las ondas superficiales, las cuales viajan sólo por la superficie de la tierra y son análogas a las olas oceánicas.

En la figura siguiente se ve un sismograma donde se observa que un terremoto genera dos tipos de ondas de cuerpo: las ondas P y las ondas S.



Las ondas P, u ondas primarias, son las ondas sísmicas más rápidas y pueden viajar a través de sólidos, líquidos y gases.

Las ondas S, u ondas secundarias, son más lentas que las ondas P y sólo pueden viajar a través de sólidos.

Las ondas superficiales son más lentas que las ondas de cuerpo, las ondas superficiales producen en general un movimiento de mecimiento, muy semejante al experimentado en un bote de remos.

Datos físicos del suelo SUCS

Según Braja (2001), p. 35-37:

Los suelos con propiedades similares se clasifican en grupos y subgrupos basados en el comportamiento ingenieril.

SUCS clasifica los suelos en dos grandes categorías (Tabla 9):

1. Suelos de grano grueso que son de naturaleza tipo grava y arenosa con menos del 50% pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con el prefijo G o S. G significa grava o suelo gravoso y S significa arena o suelo arenoso.
2. Los suelos de grano fino con 50% o más pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo M, que significa limo

inorgánico, C para arcilla inorgánica u O para limos y arcillas orgánicos. El símbolo Pt se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos.

Otros símbolos son también usados para la clasificación:

- W: bien graduado
- P: mal graduado
- L: baja plasticidad (límite líquido menor que 50)
- H: alta plasticidad (límite líquido mayor que 50)

Tabla 9. Caracterización física de los suelos SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)

DIVISIONES PRINCIPALES		Símbolos del grupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO	
SUELOS DE GRANO GRUESO Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Gravas limpias (sin o con pocos finos)	GW	Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue: <5% -> GW, GP, SW, SP. >12% -> GM, GC, SM, SC. 5 al 12% -> casos límite que requieren usar doble símbolo.
		Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	GP	Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	
		Gravas con finos (apreciable cantidad de finos)	GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.	
			GC	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.	
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Arenas limpias (pocos o sin finos)	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	
			SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	
		Arenas con finos (apreciable cantidad de finos)	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	
			SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.	
SUELOS DE GRANO FINO Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200	Limos y arcillas: Límite líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad.		
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.		
		OL	Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.		
	Limos y arcillas: Límite líquido mayor de 50	MH	Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.		
		CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.		
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.		
		PT	Turbas y otros suelos de alto contenido orgánico.		

Fuente: (González, J., 2017)

Datos mecánicos del suelo SPT

El ensayo de penetración estándar SPT, es una herramienta útil y práctica por lo que permite cuantificar la resistencia de un suelo, la clasificación del mismo y determinar la capacidad portante. Es utilizado en el dimensionamiento de cimientos de una estructura. Además, el método lleva implícito un muestreo, que proporciona muestras alteradas representativas del suelo en estudio (Naranjo & Dranichnikov, 2012, p. 53).

Velocidad de onda de corte de suelos (V_{s30}).

Morales, Hernández, Schmithz, Cano y Tagliaferro (2011), p. 77 consideran que:

“Los parámetros geofísicos ampliamente empleados para estimar la respuesta sísmica en un sitio determinado, lo constituye el promedio de las velocidades de ondas de corte en los primeros 30 m de espesor (V_{s30})”.

Aceleración sísmica

Carazo (2012) afirma que:

La aceleración sísmica es una medida utilizada en terremotos que consiste en una medición directa de las aceleraciones que sufre la superficie del suelo. Es una medida muy importante en ingeniería sísmica. Normalmente la unidad de aceleración utilizada es la intensidad del campo gravitatorio ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

A diferencia de otras medidas que cuantifican terremotos, como la escala Richter o la escala de magnitud de momento, no es una medida de la energía total liberada del terremoto, por lo que no es una medida de magnitud sino de intensidad. Se puede medir con simples acelerómetros y es sencillo correlacionar la aceleración sísmica con la escala de Mercalli.

La aceleración sísmica es la medida de un terremoto más utilizada en ingeniería, y es el valor utilizado para establecer normativas sísmicas y zonas de riesgo sísmico. Durante un terremoto, el daño en los edificios y las infraestructuras está íntimamente relacionado con la velocidad de onda y la aceleración sísmica. En terremotos moderados, la aceleración es un indicador preciso del daño, mientras que en terremotos muy severos la velocidad sísmica adquiere una mayor importancia.

“El ingeniero demanda que el riesgo venga expresado en términos de aceleración ya que él diseña las estructuras en función de las aceleraciones que pueden afectarlas durante su tiempo de vida. Esta exigencia de la ingeniería ha llevado a relacionar la intensidad sísmica con los parámetros cinéticos: aceleración, velocidad y desplazamiento” (Muñoz, 1989, p. 203).

Geotecnia

Los principios fundamentales de la ingeniería geotécnica son la mecánica de suelos y la mecánica de rocas, que estudian las propiedades de suelos y rocas y su comportamiento bajo esfuerzos y deformaciones unitarias en condiciones ideales. La aplicación de los principios de la mecánica de suelos y rocas sirve para planificar, diseñar y construir cimentaciones para edificios, carreteras, represas, etc. (Braja, 2001).

CAPITULO 3. PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Plan de obtención de información cartográfica y numérica.

Para procesar la información y realizar la caracterización geotécnica y su relación con el uso y ocupación el suelo, esta investigación consideró:

- Características geológicas de suelos y rocas, hidrología y fallas geológicas.
- Propiedades geotécnicas: clasificación de suelos SUCS, N-SPT, resistencia a la compresión simple, cohesión, ángulo de fricción interno.
- Propiedades dinámicas de los suelos, velocidad de onda de corte V_s , obtenida por correlación mediante el ensayo N-SPT.
- Con los datos obtenidos se definió amenazas para obras civiles mediante bibliografía técnica de respaldo. Siendo 5 un suelo más competente y 1 menos competente para obras civiles. (Ver Tablas: 10, 11 y 14):

Tabla 10.

Ponderación por geoforma – pendiente

Pendiente %	Geoforma	#	PONDERACIÓN NORMALIZADA
0 a 12	Mesetas	3	1.00
12 a 25	Loma	2	0.67
>25	Colinas	1	0.33

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11.

Ponderación por amenaza de asentamiento, deslizamientos y cimentaciones en suelo utilizando la caracterización de suelos SUCS

SIMBOLO SUCS	PO DE SUELO	AMENAZA DE SUBSIDENCIAS DE SUELO	AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS DE TALUDES	CAPACIDAD SOPORTE FUNDACIONES	CIMENTACIONES	SUMA	PONDERACION NORMALIZADA
GW	Gravas limpias bien graduadas	Bajísimo	5 Muy bajo	5 Excelente	1 5	15	1.00
GP	Gravas limpias mal graduadas	Muy Bajo	4 Bajo	4 Buena	3 5	13	0.87
SW	Arenas limpias bien graduadas	Bajísimo	5 Muy bajo	5 Buena	2 5	15	1.00
SP	Arenas limpias mal graduadas	Muy Bajo	4 Bajo	4 Buena a deficiente	5 4	12	0.80
GC	Gravas arcillosas	Bajo	3 Muy Bajo	5 Buena	6 4	12	0.80
SC	Arenas arcillosas	Bajo	3 Bajo	4 Buena a deficiente	8 3	10	0.67
GM	Gravas limosas	Bajo	3 Bajo	4 Buena	4 4	11	0.73
SM	Arenas limosas	Bajo	3 Bajo a medio	3 Buena a deficiente	7 3	9	0.60
ML	Limos de baja plasticidad	Medio	2 Medio	3 Muy deficiente - Licuefacción	9 3	8	0.53
CL	Arcillas de baja plasticidad	Medio	2 Medio a alto	2 Buena a deficiente	10 2	6	0.40
MH	Limos de alta plasticidad	Alto	1 Medio a alto	2 Deficiente	12 2	5	0.33
CH	Arcillas de alta plasticidad	Muy alto	1 Alto	1 Regular a deficiente	13 1	3	0.20
O	Suelos orgánicos	Altísimo	1 -	Mala - Deficiente	14 1	2	0.13

Fuente: (Lambe, W. & Whitman, R., 1981), (Mena, D., 2013). Elaboración propia.

Para suelos: CL, MH, CH y O se debe analizar el coeficiente de consolidación C_v e índice de compresión C_c , para definir tiempo y profundidad de asentamientos para obras civiles. En este estudio no se ha tomado en cuenta las variables C_v y C_c . (Tablas 12 y 13).

Tabla 12.

Valores típicos de coeficiente de consolidación C_v

VALORES TÍPICOS DEL COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN			
Tipo de suelo	SUCS	C_v (10^{-4} cm ² /s)	Referencia
Arcilla azul de Boston	CL	40 ± 20	Ladd y Luscher, 1965
Limo orgánico	OH	2 -10	Lowe, Zaccheo y Feldamna, 1964
Arcilla glacial de lagos	CL	6.5-8.7	Wallace y Otto, 1964
Arcilla limosa de Chicago	CL	8.5	Terzaghi y Peck, 1967
Arcilla Sueca de sensibilidad media	CL-CH	0.4-0.7	Holtz y Broms, 1972
Arcilla de la Bahía de San Francisco	CL	2-4	-----
Arcilla de la ciudad de México	MH	0.9-1.5	Leonards y Girault, 1961

Tomado y traducido de An Introduction to Geotechnical Engineering, Second Edition: Robert D. Holtz, William D. Kovacs, Thomas C. Sheahan.

Fuente: (Montana, D., 2013, p. 22)

Tabla 13.

Prof. Juan M. Pestana Nascimento (University of California, Berkeley) ofrece los valores típicos de coeficiente de compresión C_c

Suelos	SUCS	Índice de compresión C_c
Arcilla normalmente consolidada		0,2-0,5
Arcilla chicago con limo	CL	0,15-0,3
Arcilla azul	CL	0,3-0,5
Arcilla Vickburgs - dray falls into lumps	CH	0,3-0,6
Arcilla sueca	CL-CH	1,0-3,0
Arcilla de Canadá, de Leda	CL-CH	1,0-4,0
Arcilla de ciudad de México	MH	7,0-10,0
Arcilla Orgánica	OH	4 a más
Turbas	Pt	10,0-15,0
Limo orgánico y sedimentos arcillosos	ML-MH	1,5-4,0
Sedimentos de San Francisco	CL	0,4-1,2
Arcilla de la antigua Bahía de San Francisco		0,7-0,9
Arcilla de Bangkok	CH	0,4

Fuente: (Pestana, J., 2017)

Tabla 14.
Ponderación por velocidad de onda sísmica V_s

V_s (m/s)	DESCRIPCIÓN	TIPO DE PERFIL	#	PONDERACIÓN NORMALIZADA
$V_s > 1500$	Perfil de roca competente	A	5	1
$760 < V_s < 1500$	Perfil de roca de rigidez media	B	4	0.8
$360 < V_s < 760$	Perfil de suelos muy densos o roca blanda	C	3	0.6
$180 < V_s < 360$	Perfil de suelo rígido	D	2	0.4
$V_s < 180$	Perfil de arcillas blandas, arenas o gravas sueltas o muy sueltas*	E	1	0.2
	Suelos susceptibles a colapso	F	0	0

Fuente: (NEC, 2015), *(Montero, J., 2017), Elaboración propia.

Luego de clasificar las variables de acuerdo al grado de afectación en obras civiles se trabajó con la técnica de álgebra de mapas de SIG⁹, generando zonas geotécnicas con características físicas y mecánicas propias.

- Se realizó el censo de uso y ocupación del suelo en la zona de estudio mediante técnicas de teledetección y verificación in situ.
- Finalmente se identificó las relaciones entre variables subterráneas del mapa de susceptibilidad geotécnica y las variables superficiales de uso y ocupación del suelo por obras civiles.

3.2. Diseño del procesamiento de datos usando álgebra de mapas.

Los datos definidos de: geología, pendientes del terreno, clasificación SUCS y velocidad de onda sísmica permitieron realizar una ponderación normalizada. La calificación se la efectuó, tomando en cuenta las características geotécnicas del suelo. Luego usamos la función Raster Calculator de ArcMap para definir un mapa de susceptibilidad geotécnica de los suelos de la zona de estudio.

⁹ Los Sistemas de Información Geográfica se han desarrollado a partir de la unión de diversos tipos de aplicaciones informáticas: la cartografía automática tradicional, los sistemas de gestión de bases de datos, las herramientas de análisis digital de imágenes, los sistemas de ayuda a la toma de decisiones y las técnicas de modelización física. Las particularidades del manejo de datos espaciales, en buena parte comunes a todas las ciencias de la Tierra, ha fomentado el uso del término Ciencia de la Información Geográfica (Sarria, s. f.).

CAPITULO 4. DISPONIBILIDAD, PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

4.1. Datos geo-tectónicos del centro norte de Quito.

En la Figura 7 se tiene fallas de empuje y fallas de deslizamiento en distintas direcciones. Los anticlinales que corresponden a colinas principales de la ciudad de Quito como: El Tablón, San Miguel, Puengasí, Ilumbisi-El Batán-La Bota, El Colegio-El Inca y Catequilla-Bellavista están asociados estructuralmente a fallas de empuje ciego E-O y O-E. En el límite NE de la zona de estudio se observa una falla de empuje ciego E-O. Según Lamarque (2011) con un buzamiento de 40° (Como se cita en Alvarado, 2012).

Los valores de velocidad de onda sísmica en la ruta del Metro de Quito. A 30 metros de profundidad. V_{s30} entre 211 y 578 m/s (Quizanga, 2015). El promedio es 306 m/s y una desviación estándar de 79 m/s.

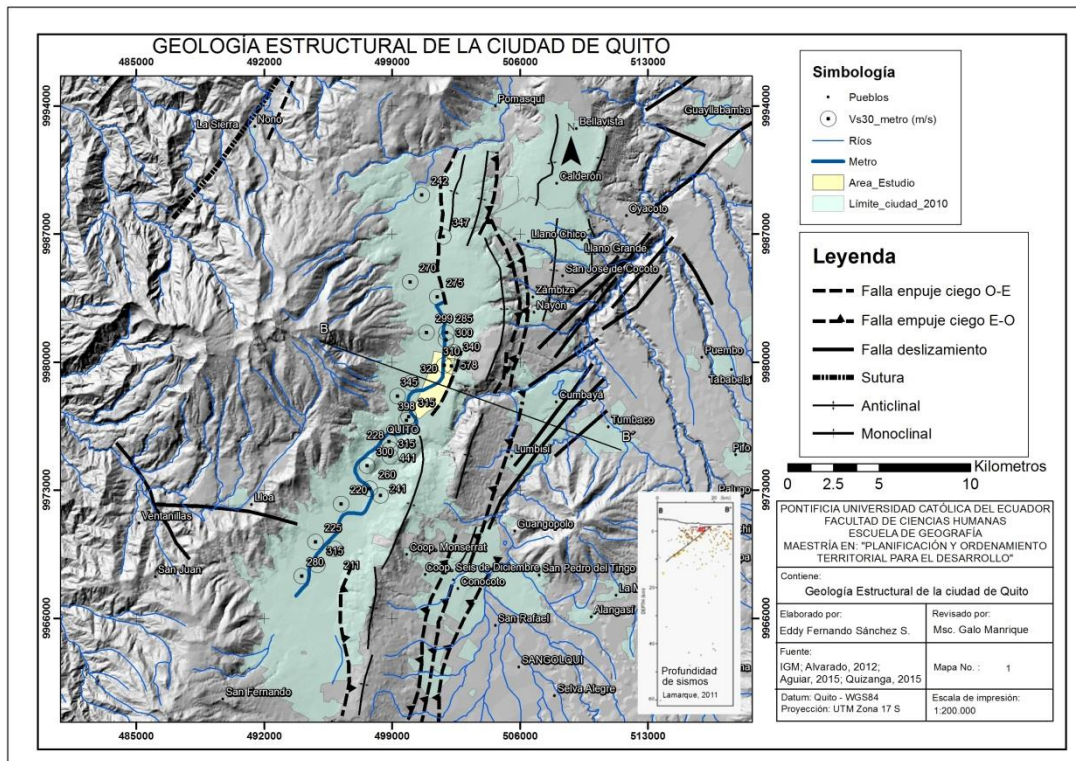


Figura 7. Geología Estructural de la ciudad de Quito. Elaboración: Propia.

4.2. Datos hidrogeológicos del centro norte de Quito.

En la Figura 8 se observa la hidrología antigua de la zona de estudio. Flujos de agua de la quebrada Rumipamba y otras que desembocan en el río Machangara (Peltre, P., 1989). En la actualidad, alcantarillas y rellenos convertidos en parques, calles y edificios.

El nivel freático evidente en la zona de estudio fluctúa entre 30 y 45 metros en relación a la topografía (Spol, 2014). Edificios con seis subsuelos como el Metropolitan (NNUU y Núñez de Vela), se encontró un flujo de agua a 18 metros de profundidad. Las bombas en el edificio mantienen una descarga constante a las alcantarillas del sector.

Geológicamente predomina un depósito lagunar de ceniza volcánica y la formación Cangagua. En un corte estratigráfico de la quebrada El Batán, se observa que la formación Cangagua tiene unos 15 metros de espesor con intercalaciones de pómez y ceniza, con una antigüedad de 165 a 180 mil años. Subyacen depósitos piroclásticos (15 – 20m) y un flujo de lava “El Batán” (30 m) con una edad de 667 +/- 15 mil años. Bajo los depósitos anteriores subyacen la “Unidad Quito” (60 m): lahares fluvio-lacustres con intercalaciones de pómez y depósitos de avalancha volcánica, “Machangara” (Alvarado, 2012, p. 77).

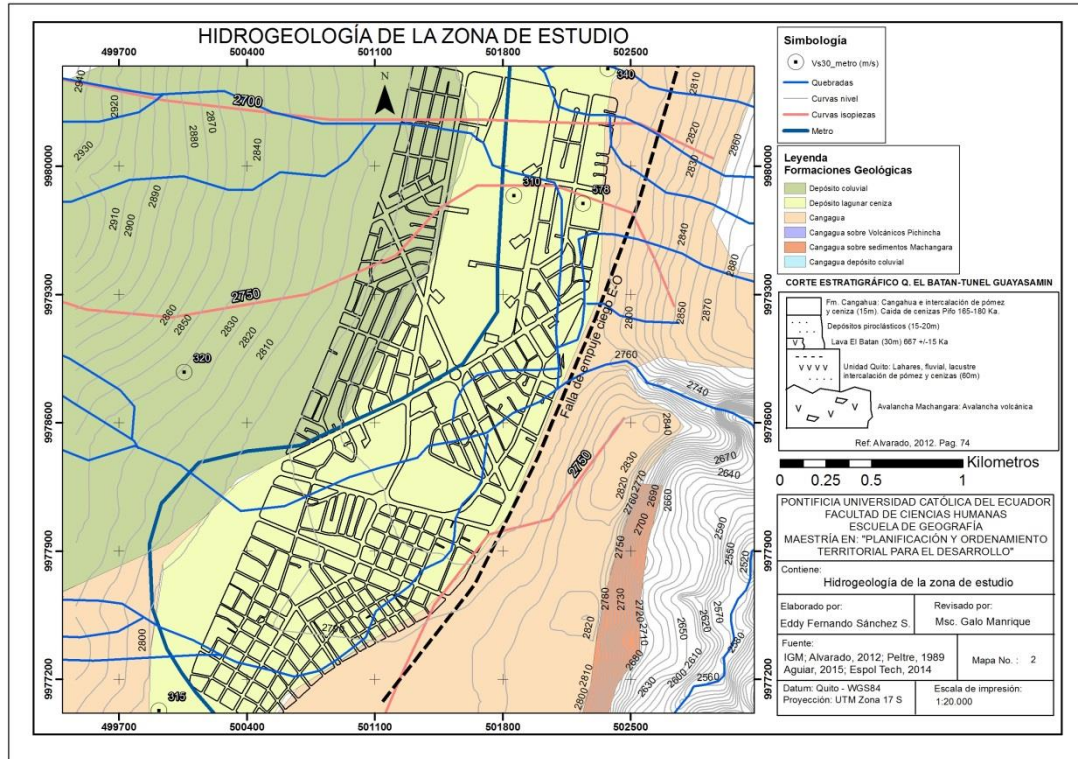


Figura 8. Hidrogeología de la zona de estudio. Elaboración: Propia.

4.3. Datos de suelos del centro norte de Quito (SUCS).

En la Figura 9 se han definido 4 zonas de clasificación de suelos W1...W4: Las zonas se distinguieron por sus características geotécnicas propias.

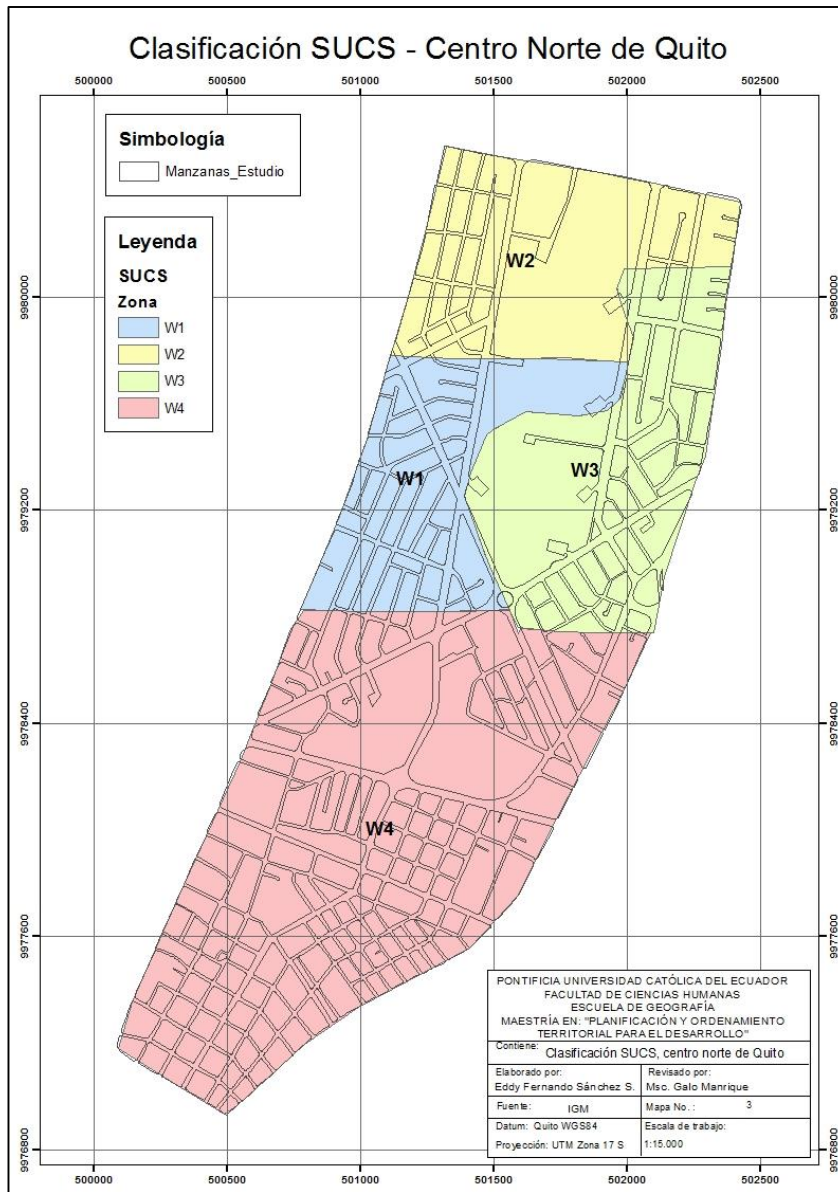


Figura 9. Clasificación SUCS, Centro Norte de Quito. Elaboración: Propia.

En la Tabla 15 se observa que según el análisis estadístico de: 822 datos para W1, 953 datos para W2, 258 datos para W3 y 591 datos para W4 en la zona de estudio. Los suelos limo-arcillosos son predominantes en un 60% y los arenosos en un 40%. Independiente de las zonas W1..W4: el 55% de suelos son ML (Limos inorgánicos de baja compresibilidad), el 26% son CL (arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad), el 15% son CL_ML y sólo el 3% son MH (limo inorgánico de alta compresibilidad) (Ludeña, 2007).

Tabla 15.
Clasificación SUCS por zonas W1..W4.

%	ML	CL	CL-ML	MH	limo-arcilla	arena
W1	43,5	34,8	19,1	2,6	58,8	41,2
W2	77,2	12,3	7,0	3,5	61,4	38,6
W3	57,1	26,2	11,9	4,8	59,8	40,2
W4	43,0	32,6	23,3	1,2	71,1	28,9

Fuente: Elaboración propia

4.4. Datos SPT del centro norte de Quito.

Los datos de SPT del centro norte de Quito se acumulan de varias fuentes: Ludeña y Balladares (1990) entre los años 1970 a 1990 recopilan 3.205 sondeos de estudio de mecánica de suelos para cimentaciones de edificios. Ludeña (2007) basándose en 2.552 registros de ensayos de penetración estándar SPT, modela un mapa geo-estadístico con profundidades de 1 a 12 metros con el software GSLIB. El software GSLIB entrega gráficos de N(SPT) de 1 a 12 metros de profundidad cada metro. En la información recopilada de los estudios de mecánica de suelos en la ciudad de Quito no se encontró información que permita corregir los datos de N(SPT).

Para realizar la zonificación SPT a 6 y 12 metros de profundidad se agruparon los gráficos del software GSLIB. Luego se definió 216 puntos geográficos con sus respectivos valores N(SPT) para 6 y 12 metros de profundidad utilizando el software ArcMap. A continuación, se definió curvas Iso_N(SPT) de igual valor para la zona de estudio.

En la Figura 10 se tiene las curvas Iso_N(SPT) a 6 metros de profundidad. La mayoría de los suelos presentan curvas Iso_N(SPT) de 3 a 16, otros de 16 a 30 y pocos suelos presentan curvas Iso_N(SPT) de 30 a 50.

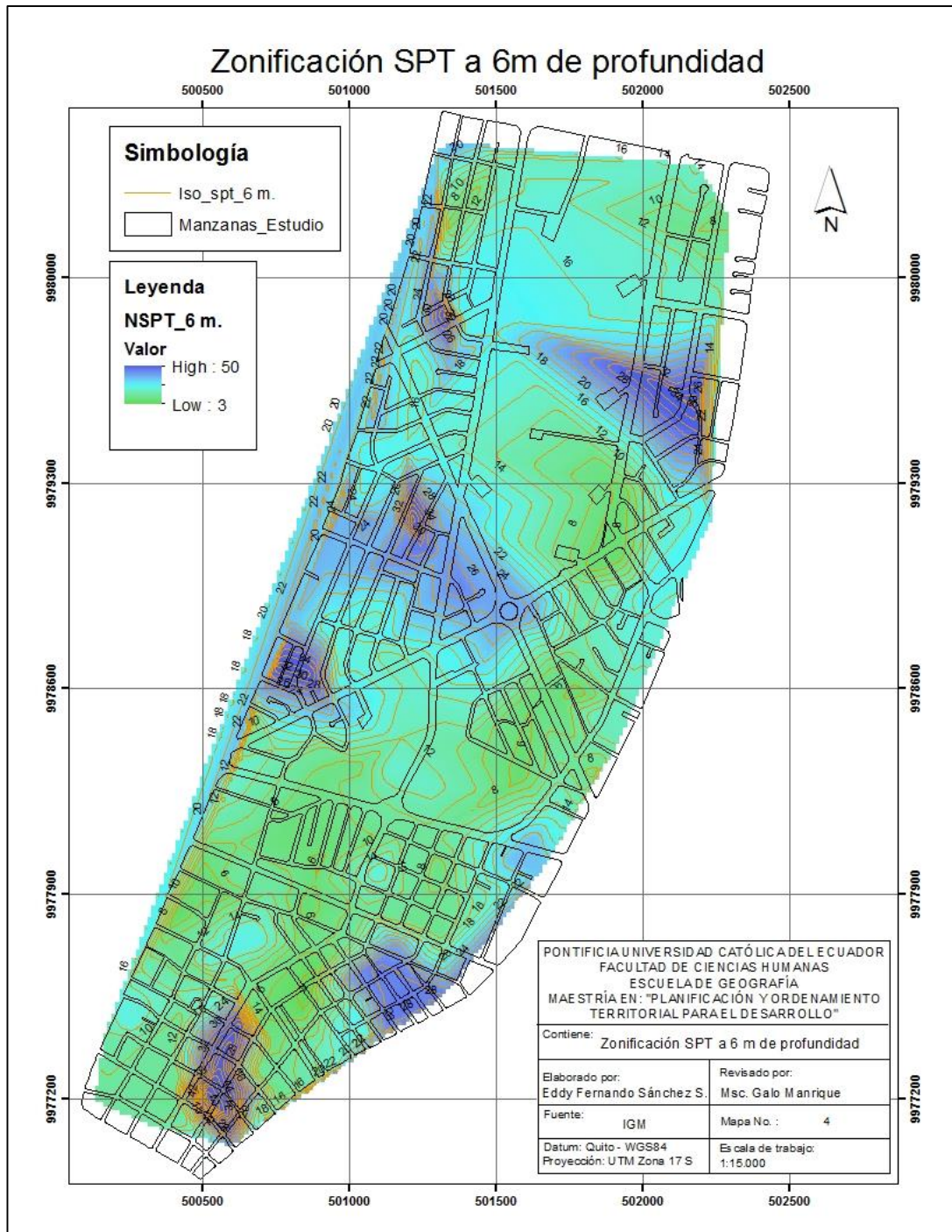


Figura 10. Zonificación SPT a 6 m de profundidad. Elaboración: Propia.

En la Figura 11 se observa las curvas Iso_N(SPT) a 12 metros de profundidad. La mayoría de los suelos presentan curvas Iso_N(SPT) de 6 a 26, otros de 26 a 34 y pocos suelos presentan curvas Iso_N(SPT) de 34 a 47.

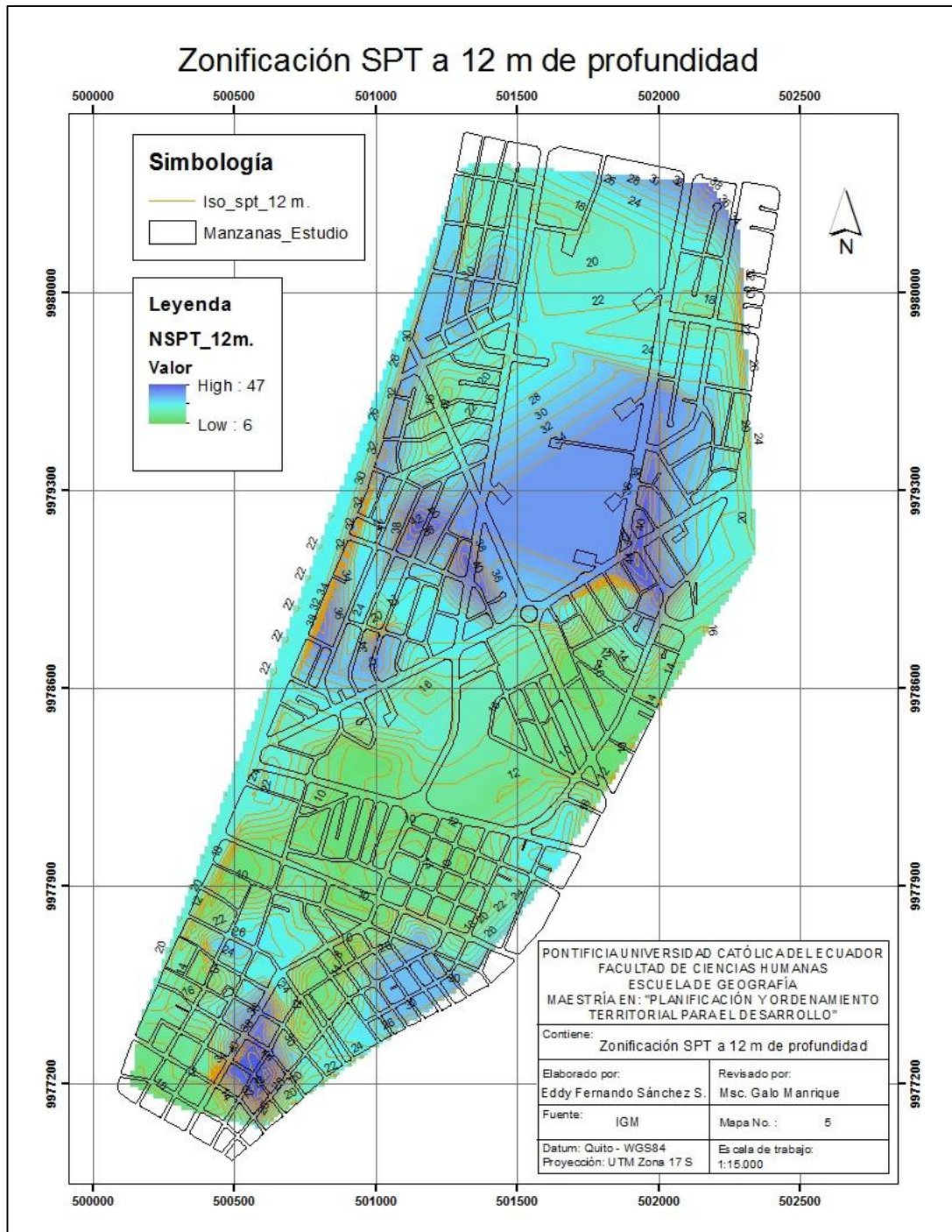


Figura 11. Zonificación SPT a 12 m de profundidad. Elaboración: Propia.

4.5. Datos de velocidad de onda de corte (V_s) del centro norte de Quito.

Con los datos $N(SPT)$ a 6 y 12 metros de profundidad se utilizó la fórmula: $V_s = 85.34N^{0.348}$, investigada por Ohta & Goto (1978) y se definió las curvas Iso_ V_s de igual valor para la zona de estudio, (Alfaro, 2007, p. 16).

En la Figura 12 se tiene las curvas Iso_Vs₆ a 6 metros de profundidad. La mayoría de los suelos presentan curvas Iso_Vs₆ de 126 m/s a 210 m/s, otros de 210 m/s a 280 m/s y pocos suelos presentan curvas Iso_Vs₆ de 280 m/s a 329 m/s.

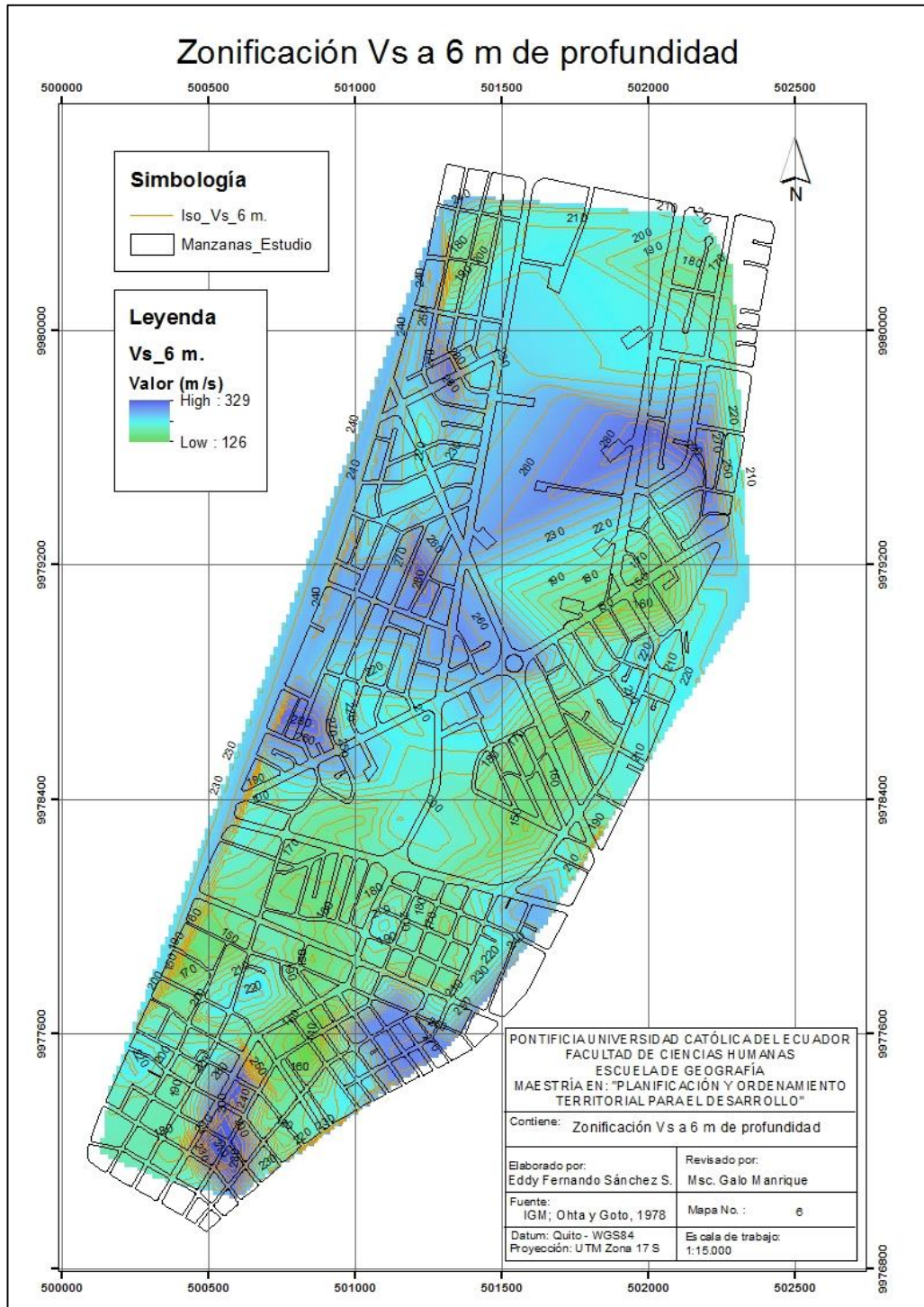


Figura 12. Zonificación Vs₆ a 6 m de profundidad. Elaboración: Propia.

En la Figura 13 se observa las curvas Iso_Vs₁₂ a 12 metros de profundidad. La mayoría de los suelos presentan curvas Iso_Vs₁₂ de 155 m/s a 250 m/s, otros de 250 m/s a 290 m/s y pocos suelos presentan curvas Iso_Vs₁₂ de 290 m/s a 321 m/s.

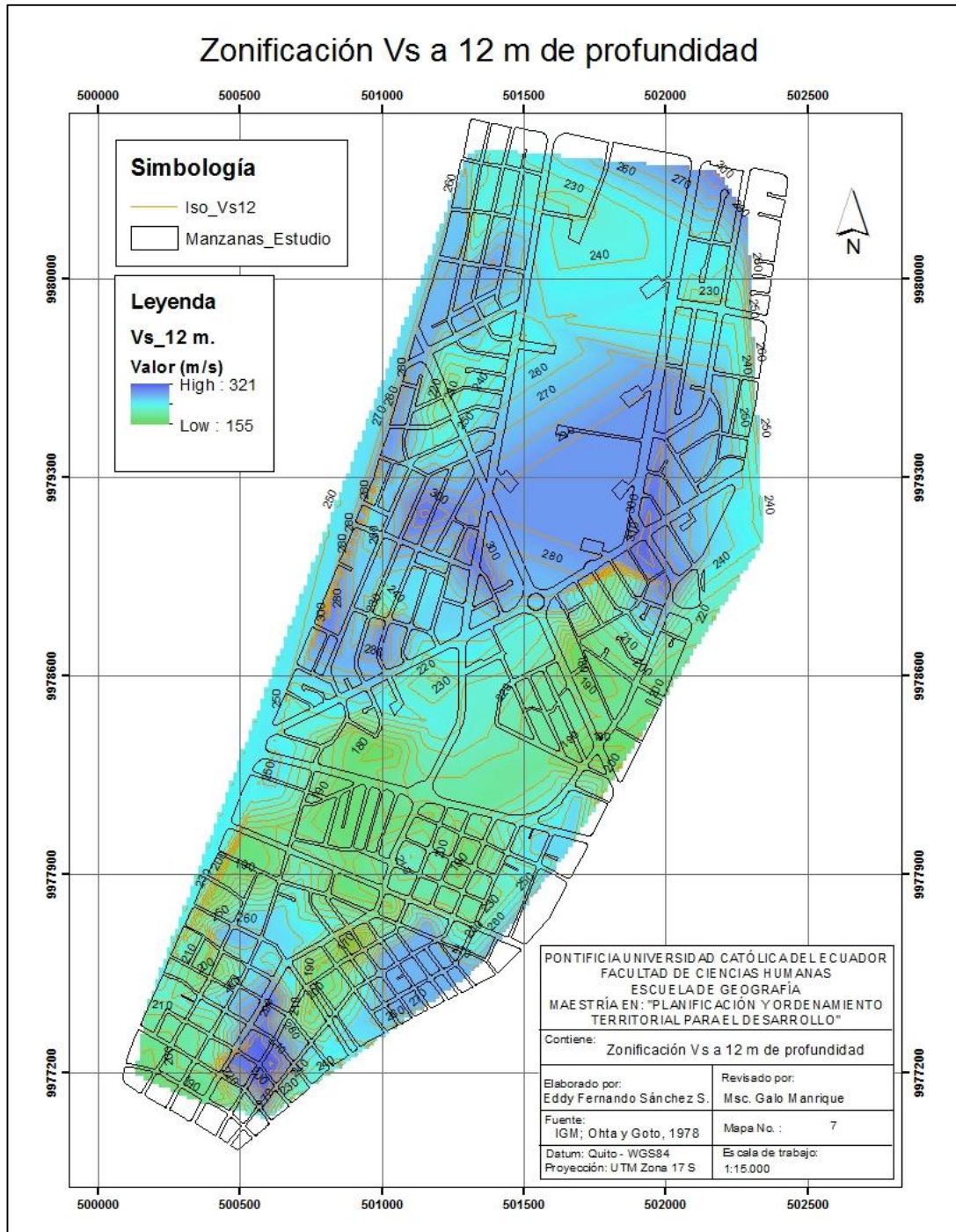


Figura 13. Zonificación Vs₁₂ a 12 m de profundidad. Elaboración: Propia.

4.6. Datos de densidad de vivienda, ocupación predio y altura de pisos del centro norte de Quito.

El área de estudio ocupa 404 Ha. Aproximadamente el 30% de las manzanas están edificadas. El parque La Carolina ocupa 63 Ha. y las vías 79 Ha. Según el censo 2010 existe una población total de 20.031 personas y un total de viviendas de 8.657. Una baja densidad poblacional de 2.3 personas por vivienda. En la Figura 14 tenemos una clasificación por número de pisos y se observa que la mayoría de las edificaciones son menores a 6 pisos de altura.

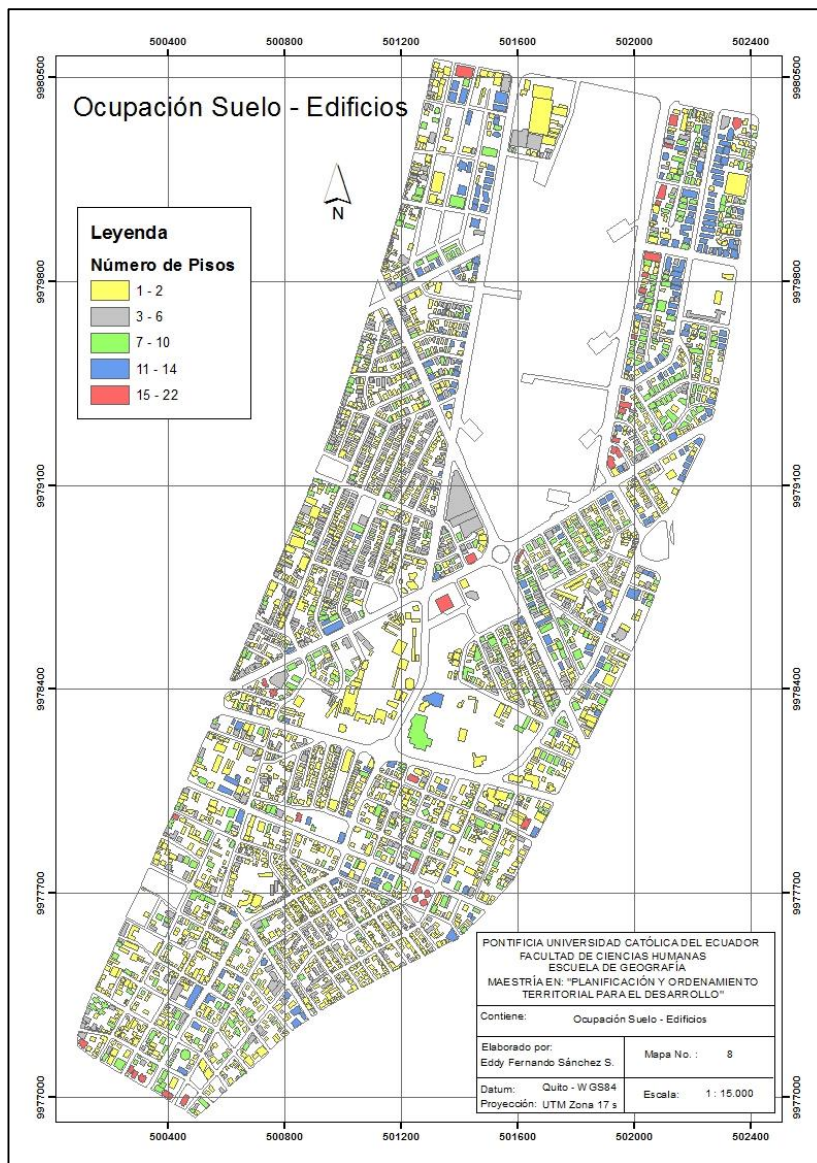


Figura 14. Ocupación del Suelo - Edificios. Elaboración: Propia.

4.7. Análisis, procesamiento de datos y caracterización geotécnica.

Los ensayos de clasificación SUCS definen que los suelos de la zona de estudio son: ML (43-77%), CL (12.3-34.8%), CL-ML (7-23.3%) y MH 1.2-4.8%). Predominan Limos y arcillas de baja plasticidad (Figura 15).

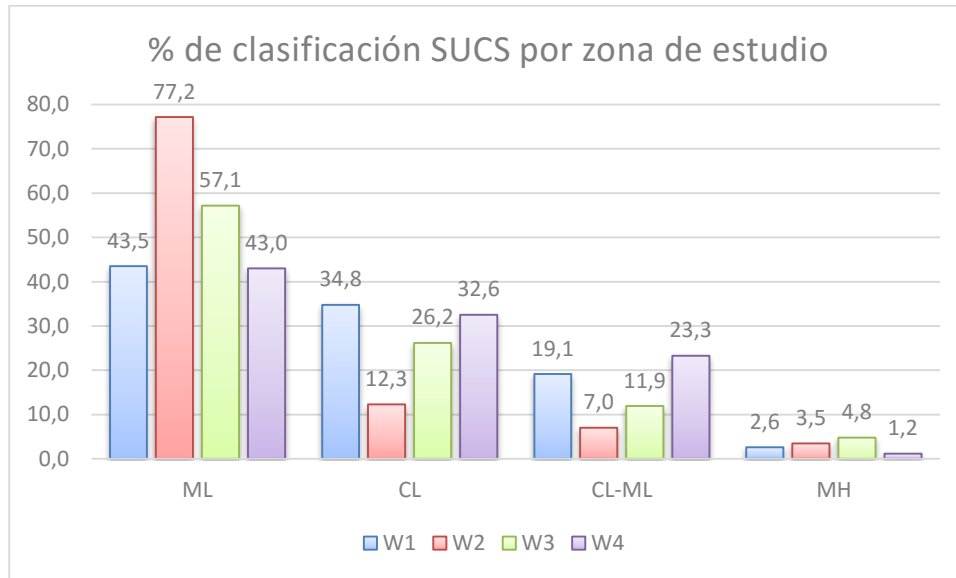


Figura 15. Porcentaje de clasificación SUCS en la zona de estudio.

Analizando los datos N (SPT) y Vs a 6 y 12 metros de profundidad se observa una correlación poco significativa para la mitad de los datos ($R^2 = 0.5$) (Fig. 16-17). La caracterización geotécnica a 6 y 12 m de profundidad dependen de estos datos y la mejor correlación significaría una historia geológica común en estratos anisotropicos.

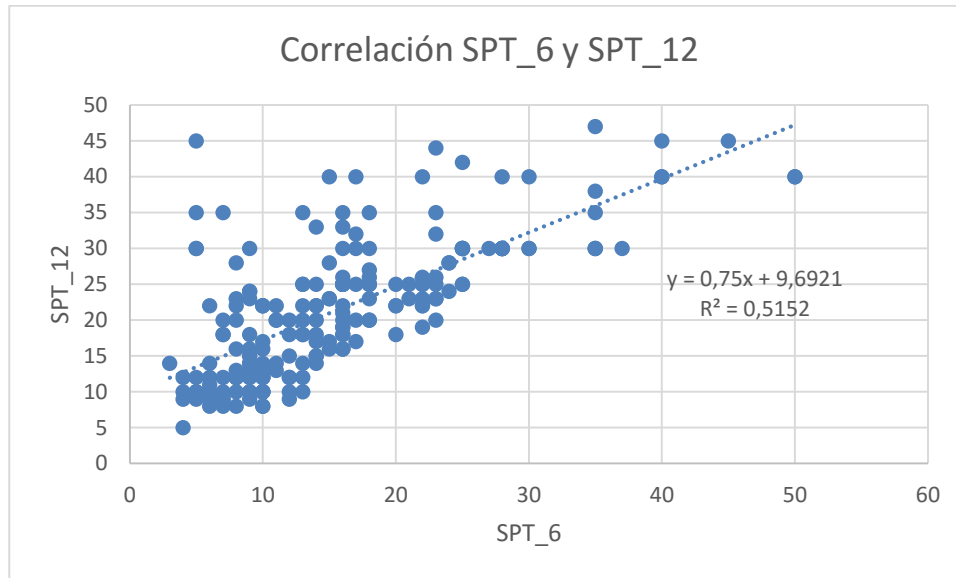


Figura 16. Correlación SPT₆₋₁₂ a 6 m y 12 m de profundidad.

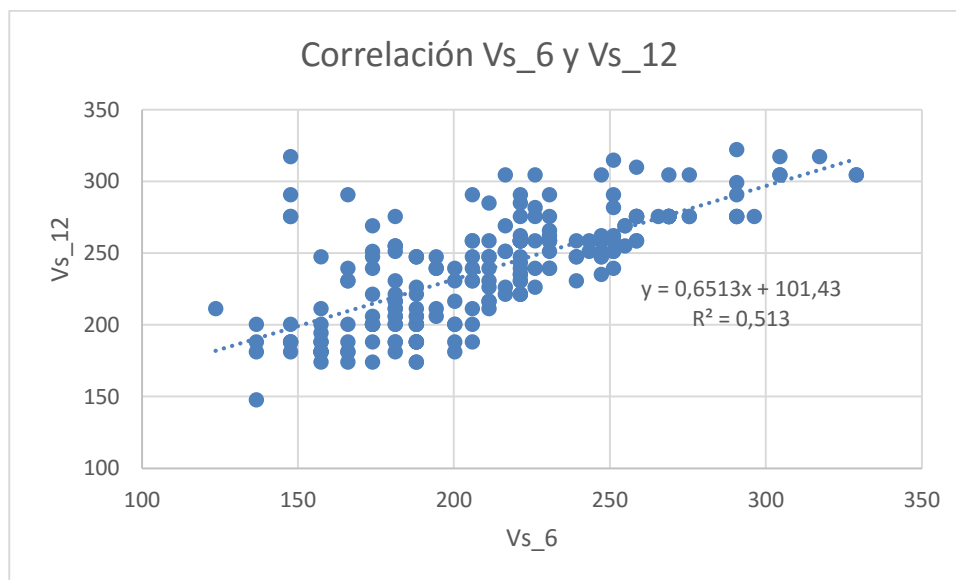


Figura 17. Correlación Vs₆₋₁₂ a 6 m y 12 m de profundidad.

Con las variables de: geología, pendiente, clasificación de suelos SUCS y velocidad de onda sísmica V_{s6} . se hizo una calificación de 4 para un suelo más competente para obras civiles y 1 para un suelo menos competente para obras civiles (Tabla 16, 17, 18 y 19). Luego se valoró las variables con una carga de 1 a 6 en orden de importancia para la caracterización geotécnica (Tabla 20).

Tabla 16.
Ponderación por geología en la zona de estudio

GEOLOGÍA	#	PONDERAC. NORMALIZADA
Rellenos-quebradas	1	0.25
Depósito lagunar de ceniza	2	0.50
Depósito coluvial	3	0.75
Cangagua	4	1.00

Fuente: (Peltre, P., 1989), (Alvarado, A., 2012), (Spol, T., 2014), (Quizanga, 2015, p. 109-110).
Elaboración propia.

Tabla 17.
Ponderación por pendiente

Pendiente	Geoforma	#	PONDERACIÓN NORMALIZADA
0 a 12	Mesetas	3	1.00
12 a 25	Lomas	2	0.67
>25	Colinas	1	0.33

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18.
Ponderación por clasificación SUCS por zonas W1..W4

SUELO	ML (%)	CL (%)	#	PONDERACIÓN NORMALIZADA
W4	43	32.6	1	0.25
W1	43.5	34.8	2	0.50
W3	57.1	26.2	3	0.75
W2	77.2	12.3	4	1.00

Fuente: Ludeña (2007). Elaboración propia

Tabla 19.
Clasificación por velocidad de onda sísmica Vs

Vs6 (m/s) - Zona de estudio (desde – hasta)	NEC	#	PONDERACIÓN NORMALIZADA	
126	190	E, F	1	0.25
190	221	D	2	0.50
221	250	D	3	0.75
250	329	D	4	1.00

Fuente: Ohta & Goto (1978), (Como se cita en Alfaro, 2007). Elaboración propia

Tabla 20.
Importancia de las variables

VARIABLES	IMPORTANCIA	PONDERACIÓN NORMALIZADA
GEOLOGÍA	1	0.1
PENDIENTE	1	0.1
SUCS	2	0.2
Vs (m/s)	6	0.6
Suma	10	1.0

Fuente: Elaboración propia

Utilizando la importancia de las variables para una caracterización geotécnica se propone la siguiente fórmula: $\text{Susceptibilidad Geotécnica} = 0.1 \times \text{Geología} + 0.1 \times \text{Pendiente} + 0.2 \times \text{SUCS} + 0.6 \times \text{Vs}_6$. Luego aplicamos la herramienta Raster Calculator de ArcMap para realizar el Mapa de Susceptibilidad Geotécnica a 6 metros de profundidad.

En la Figura 18 tenemos 83 ha. para susceptibilidad muy alta, 82 ha. para susceptibilidad alta, 121 ha. para susceptibilidad moderada y 102 ha. para susceptibilidad baja. Existen unas 15 ha. no valoradas en un total de 404 ha. del territorio estudiado.

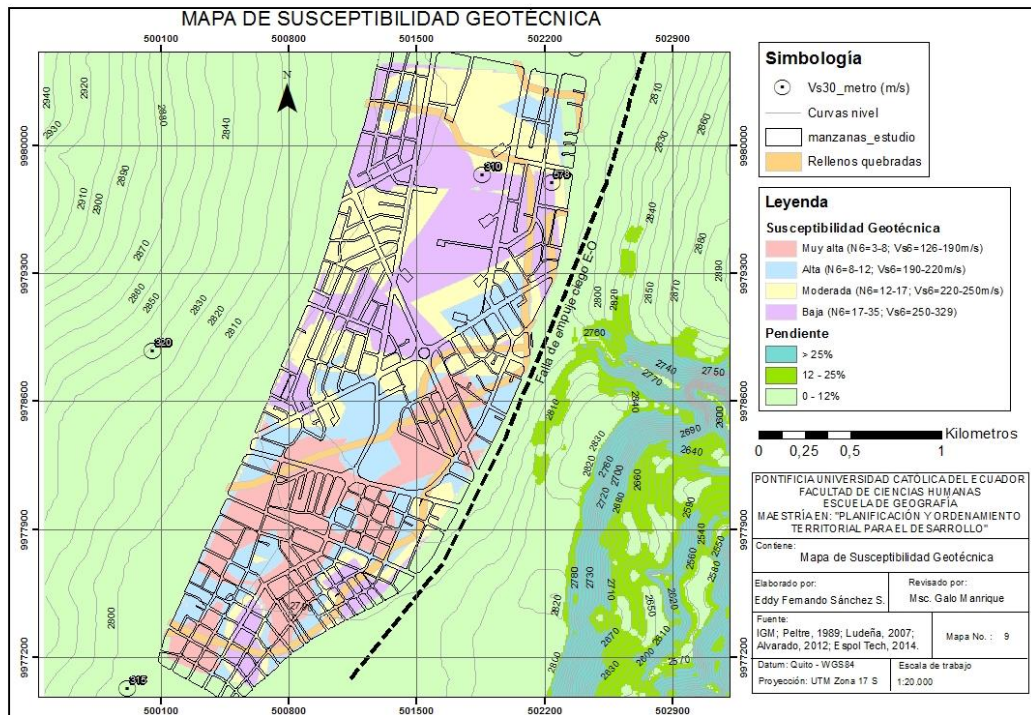


Figura 18. Mapa de Susceptibilidad Geotécnica. Elaboración: Propia.

4.8. Relación de la caracterización geotécnica del centro norte de Quito con el uso y ocupación del suelo por obras civiles.

La zona de estudio tiene 3.366 edificaciones. El 69% de las mismas son de uno a tres pisos de altura. El 24% son de cuatro a diez pisos de altura. Sólo el 7% son edificios de 10 a 22 pisos de altura (Figura 19).

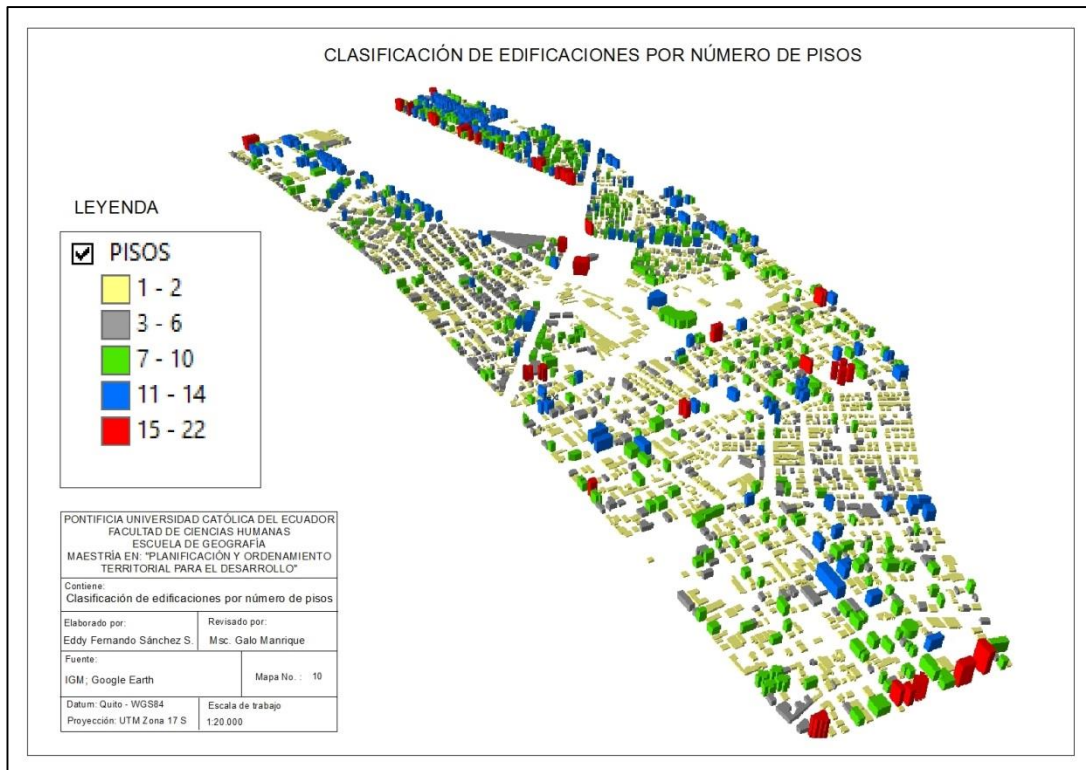


Figura 19. Clasificación de edificaciones por número de pisos. Elaboración: Propia.

Comparando las zonas de susceptibilidad geotécnica con el uso y ocupación del suelo por edificaciones de 1 a 18 pisos (Tabla 21). Tenemos 822 edificaciones para la zona de susceptibilidad muy alta, 644 edificaciones para la zona de susceptibilidad alta, 951 edificaciones para la zona de susceptibilidad moderada y 682 edificaciones para la zona de susceptibilidad baja. Los mayores porcentajes de edificaciones en la zona de estudio corresponden a edificios de uno a cuatro pisos de altura.

Tabla 21.
Número de pisos por zona de susceptibilidad geotécnica

No. De pisos	Susceptibilidad geotécnica			
	Muy alta	Alta	Moderada	Baja
1	165	173	170	106
2	376	215	308	250
3	101	56	135	93
4	29	42	71	46
5	20	10	37	24
6	18	15	19	7
7	13	18	16	16
8	40	37	62	26
9	18	4	21	16
10	17	19	32	35
11	8	15	14	9
12	11	27	49	38
13	2	6	6	5
14	1	0	3	2
15	1	3	0	1
16	1	2	5	8
17	0	2	3	0
18	1	0	0	0
Total	822	644	951	682

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 22 se observa que en la zona de susceptibilidad muy alta con 83 ha. y el 21% del territorio estudiado, existen 78% de construcciones de 1 a 3 pisos, 8% de 4 a 6 pisos, 11% de 7 a 10 pisos y 3% de edificios mayores a 10 pisos. En la zona de susceptibilidad alta con 82 ha. y el 20% del territorio estudiado, existen 69% de construcciones de 1 a 3 pisos, 10% de 4 a 6 pisos, 12% de 7 a 10 pisos y 9% de edificios mayores a 10 pisos. En la zona de susceptibilidad moderada con 121 ha. y el 30% del territorio estudiado, existen 64% de construcciones de 1 a 3 pisos, 13% de 4 a 6 pisos, 14% de 7 a 10 pisos y 9% de edificios mayores a 10 pisos. En la zona de susceptibilidad baja con 102 ha. y el 25% del territorio estudiado, existen 66% de construcciones de 1 a 3 pisos, 11% de 4 a 6 pisos, 14% de 7 a 10 pisos y 9% de edificios mayores a 10 pisos. No existe una relación técnica entre el número de pisos de los edificios y las zonas de susceptibilidad geotécnica.

Con el promedio de 69% de las edificaciones menores a tres pisos, se prevé que para los próximos años el centro norte de Quito crezca verticalmente.

Tabla 22.

Porcentaje de uso de suelo por zona de susceptibilidad geotécnica

SUSCEPTIBILIDAD	NÚMERO PISOS				% Total
	1 a 3	4 a 6	7 a 10	>10	
	% USO SUELO				
MUY ALTA	78	8	11	3	100
ALTA	69	10	12	9	100
MODERADA	64	13	14	9	100
BAJA	66	11	14	9	100
PROMEDIO	69	11	13	7	100

Fuente: Elaboración propia

Las zonas de susceptibilidad geotécnica estudiadas, integran datos físico-mecánicos que pueden ser usados como referencia para cálculo y diseño estructural sísmo-resistente de cimentaciones e infraestructura civil. Actualmente se necesita datos técnicos que permitan proponer infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, para apoyar el desarrollo socio-económico de la zona de estudio.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Los suelos encontrados en la zona de estudio son: 55% ML (Limos inorgánicos de baja compresibilidad), 26% CL (arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad), 15% CL-ML y el 3% MH (limo inorgánico de alta compresibilidad). Los valores $NSPT_6$ a 6 metros de profundidad se encuentran entre los valores de 3 y 50, Los valores $NSPT_{12}$ a 12 metros de profundidad entre 6 y 47. Los valores de velocidad de onda sísmica V_{s6} a 6 metros de profundidad se encuentran entre los valores de 126 m/s y 329 m/s, los valores de velocidad de onda sísmica V_{s12} a 12 metros de profundidad entre 155 m/s y 321 m/s. Analizando los datos N (SPT) y V_s a 6 y 12 metros de profundidad se observa una correlación poco significativa para la mitad de los datos comparados entre 6 y 12 metros ($R^2 = 0.5$).

Tomando en cuenta la Tabla 4 de este estudio, los suelos son: cohesivos blandos (< 200 m/s) y cohesivos semiblandos (200 – 400 m/s). La (NEC, 2015) describe a los suelos de este estudio como: suelos rígidos (D) con ($180 < V_s < 360$) - ($15 < N < 50$) y arcillas blandas (E) con ($V_s < 180$) – ($N < 15$).

El área de estudio ocupa 404 Ha. y 3.366 edificaciones. El 69% de las mismas son de uno a tres pisos de altura. El 24% son de cuatro a diez pisos de altura. Sólo el 7% son edificios de 10 a 22 pisos de altura. El parque La Carolina ocupa 63 Ha. y las vías 79 Ha. Según el censo 2010 existe una población total de 20.031 personas y un total de viviendas de 8.657 generando una baja densidad poblacional de 2.3 personas por vivienda. (Tabla 23 y 24).

Tabla 23.
Porcentaje de pisos en edificaciones de la zona de estudio

Pisos		Numero de edificaciones					%
		Susceptibilidad					
Desde	Hasta	Muy alta	Alta	Moderada	Baja	Total	
1	3	642	444	613	449	2148	69
4	10	155	145	258	170	728	24
11	22	25	55	80	63	223	7
Total		822	644	951	682	3099[†]	100

Fuente: Elaboración propia

Nota: † 267 edificaciones no fueron valoradas por susceptibilidad

Tabla 24.
Descripción de la zona de estudio en cantidades y unidades

Descripción	Cantidad	Unidades
Área estudio	404	Ha
Área parque La Carolina	63	Ha
Área de vías	79	Ha
No. Edificaciones	3366	u
No. Viviendas	8657	u
Densidad poblacional	2,3	personas/vivienda

Fuente: Elaboración propia

Con el 69% de las edificaciones menores a tres pisos, se prevé que para los próximos años el centro norte de Quito crezca verticalmente.

Comparando las zonas de susceptibilidad geotécnica para 6 metros de profundidad, con el uso y ocupación del suelo por edificaciones de 1 a 18 pisos. Tenemos 822 edificaciones para la zona de susceptibilidad muy alta, 644 edificaciones para la zona de susceptibilidad alta, 951 edificaciones para la zona de susceptibilidad moderada y 682 edificaciones para la zona de susceptibilidad baja. Existen 83 ha. para susceptibilidad muy alta, 82 ha. para susceptibilidad alta, 121 ha. para susceptibilidad moderada y 102 ha. para susceptibilidad baja. 15 ha. no fueron valoradas de un total de 404 ha. del territorio estudiado. (Tabla 25).

Tabla 25.
Susceptibilidad geotécnica vs. número edificaciones y hectáreas

Susceptibilidad geotécnica	Número edificaciones	Ha
muy alta	822	83,01
alta	644	82,41
moderada	951	121,43
baja	682	102,11
no valoradas	267	15,04
Total	3366	404

Suelos con susceptibilidad geotécnica más baja son suelos más competentes para obras civiles y suelos con susceptibilidad geotécnica más alta son suelos menos competentes para obras civiles. No se ha encontrado una relación técnica entre el número de pisos de los edificios y las zonas de susceptibilidad geotécnica.

5.2 Recomendaciones

Realizar sondeos de verificación in-situ a 6 y 12 metros de profundidad para determinar los parámetros físicos de velocidad de onda sísmica en puntos geográficos característicos y compararlos con los datos geotécnicos de esta investigación.

Realizar sondeos geotécnicos hasta 30 m de profundidad y ensayos geofísicos, para determinar las velocidades de corte V_s y velocidades longitudinales V_p , con esta información se podría ajustar los valores proporcionados en la presente investigación.

Utilizando los promedios de velocidad de onda sísmica realizar los espectros de respuesta de aceleración vs. período, con el programa ProShake 2.0 – Versión educativa y compararlos con los espectros de respuesta de la zona y la norma Ecuatoriana de la Construcción NEC.

La caracterización geotécnica de este estudio debe servir como una guía. Se recomienda realizar ensayos in-situ para obras civiles específicas.

El ordenamiento territorial de la ciudad de Quito debe incluir caracterización físico mecánica del subsuelo y debe ser un trabajo extendido a todo su territorio.

Bibliografía

- Aguiar, R. (2015). *Espectros de control para la ciudad de Quito – Ecuador*. Barcelona, España: CIMNE.
- Alfaro, A. (2007, junio). Correlación entre el Valor N del Ensayo de Penetración Estándar y Velocidad de Ondas de Corte para Arcillas en Bogotá - Colombia. *Revista Épsilon*, (No. 8), 13–23.
- Alvarado, A. (2012). *Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur (Tesis de Doctorado)*. Université de Grenoble, Francia.
- Astudillo, S. (2013). *Factores de amplificación de sitio para la ciudad de Quito (Tesis de pregrado)*. Escuela Politécnica del Ejército, Quito.
- Braja, M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: Thomson Learning.
- Brandenberg, S., Ballana, N., & Shantz, T. (2010). Shear Wave Velocity as a Statistical Function of Standard Penetration Test Resistance and Vertical Effective Stress at Caltrans Bridge Sites. Recuperado a partir de https://peer.berkeley.edu/publications/peer_reports/reports_2010/web_PEER10_03_Brandenberg.pdf
- Bravo, D. (2011). *Aplicación de la gestión de riesgos naturales como instrumento para el establecimiento de políticas de desarrollo sostenible en el Cantón Cevallos Provincia de Tungurahua (Tesis de pregrado)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Bray, J. (1995). *The Civil Engineering Handbook*. Boca Raton, Florida.
- Bunge, M. (1961). El principio de causalidad en la ciencia moderna. Eudeba. Recuperado a partir de <https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/4/1559/5.pdf>
- Buzai, G. (2013). *Sistema de Información Geográfica (SIG). Teoría y Aplicación* (1ª ed.). Luján - Buenos Aires: Universidad Nacional de Luján.
- Carazo, N. (2012, marzo 15). ¿Qué es la aceleración sísmica? |. Recuperado 29 de diciembre de 2016, a partir de <http://ncarquitectura.com/que-es-la-aceleracion-sismica/>
- CONAM/GTZ. (2006). *Bases conceptuales y metodológicas para la elaboración de la guía nacional de Ordenamiento Territorial* (Vol. Cap. 11). Lima.

- D'Ercole, R., & Metzger, P. (2004). La vulnerabilidad del Distrito Metropolitano de Quito. Dirección Metropolitana de Territorio y Vivienda. DMQ.
- D. Muñoz. (1989). Conceptos básicos de riesgo sísmico. *Física de la Tierra, 1*.
- El Comercio. (2016, enero). Hacia las ciudades inteligentes y verticales. Recuperado a partir de <http://especiales.elcomercio.com/planeta-ideas/planeta/enero-2-del-2016/hacia-ciudades-inteligentes-y-verticales>
- El País, E. (2015, marzo 27). Objetivo 9. Construir infraestructura resiliente y fomentar la innovación. Recuperado 5 de diciembre de 2016, a partir de http://elpais.com/elpais/2015/03/24/planeta_futuro/1427188076_965974.html
- González, J. (2017). Clasificar suelos de acuerdo al SUCS y AASHTO. Recuperado a partir de http://www.academia.edu/9357491/Clasificar_suelos_de_acuerdo_al_SUCS_Y_AASHTO_excel_1
- Lambe, W., & Whitman, R. (1981). *Mecánica de Suelos* (3ª ed.). México: Limusa.
- Ludeña, L. (2007). *Variabilidad espacial del ensayo de penetración estándar en los sedimentos volcánicos del subsuelo del centro-norte de la ciudad de Quito (Tesis de maestría)*. Politécnica de Cataluña, España.
- Mena, D. (2013). *Optimización del uso de SIG en la microzonificación sísmica y evaluación de la vulnerabilidad física en la ciudad de Guaranda - Ecuador (Tesis de posgrado)*. San Francisco de Quito, Quito. Recuperado a partir de <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/2986/1/109902.pdf>
- Ministerio del Ambiente Perú. (s. f.). Mapa de vulnerabilidad física de Perú - Herramienta para la gestión del riesgo. Recuperado a partir de www.minam.gob.pe
- Montana, D. (2013). Características de compresibilidad y resistencia de arcillas típicas del depósito lacustre de Bogotá. Recuperado a partir de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/108/1/CARACTER%20DE%20COMPRESIBILIDAD%20ARCILLAS%20TIPICAS%20DE%20LA%20SABANA%20DE%20BOGOT%C3%81.pdf>
- Montero, J. (2017, diciembre). Velocidad de onda sísmica.

- Morales, C., Hernández, J., Schmithz, M., Cano, V., & Tagliaferro, M. (2011). Velocidades promedios de ondas de corte en los primeros 30 m de profundidad (Vs30) inferidas a partir del relieve en el área metropolitana de Caracas. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 26(No. 2), 5–6.
- Naranjo, H., & Dranichnikov, T. (2012). *Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional*. Cuenca.
- NEC. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción.
- Peltre, P. (1989). Quebradas y riesgos naturales en Quito, periodo 1900-1988. *Institut de Recherche pour le Développement*. Recuperado a partir de www.documentation.ird.fr/hor/fdi:31649
- Peñañiel, G., Pérez, G., & Pérez, I. (2012). *Densificación de la ciudad. Aproximación desde la Arquitectura*. Universidad de Cuenca, Cuenca. Recuperado a partir de file:///C:/Users/usuario/Downloads/Tomo-II_Parte4.pdf
- Pestana, J. (2017). Índice de compresión. Recuperado a partir de <https://www.finesoftware.es/ayuda-en-linea/geo5/es/indice-de-compresion-01/>
- Quishpe, D., & Quishpe, M. (2011). *Espectros para el Distrito Metropolitano de Quito asociados a las fallas de: Quito y Nanegalito (Tesis de pregrado)*. Escuela Politécnica del Ejército, Quito.
- Quizanga, D. (2015). *Espectros específicos para la ciudad de Quito en función de las fallas ciegas inversas (Tesis de pregrado)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Sande, F. (2013). La ciudad vertical como modelo de desarrollo sostenible. Recuperado a partir de <http://capitalibre.com/2013/03/ciudad-vertical-desarrollo-sostenible>
- Sarria, F. (s. f.). Sistemas de Información Geográfica. Recuperado 10 de octubre de 2016, a partir de <http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>
- Silva, E., Gioacchini, G., Panella, S., Tornello, M., & Frau, C. (2005). Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica IX Jornadas. Presentado en Relación entre aceleración del suelo e intensidad sísmica para la zona norte de la provincia de Mendoza, Argentina., Concepción, Chile.

- Solano, J. (2012). Infraestructura resiliente: una oportunidad para el concreto. Recuperado a partir de http://www.ficem.org/presentaciones/nov_2012/resultados_foro_chile/8_jorgesolano.pdf
- Spol, T. (2014). Mapa Hidrogeológico Quito.
- Suárez, J. (s. f.). La respuesta del suelo. Recuperado a partir de www.erosion.com.co
- Universidad Complutense de Madrid. (s. f.). Departamento de Geodinámica. Recuperado 21 de enero de 2017, a partir de http://pendientedemigracion.ucm.es/info/geodina/investigacion/tectonica_geologica_estructural.html
- Universidad San Francisco de Quito. (s. f.). Estilo APA. Recuperado a partir de repositorio.usfq.edu.ec
- Valverde, J., Fernández, J., Jiménez, E., Vaca, T., & Alarcón, F. (2001). Microzonificación sísmica de los suelos del distrito metropolitano de Quito.
- Wicander, R., & Monroe, J. (2000). *Fundamentos de Geología* (2ª ed.). México: Thomson.