Universidad de Costa Rica Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil

Propuesta de una	Nueva Zonificación	Geotécnica de	los Suelos	de la Gran
	Área Metropolitar	na de Costa Rica	а	

Trabajo de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

María Paula Ureña Bruns

Director de Proyecto de Graduación: Ing. Marco Valverde Mora, M.Sc.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Costa Rica Diciembre, 2021

Miembros del Tribunal Evaluador

Director

Ing. Marco Valveyae Mora, M.Sc

Comité Asesor

Ing. Marcia Cordero Sandí, M. Sc

Ing. Sergio Saénz Aguilar, M. Sc

Ing. William Vargas Monge, PhD.

Optado por el grado de Licenciada en Ingeniería Civil

María Paula Ureña Bruns

Maus

Fecha: 08 de noviembre de 2021

El suscrito, María Paula Ureña Bruns, cédula 1-1658-0050, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B57330, manifiesta que es autor (a) del Proyecto Final de Graduación "Propuesta de una Nueva Zonificación Geotécnica de los Suelos de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica", bajo la Dirección del ingeniero Marco Valverde Mora M.Sc., quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mis papás por ser mi principal apoyo durante este proceso y por darme la oportunidad de concluir mis estudios. A mi novio, amigos y mis hermanas, por siempre apoyarme y animarme a no rendirme. A mis compañeros de carrera, por siempre ayudarme cuando los necesitaba y compartir todos estos años conmigo, y porque más que compañeros se convirtieron en mis amigos.

Reconocimientos

Agradezco al Ing. Marco Valverde Mora por su guía, dedicación y por darme todos los recursos necesarios para finalizar el proyecto. Por siempre estar disponible paras las dudas que tenía y por creer en mi para desarrollar el presente trabajo de graduación.

También le agradezco a los ingenieros Sergio Saénz Aguilar, Marcia Cordero Sandí y William Vargas Monge por siempre estar disponibles para atender mis dudas y aconsejarme de la mejor manera.

Al ingeniero José Francisco Garro por brindarme su ayuda y su conocimiento en los Sistema de Información Geográfica.

A mis compañeros, porque durante toda mi formación académica fueron un apoyo incondicional para siempre dar lo mejor de mí y concluir satisfactoriamente mi carrera.

A la empresa Ingeotec S.A. por brindarme la información necesaria para desarrollar el presente trabajo final de graduación.

Índice		
•		
	cción	
	tificación	
1.1.1.	Problema específico	
1.1.2.	Importancia	
1.1.3.	Antecedentes teóricos y prácticos del problema	
1.2. Obj	etivos	6
1.2.1.	Objetivo general	
1.2.2.	Objetivos específicos	
1.3. Mar	co teórico e hipótesis	7
1.3.1.	Condiciones generales del área en estudio (Gran Área Metropolitana)	7
1.3.1.3.	Relieve en la GAM	16
1.3.2.	Ensayos de campo y laboratorio	20
1.3.3.	Mapas y su aplicación en la ingeniería civil	22
1.3.4.	Mapas geotécnicos	24
1.3.5.	Sistemas de Información Geográfica (SIG)	28
1.4. Deli	imitación del problema	40
1.4.1.	Alcances	40
1.4.2.	Limitaciones	40
1.5. Des	cripción de la metodología a usar	41
1.5.1.	Características del suelo a zonificar	43
1.5.1.1.	Suelos presentes en Costa Rica	43
1.5.1.2.	Propiedades geotécnicas de interés	43
1.5.1.3.	Definición de mapas a elaborar	43
1.5.2.	Elaboración de la base de datos	44
1.5.2.1.		
1.5.2.2.	Analizar y clasificar los datos recolectados según los mapas a generar	45
1.5.2.3.	Georreferenciar los estudios geotécnicos recolectados	
1.5.2.4.	Proyectar información recolectada	
1.5.3.	Generar mapas con QGIS	
	canismos posibles de evaluación del proyecto	
Capítulo 2	,	48

2. Su	elos presentes en Costa Rica	48
2.1.	Origen y composición de los suelos	48
2.1	1.1. Factores que intervienen en la formación de los suelos	49
2.1	1.2. Formación de minerales arcillosos	52
2.2.	Permeabilidad de los suelos	54
2.3.	Taxonomía de suelos	57
2.4.	Principales suelos en Costa Rica	61
2.5.	Condiciones geológicas y geotécnicas en la Gran Área Metropolitana	63
Capítul	o 3	77
3. Ma	apas geotécnicos	77
3.1.	Descripción de la base de datos	77
3.2.	Definición de la terminología	81
3.2	2.1. Mapa de espesor de suelo	81
3.2	2.2. Mapa de consistencia	81
3.2	2.3. Mapa tipo de suelo	83
3.2	2.4. Mapa de nivel freático	84
3.3.	Mapas resultantes	85
3.3	3.1. Mapa de espesor de suelo	85
3.3	3.2. Mapa de consistencia o resistencia al ensayo de penetración estándar	89
3.3	3.3. Mapa tipo de suelo	99
3.3	3.4. Mapa de nivel freático	105
Capítul	o 4	113
4. De	scripción de los resultados	113
4.1.	Mapa de espesor de suelo	113
4.2.	Mapa de consistencia o resistencia a la penetración	116
4.3.	Mapa tipo de suelo	121
4.4.	Mapa de nivel freático	125
Capítul	o 5	131
5. Co	nclusiones y recomendaciones	131
5.1.	Conclusiones	131
5.2.	Recomendaciones	132
6. Re	ferencias bibliográficas	134
7 Δn	2049	130

Índice de figuras

Figura 1. División político-administrativa y límites de la GAM Fuente: Consejo Nacional de Planificación Urbana, 2013
Figura 2. Crecimiento urbano en la GAM Fuente: Consejo Nacional de Planificación Urbana, 2013
Figura 3. Incremento poblacional 2015-2030 por cantón de la GAM Fuente: Consejo Nacional de Planificación Urbana, 2013
Figura 4. Uso de suelo en la GAM Fuente: Ministerio de Vivienda, 2008
Figura 5. Regiones climáticas del Costa Rica
Figura 6. Subregiones climáticas del Valle Central
Figura 7. Precipitación media en la Gran área Metropolitana
Figura 8. Temperatura media en la Gran área Metropolitana
Figura 9. Relieve de la GAM Fuente: Plan GAM 201319
Figura 10. Límites de consistencia del suelo Tomado de: Masís, 2017 Fuente: Villalaz, 2004 21
Figura 11. Gráfica de plasticidad Fuente: Das, 2013
Figura 12. Evolución de los Sistemas de Información Geográfica Fuente: Olaya, 201430
Figura 13. Información vertical de un SIG Fuente: Olaya, 2014
Figura 14. Modelos de representación para la información altitudinal. Fuente: Olaya, 201432
Figura 15. Modelos de representación para una red vial. Fuente: Olaya, 201432
Figura 16. Celdas de una malla ráster y sus valores asociados Fuente: Olaya, 201433
Figura 17. Representación de las variables tipo vectorial Fuente: Olaya, 201434
Figura 18. Superficies obtenidas mediante interpolación por vecindad. Fuente: Olaya, 2014 35
Figura 19. Superficies obtenidas mediante interpolación por ponderación por distancia. Fuente: Olaya, 2014
Figura 20. Superficies obtenidas mediante interpolación por ajuste polinómico de segundo (a) y quinto (b) grado. Fuente: Olaya, 2014

Figura 21. Superficies obtenidas mediante interpolación por curvas adaptativas Fuente: Olaya, 2014
Figura 22. Superficies obtenidas mediante interpolación por kriging. Fuente: Olaya, 2014 38
Figura 23. Esquema metodológico
Figura 24. Hoja de perforación de la empresa Ingeotec S.A. Fuente: Ingeotec. S.A
Figura 25. Proceso de formación de rocas y suelos Fuente: Vargas, 2010
Figura 26. Nivel freático Fuente: Vargas, 2010
Figura 27. Nivel freático colgado Fuente: Vargas, 201055
Figura 28. Nivel freático en condición artesiana o cautiva Fuente: Hidro Ambiente, 202056
Figura 29. Mapa de órdenes de suelos en la GAM60
Figura 30. Mapa de formaciones geológicas en la GAM66
Figura 31. Descripción geológica en la GAM67
Figura 32. Mapa de composiciones geológicas en la GAM
Figura 33. Mapa de edades geológicas en la GAM69
Figura 34. Geomorfología de la GAM74
Figura 35. Requisitos para estudios geotécnicos
Figura 36. Hoja de perforación de la empresa Ingeotec S.A
Figura 37. Muestra de la base de datos realizada
Figura 38. Distribución espacial de los estudios geotécnicos en la GAM
Figura 39. Cantidad de datos por cantón para realizar el mapa de espesor de suelo86
Figura 40. Distribución espacial de los datos utilizados para elaborar el mapa de espesor de suelo
Figura 41. Mapa de espesor de suelo
Figura 42. Cantidad de datos por cantón para realizar el mapa de consistencia del suelo de 0 a 2 m

Figura 43. Distribución espacial de los datos utilizados para elaborar el mapa de consistencia del suelo en un estrato de 0 a 2 m
Figura 44. Mapa de consistencia del suelo en la GAM (espesor de 0 a 2 m de profundidad) . 92
Figura 45. Cantidad de datos por cantón para realizar el mapa de consistencia del suelo de 2 a 5 m
Figura 46. Distribución espacial de los datos utilizados para elaborar el mapa de consistencia del suelo en un estrato de 2 a 5 m
Figura 47. Mapa de consistencia del suelo en la GAM (espesor de 2 a 5 m de profundidad) . 95
Figura 48. Cantidad de datos por cantón para realizar el mapa de consistencia del suelo de 5 o más metros
Figura 49. Distribución espacial de los datos utilizados para elaborar el mapa de consistencia del suelo en un estrato de 5 o más metros
Figura 50. Mapa de consistencia del suelo en la GAM (espesor de 5 o más metros de profundidad)
Figura 51. Cantidad de datos por cantón para realizar el mapa de tipo del suelo
Figura 52. Distribución espacial de los suelos clasificados como limos
Figura 53. Distribución espacial de los suelos clasificados como limos colapsables 101
Figura 54. Distribución espacial de los suelos clasificados como arcillas
Figura 55. Distribución espacial de los suelos clasificados como arcillas expansivas 103
Figura 56. Mapa de tipo de suelo
Figura 57. Cantidad de datos por cantón para realizar el mapa de nivel freático en la época seca
Figura 58. Cantidad de datos por cantón para realizar el mapa de nivel freático en la época lluviosa
Figura 59. Distribución espacial de los datos utilizados para elaborar el mapa de nivel freático en la época seca

Figura 60. Distribución espacial de los datos utilizados para elaborar el mapa de nivel freático
en la época lluviosa
Figura 61. Mapa del nivel freático en la época seca
Figura 62. Mapa del nivel freático en la época lluviosa110
Figura 63. Mapa del nivel freático en la época seca (división por cauces)111
Figura 64. Mapa del nivel freático en la época lluviosa (división por cauces)112
Figura A 1. Mapa de órdenes de suelos de Costa Rica Fuente: Centro de Investigaciones
Agronómicas (CIA), 2010139
Figura A 2. Zonificación Sísmica Fuente: Código Sísmico de Costa Rica, 2010140
Figura A 3. Mapa de Zonificación Geotécnica Fuente: Bogantes, 1999141
Figura A 4. Mapa geológico de la Gran Área Metropolitana Fuente: Deyner et al., 1993
Modificado por: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, 2001 144
Figura A 5. Propiedades típicas de arcillas expansivas y limos de baja resistencia. Fuente:
Código de Cimentaciones de Costa Rica, 2009145

Índice de cuadros

Cuadro 1. Mapas aplicados a la ingeniería civil	24
Cuadro 2. Clasificación de los mapas geotécnicos	25
Cuadro 3. Elementos básicos de un mapa geotécnico	26
Cuadro 4. Minerales presentes en las rocas y suelos	52
Cuadro 5. Minerales presentes en las rocas y suelos (continuación)	53
Cuadro 6. Minerales presentes en los suelos arcillosos	53
Cuadro 7. Minerales presentes en los suelos arcillosos (continuación)	54
Cuadro 8. Valores típicos del coeficiente de permeabilidad de los suelos naturales	56
Cuadro 9. Extensión aproximada de los órdenes de suelos en Costa Rica	57
Cuadro 10. Propiedades de los suelos Inceptisoles	57
Cuadro 11. Propiedades de los suelos Ultisoles y Alfisoles	58
Cuadro 12. Propiedades de los suelos Andisoles	58
Cuadro 13. Propiedades de los suelos Entisoles	59
Cuadro 14. Propiedades de los suelos Vertisoles	59
Cuadro 15. Unidades y subunidades geomorfológicas presentes en la GAM	71
Cuadro 16. Unidades y subunidades geomorfológicas presentes en la GAM (continuación)	72
Cuadro 17. Unidades y subunidades geomorfológicas presentes en la GAM (continuación)	73
Cuadro 18. Composición de la base de datos	77
Cuadro 19. Composición de la base de datos (continuación)	78
Cuadro 20. Correlación aproximada entre IC, N y qu	82
Cuadro 21. Consistencia de los suelos cohesivos	82
Cuadro 22. Clasificación del potencial de expansión de las arcillas	83
Cuadro 23. Espesor de suelo por cantón	114
Cuadro 24. Espesor de suelo por cantón (continuación)	115

Cuadro 25. Consistencia o resistencia al ensayo SPT por cantón	118
Cuadro 26. Consistencia o resistencia al ensayo SPT por cantón (continuación)	119
Cuadro 27. Tipo de suelo por cantón	122
Cuadro 28. Profundidad del nivel freático por cantón según los mapas resultantes	126
Cuadro 29. Profundidad del nivel freático por cantón según los mapas resultar	ntes
(continuación)	127

Índice de símbolos y abreviaturas

<u>Simbolos</u>

- 1. w= contenido de humedad natural
- 2. PA: presión atmosfériica

Abrebiaturas

- 3. AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials
- 4. CCCR: Código de Ciemntaciones de Costa Rica
- 5. CSCR: Código Sísmico de Costa Rica
- 6. CL: arcilla de baja plasticidad
- 7. CH: arcilla de alta plasticidad
- 8. GAM: Gran Área Metropolitana
- 9. IFAM: Instituto de Fomento y Asesoría Municipal
- 10. INVU: Instituto Nacional de Vvivienda y Urbanismo
- 11. LL: límite líquido
- 12. LP: límite plástico
- 13. IP: índice de plasticidad
- 14. ML: limo de baja plasticidad
- 15. MH: limo de alta plasticidad
- 16. NSPT: Resistencia a la penetración estándar
- 17. N15-30: Número de golpes en el intervalo de profundidad de 15 cm a 30 cm
- 18. N30-45: Número de golpes en el intervalo de profundidad de 30 cm a 45 cm
- 19. SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

XV

Ureña Bruns, Maria Paula

Propuesta de una Nueva Zonificación Geotécnica de los Suelos de la Gran Área Metropolitana

de Costa Rica

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José. C.R.:

M. Ureña B., 2021

X, 124, [5]; ils. col. – 48 refs.

Resumen

El Código de Cimentaciones de Costa Rica cuenta con una zonificación geotécnica realizada por

Bogantes (1999) en la cual se indica la presencia de tipos de suelos. El presente trabajo

propone una nueva zonificación geotécnica con el objetivo ampliar y complementar la realizada

por Bogantes, a lo largo del territorio de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica.

Para la elaboración de los nuevos mapas se realizó una base de datos compuesta de datos

recolectados de estudios geotécnicos, como el Ensayo de Penetración Estándar (SPT), Límites

de Atterberg y Humedad Natural, realizado por la empresa Ingeotec S.A. En total se recopiló

la información de 938 proyectos y se analizó la información de 2180 perforaciones, donde la

profundidad máxima alcanzada fue 16 m. Una vez recolectada la información se

georreferenciaron los datos por medio del Sistema de Información Geográficos QGIS, misma

herramienta utilizada para realizar las interpolaciones para generar los mapas geotécnicos.

Se generaron mapas de espesor de suelo, consistencia del suelo, mapa de tipo de suelo y

mapas de nivel freático en época seca y época lluviosa. Se determinó que la zona noreste de

la GAM (Alajuela, los cantones de la provincia de Heredia, Moravia, Coronado, Goicochea,

Montes de Oca, Curridabat, La Unión y hacía el norte de Cartago) se tiene presencia de limos

y limos colapsables con consistencia de media a blanda, mientras que en la zona suroeste (sur

de Alajuela, Santa Ana, Escazú, Alajuelita, Aserrí, Desamparados y al sur de Cartago)

predominan las arcillas y arcillas expansivas, tal y como se conoce de la zonificación existente.

Conceptos claves o descriptores: zonificación geotécnica, mapas geotécnicos, Gran área

Metropolitana, arcillas expansivas, limos colapsables.

Ing. Marco Valverde Mora,

M.Sc. Escuela de Ingeniería Civil

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

1.1.1. Problema específico

Actualmente el Código de Cimentaciones de Costa Rica utiliza la zonificación geotécnica, propuesta por el Ing. Roy Bogantes Gonzáles en el año 1999, en su proyecto final de graduación para optar por el título de licenciatura en ingeniería civil, cuya área de estudio se extiende a lo largo de 556 km² de la Gran Área Metropolitana (GAM), un 33% de la extensión actual. Sin embargo, según el Plan Nacional de Desarrollo Urbano para la Gran Área Metropolitana publicado en el año 2013, la GAM comprende 1696 km² del territorio costarricense, es decir, la zonificación actual deja por fuera 1140 km² (77%). Al estar esta zona altamente poblada, resulta muy importante expandir la zonificación geotécnica a una mayor área de la GAM debido al crecimiento urbano y el desarrollo de infraestructura a lo largo de la misma.

Una limitación de la zonificación actual de la GAM es que en la zona alrededor de la ciudad de Alajuela se contaba con poca información de estudios geotécnicos, por lo que se requiere recopilar más información de la zona y verificar los resultados. Además, es necesario comprobar los resultados de toda la zonificación en general y actualizarla, ya que la realizada por Bogantes es la primera y única propuesta del tema a la fecha.

Finalmente, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han evolucionado en capacidad gráfica, almacenamiento de datos y entrada de datos, por lo que es necesario realizar nuevos mapas geotécnicos con mayor definición y a menor escala.

1.1.2. Importancia

La necesidad de elaborar mapas geotécnicos nació en 1998 en una encuesta realizada, donde la mayoría de los consultados opinó que el Código de Cimentaciones de Costa Rica necesita incluir una zonificación geotécnica con el fin de complementar las especificaciones geotécnicas que presenta el Código (Herrera, 1998). Además, indica que la investigación que realizó tuvo como objetivo generar un Mapa de Zonificación Geotécnica del Área Metropolitana, a nivel de propuesta y que sería el primer paso para realizar trabajos similares en otras zonas del país. A

pesar de que existe una primera propuesta de zonificación geotécnica, es de gran aporte para la geotecnia en Costa Rica una verificación, actualización y expansión de esta; sobre todo considerando que desde el año 1999 a la fecha, ha habido una gran expansión del área urbanizada, al irse habilitando para su desarrollo, zonas que en ese momento solamente tenían poco potencial de desarrollo debido a la menor demanda del momento.

Es claro entonces, que la Gran Área Metropolitana se ha expandido y con ella los proyectos de ingeniería. Hoy en día es necesaria una nueva zonificación geotécnica que cubra al menos toda el área donde se construyen la mayor cantidad de obras ingenieriles. Los mapas geotécnicos brindan a los profesionales en ingeniería y arquitectura, el conocimiento acerca de los suelos donde construirán sus obras, basado en el criterio del experto. Los mismos alertan sobre los posibles problemas geotécnicos relacionados con el medio soportante y pueden ser utilizados en la etapa preliminar de un proyecto de ingeniería con el fin de prevenir daños en las edificaciones y prevenir posibles sobrecostos asociados con materiales que pueden requerir soluciones de cimentación especiales. Conocer propiedades geotécnicas de los suelos en la etapa previa a un proyecto ingenieril puede determinar si el sitio donde se desarrollará es factible o no para la construcción del proyecto.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) nacieron a principios de los años sesenta y así el interés por la información geográfica y su estudio, lo que dio como nacimiento a la era informática (Olaya, 2014). Los SIG han evolucionado y han nacido disciplinas que impulsan su crecimiento y desarrollo. Cabe destacar que, la herramienta a utilizar (QGIS) es de uso libre, no tiene un costo de licencia, es de gran importancia demostrar la capacidad que tiene un programa gratuito para realizar diferentes proyectos ingenieriles.

1.1.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema

Previo al trabajo final de graduación de Bogantes, se realizaron diferentes intentos para elaborar mapas con fines geotécnicos, sin embargo, ninguno de estos se acerca a lo realizado en la Zonificación Geotécnica actual del Área Metropolitana (1999), principalmente por la escasez de recursos tecnológicos o el objetivo mismo del proyecto.

Dentro de los acercamientos a las zonificaciones geotécnicas previo a 1999 se tiene:

 Zonificación Preliminar del Área Metropolitana: desarrollada por el Ing. Luis Quirós en el año 1986, representa cartográficamente aspectos geotécnicos como el ensayo de penetración estándar, presencia de arcillas expansivas y estratigrafías típicas. Bogantes

- (1999) señala que los mapas resultantes no fueron apropiados para la escala de trabajo utilizada, debido a esto, eran difíciles de leer, además, el trabajo realizado no contaba con los recursos tecnológicos necesarios.
- Caracterización Geotécnica de las Áreas de Reserva Habitacional dentro del Gran Área Metropolitana: elaborada por el Ing. Juan Carlos Vindas en el año 1988, consiste en una caracterización de los suelos de las áreas definidas como reserva habitacional por el INVU. Fue elaborada con ayuda de un técnico de laboratorio, el cual caracterizaba visualmente los estratos más superficiales del suelo. Los resultados de trabajo no fueron suficientes para zonificar, debido a las pocas visitas de campo en comparación con el área total de la zona estudiada.
- Lineamientos Generales para la Elaboración de las Cartas de Zonificación de Costa Rica: en 1995 el Ing. Jorge Bruno Arguedas elabora un documento que establece pautas generales a seguir para realizar una zonificación geotécnica y recomienda tipos de mapas adecuados para nuestro país. Este es el primer trabajo geotécnico que utiliza los sistemas de información geográfica, destacando la importancia de estos.

En 1999, Bogantes publicó la "Propuesta de Zonificación Geotécnica de la Área Metropolitana", como se ha mencionado antes, la cual presenta una metodología y el procedimiento para realizar mapas geotécnicos con ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Tiene como objetivo generar el mapa de zonificación geotécnica del Área Metropolitana, a nivel de propuesta, y pretende ser el primer paso para trabajos en esa misma línea. El área de estudio comprende 556 km² y fue realizado con información recopilada de estudios geotécnicos existentes y pozos profundos para producción de agua potable. Para esta zonificación no se realizaron estudios geotécnicos propios para la investigación. Los mapas realizados brindan información de las características de los suelos y de los problemas que pueden presentarse en las distintas zonas. Dentro de los mapas temáticos elaborados están:

- i. Mapa de espesores del suelo del Área Metropolitana.
- ii. Mapa de profundidad de nivel freático.
- iii. Mapa de características del suelo.
- iv. Mapas de incidencia de problemas geotécnicos (mapa de arcillas expansivas, mapas de suelos blandos y limos colapsables).
- v. Propuesta de zonificación geotécnica que cuenta con 33 zonas de diferentes suelos.

Posterior al trabajo de Bogantes se han desarrollado diferentes proyectos y mapas relacionados con los sistemas de información geográfica y caracterización de la GAM, dentro de estos están:

- Plan Regional Urbano de la Gran Área Metropolitana (Plan PRUGAM 2008-2030): consiste en un plan para mejorar la calidad de vida y el desarrollo urbano en la Gran Área Metropolitana, abarcando aspectos de vialidad, transporte, infraestructura y redes, urbanismo, urbano ambiental, entre otros aspectos. Además, el plan cuenta con un atlas cartográfico, el cual contiene un conjunto de mapas que ilustra aspectos técnicos necesarios para el proceso de planificación y ordenamiento territorial (PRUGAM, 2008). Dentro de los mapas y zonificaciones de la GAM que se encuentran en este atlas están: zonificación territorial de la GAM (uso de suelo considerando áreas agrícolas, pecuarias, forestales y de desarrollo urbano), clasificación del suelo (suelo urbano consolidado, suelo urbano no consolidado, suelo urbanizable, suelo no urbanizable y suelo rural), gestión del riesgo y peligros naturales de la GAM, uso de suelo, rellenos sanitarios y botaderos clandestinos, entre otros mapas. Estas zonificaciones son de importancia para determinar cuáles son las áreas con mayor crecimiento urbano de la GAM, donde se desarrollarán proyectos ingenieriles y van a requerir el conocimiento de las condiciones geotécnicas de las zonas. Más adelante se analizará la importancia de algunos mapas en específico para la zonificación geotécnica desarrollada en este trabajo final de graduación.
- Atlas de Costa Rica: en los últimos 20 años se ha elaborado un atlas con información geográfica general del país que tiene como objetico adaptar la información cartográfica a los avances de la cartografía digital. El primer atlas digital fue lanzado en el año 2000 y se ha actualizado los años 2004, 2008 y 2014, todos publicados por el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Todas las capas en el atlas están en el sistema CRTM05 y en formato "shape" o "grid", algunas de las temáticas de estas capas son: geología, geomorfología, uso de suelo, zonas de vida, red de caminos, cuencas, órdenes y subórdenes de suelo, entre otras. Algunas de las capas son de importancia para conocer aspectos como la caracterización geológica y la taxonomía de los suelos en la zona de estudio, todas están cubren por completo el territorio nacional.
- Sistema Nacional de Información Territorial: este sistema del Instituto Nacional Geográfico de Costa Rica ofrece mapas en la web tipo ráster y vectorial que pueden ser

visualizados con un Sistema de Información Geográfica (SIG). Contiene diferentes nodos locales y externos con capas como hojas cartográficas, hojas topográficas, curvas de nivel, capas de amenazas de la Comisión Nacional de Emergencia (CNE), limites cantonales y distritales, entre otros.

• En el año 2009 se celebró en Costa Rica el XVIII Congreso Latinoamericano de las Ciencias del Suelo, donde se propuso realizar una base de datos digital y digitalizar los mapas de órdenes de los suelos existentes. A partir del 2012 un grupo conformado por representantes de la Universidad de Costa Rica, Asociación Costarricense de las Ciencias del Suelo y del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuario del Ministerio de Agricultura y Ganadería empezaron a trabajar en la digitalización de la información. Un año después, se publicó el nuevo mapa de órdenes y subórdenes de suelos de Costa Rica a una escala 1: 200.000 y la base de datos con 450 perfiles de suelos de Costa Rica. En la Figura A 1, en los anexos, se muestra el mapa de órdenes suelos realizado. Por la índole misma de estos mapas, no son de aplicación directa para la ingeniería geotécnica y pueden ser usados, aunque con un carácter más bien informativo general, pues se basa en aspectos agronómicos.

Adicionalmente, se desarrolló una zonificación geotécnica con una menor área de análisis, pero con objetivos similares al del presente trabajo final de graduación, la cual se describe continuación:

Zonificación y caracterización geotécnica de los suelos de la sede central del Instituto Tecnológico de Costa Rica: en el 2017 el Ing. Daniel Emilio Masís Flores recolectó estudios geotécnicos de las edificaciones construidas en la sede del TEC en la ciudad de Cartago, formando una base de datos con pruebas de campo y laboratorio como SPT, granulometría, Límites de Atterberg y contenidos de humedad. Masís desarrolló mapas de clasificación y capacidad admisible de los suelos a diferentes profundidades. La herramienta utilizada para realizar los mapas fue ArcGis 10.3.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Elaborar una nueva propuesta de zonificación geotécnica de los suelos de La Gran Área Metropolitana, de acuerdo con la delimitación geográfica y los límites establecidos en el Plan GAM 2013.

1.2.2. Objetivos específicos

- Recopilar estudios geotécnicos realizados a lo largo de la Gran Área Metropolitana.
- Crear una base de datos georreferenciada con propiedades geotécnicas basada en estudios geotécnicos realizados a lo largo de la GAM.
- Generar mapas de espesores de suelo, consistencia del ensayo SPT, tipo de suelo y nivel freático que cubran el área de la delimitación de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica del Plan GAM 2013.
- Determinar las zonas en la GAM con presencia de suelos blandos.
- Identificar las zonas en la GAM con presencia de suelos problemáticos, como arcillas expansivas y limos colapsables.
- Definir las zonas en la GAM con profundidad del nivel freático superficial.
- Comparar y validar los resultados del proyecto con los presentados por Bogantes en su zonificación Geotécnica para el Área Metropolitana de 1999.

1.3. Marco teórico e hipótesis

1.3.1. Condiciones generales del área en estudio (Gran Área Metropolitana)

1.3.1.1. Expansión de la GAM

A raíz de la creación del Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismos (INVU), en 1954, y la publicación de la Ley de Planificación Urbana 4240 en 1968, inicia el periodo más reciente del ordenamiento territorial en Costa Rica, con los primeros Planes Reguladores y el Plan GAM 1982, el cual delimitó un anillo de contención urbana (PRUGAM, 2008). A partir del año 2000 se crea el Consejo Nacional de Planificación Urbana (CNPU) con el fin de elaborar el Plan Nacional de Desarrollo Urbano, el cual se planteó en diferentes etapas. Las Fases I y II, plantean una visión y un modelo de desarrollo con una propuesta para el desarrollo urbano en la GAM; mientras que la Fase IIIA, corresponde a la creación del Proyecto de Planificación Regional y Urbana del Valle Central o proyecto PRUGAM, el cual pretende actualizar el Plan GAM del 82 y elaborar o actualizar los Planes Reguladores de los 31 cantones que contiene actualmente la Gran área Metropolitana.

La Gran área Metropolitana es la región con mayor desarrollo, población y que concentra la mayoría de las actividades económicas del país, fue creada como un instrumento legal para la regulación el desarrollo y crecimiento urbano en el Valle Central, el cual obedece un patrón de expansión horizontal (Arias, 2012). Actualmente cuenta con una extensión de 1967 km², con un anillo de contención urbana de 442 km² (Consejo Nacional de Planificación Urbana, 2013). Está conformada por 164 distritos de 31 cantones, distribuidos en las provincias de San José, Alajuela, Cartago y Heredia. En la Figura 1 se muestra la extensión de la Gran Área Metropolitana y los cantones que la componen, esta será la región considerada para la presente zonificación.

La GAM ha sufrido una expansión urbana significativa, la cual se debe al crecimiento poblacional, la disponibilidad de infraestructura, las regulaciones locales, el aumento de la economía, entre otros aspectos. En la Figura 2 se muestra el crecimiento urbano que ha sufrido la GAM del año 1986 al 2005, de este se observa que el cantón de San José es el más urbanizado de la zona, seguido por las regiones centrales de Alajuela, Heredia y Cartago. Además, se observa que las unas expansiones hacia las zonas externas de la GAM, por ejemplo, hacía el cantón de Atenas, Poás, Alajuela, Santa Bárbara, Barva, entre otros.

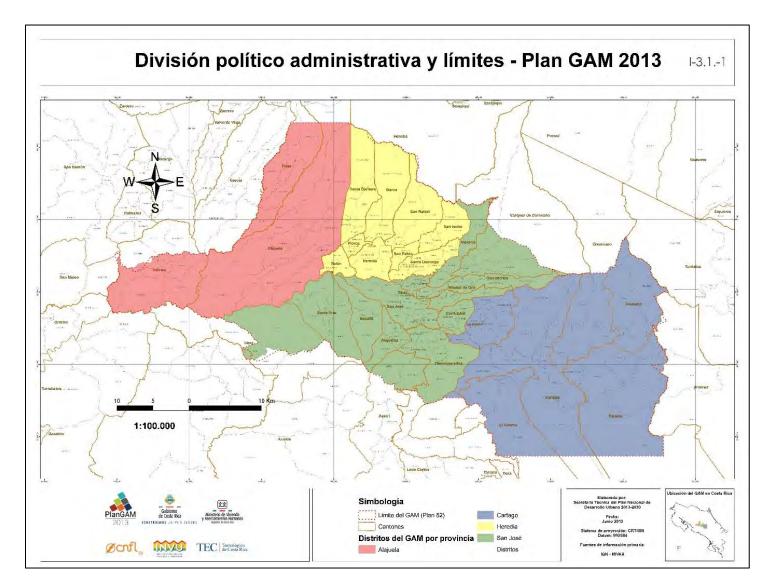


Figura 1. División político-administrativa y límites de la GAM Fuente: Consejo Nacional de Planificación Urbana, 2013

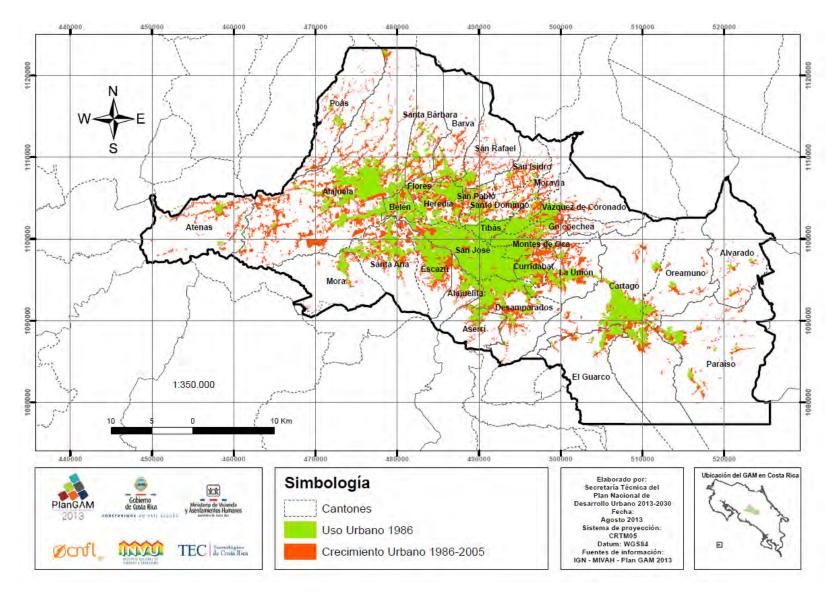


Figura 2. Crecimiento urbano en la GAM Fuente: Consejo Nacional de Planificación Urbana, 2013

En la Figura 3 se muestra, de manera gráfica, el crecimiento poblacional esperado en el periodo 2015-2030 en la GAM, donde el cantón de Desamparados será el que presente mayor incremento poblacional, seguido de Alajuelita, San José, Heredia y Alajuela.

Por otro lado, en la Figura 4 se muestra el uso de suelo en la GAM, al igual que en los mapas anteriores, se observa que en la zona central de San José, Alajuela, Heredia y Cartago, hay un alto nivel de urbanización y densidad poblacional (color café oscuro), además, se aprecia que, en las zonas más externas de la GAM, mayoritariamente se tienen bosques (primarios y secundarios), principalmente en los cantones de Atenas, Mora, la zona norte de Poás, Santa Bárbara, Barva, Moravia, al sur del Guarco, Cartago, entre otros. Mientras que, en las zonas de Alvarado, al sur de Oreamuno y Coronado se tienen cultivos y zonas con pastos. Como se observará más adelante, en la descripción de la base de datos realizada, estas regiones mencionadas presentan una menor cantidad de estudios geotécnicos, ya que la construcción de infraestructura es menor, comparada con el centro de la GAM.

El crecimiento urbano y poblacional de la GAM genera un aumento en la necesidad de infraestructura, esta es una de las razones por la cual es necesario ampliar la zonificación geotécnica realizada por Bogantes (1999), la cual cubre un 556 km², un poco menos de la tercera parte del área de cobertura de la GAM actual.

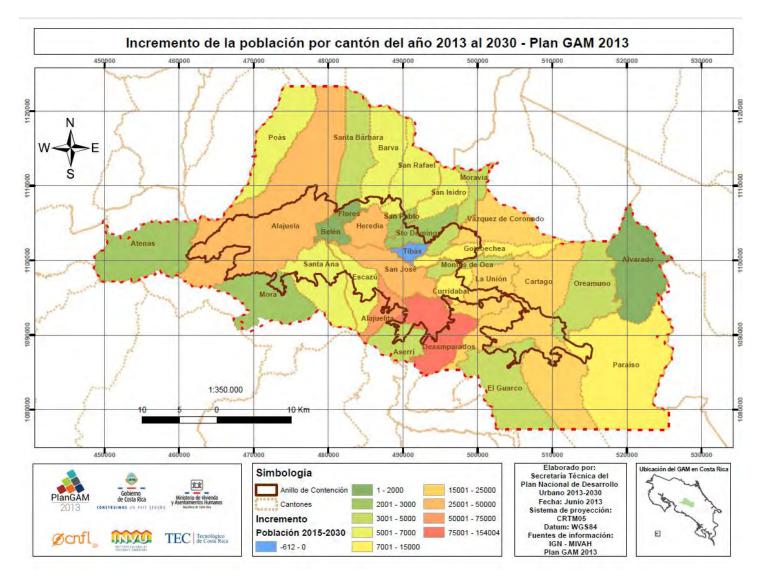


Figura 3. Incremento poblacional 2015-2030 por cantón de la GAM Fuente: Consejo Nacional de Planificación Urbana, 2013

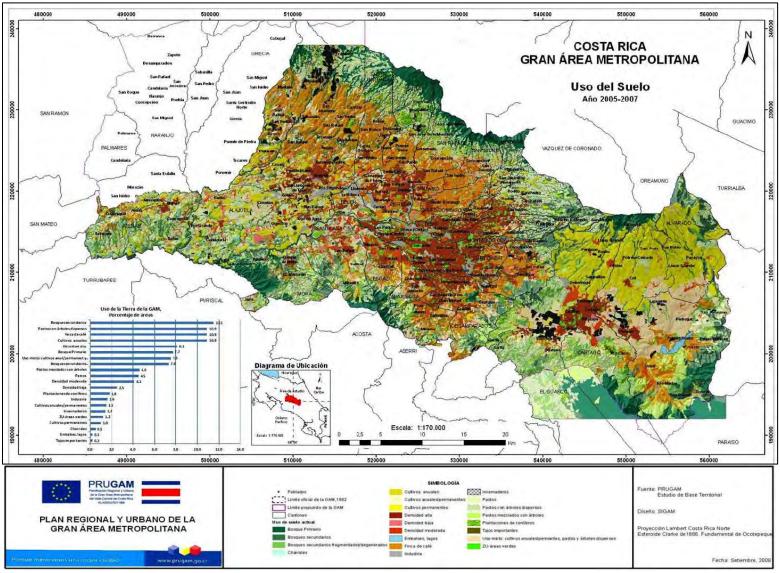


Figura 4. Uso de suelo en la GAM Fuente: Ministerio de Vivienda, 2008

1.3.1.2. Caracterización climática de la GAM

Costa Rica se divide en 7 regiones climáticas, cada una con sus respectivas subregiones, según sus características físico-geográficas. Para la caracterización climática del área de estudio, se utilizará la división mencionada, la cual fue realizada por Solano y Villalobos (2001), de la mano con el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), la cual se basa en la temperatura media anual, precipitación media anual y régimen de lluvia anual. Las 7 regiones en las cuales se divide nuestro país son: Pacífico Norte, Pacífico Central, Pacífico Sur, Montañosa del Sur, Zona Norte, Atlántica y Valle Central, las cuales se muestran en la Figura 5. Debido a la ubicación del área que abarca la presente zonificación geotécnica, se analizará únicamente la región Valle Central, con sus respectivas subregiones.

El clima de la región Valle Central está afectado por la Zona de Confluencia Intertropical y vientos ecuatoriales del Pacífico y vientos alisios del Caribe, lo que da como resultado un clima variado. Según Solano y Villalobos (2001), está compuesta por 3 subregiones climáticas (Figura 6):

- Valle Central Occidental VC1: Limita con el Alto del Ochomogo al este, Los Montes del Aguacate al oeste, Cordillera Volcánica Central al norte y con Cerros del Tablazo, Candelaria y Puriscal al sur Está compuesta por el Bosque Húmedo Tropical, el cual posee temperaturas entre 17° C y 24°C, y se puede encontrar en la parte sur de Heredia, Alajuela y al sureste del Valle Central, además del Bosque Muy húmedo Subtropical, con el mismo rango de temperaturas que el anterior, este se encuentra en la parte este de la región, cerca de Curridabat, Tres Ríos, Guadalupe y Moravia. En esta subregión se pueden encontrar climas de sequía, en el sector de Atenas, y de meseta central, en el resto. La precipitación anual media en esta subregión ronda entre los 1500 mm y 3000 mm, incluso menos, mientras que la temperatura anual media entre 22° C a 28° C.
- Valle Central Oriental VC2: Comprende los Valles de El Guarco y de Ujarrás, al norte limita con el macizo del Irazú y al sur con la Cordillera de Talamanca. Está compuesta también por los bosques Húmedo Subtropical (al sur de Cartago y Tejar del Guarco) y Muy Húmedo Subtropical (parte este de Cartago hasta Juan Viñas), además del Bosque Húmedo Montano Bajo, el cual se caracteriza por humedades altas y presencia de neblina, con temperaturas entre 12° C a 17° C, es posible encontrarlo al norte de Oreamuno y alrededores. En esta subregión se puede encontrar clima de meseta en su

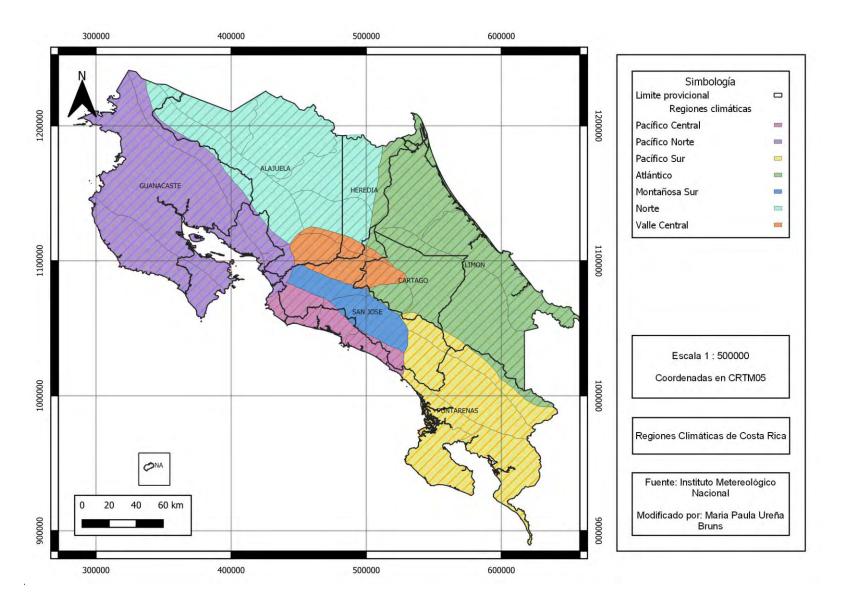


Figura 5. Regiones climáticas del Costa Rica

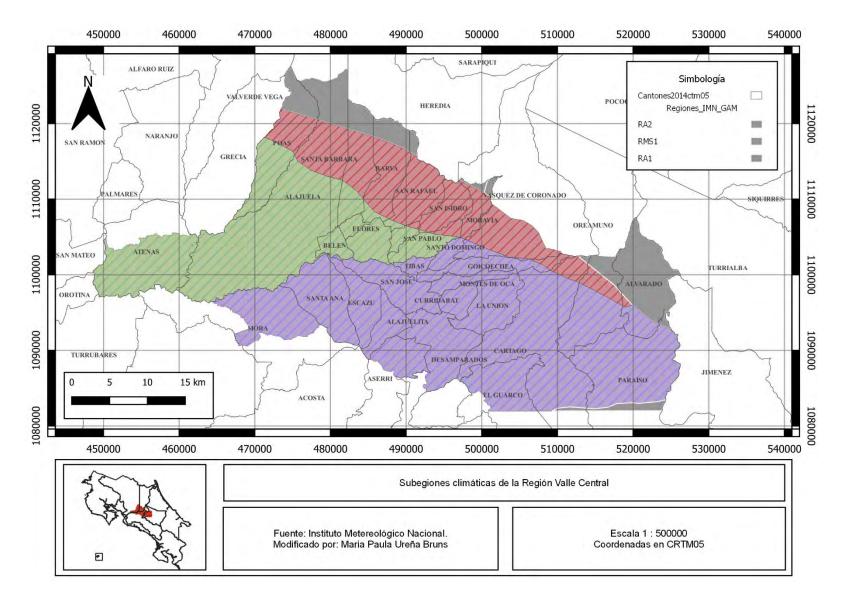


Figura 6. Subregiones climáticas del Valle Central

- totalidad. La precipitación anual media en esta subregión ronda entre los 1500 mm y 3000 mm, mientras que la temperatura anual media entre 16° C a 22° C.
- Faldas de la Cordillera Volcánica Central VC3: Comprende desde Tapesco o Zarcero hasta Rancho Redondo, está compuesta por el Bosque Muy Húmedo Montano Bajo, el cual se caracteriza por temperaturas entre 12° C y 17° C, además de la presencia de neblina y alta humedad, este se puede encontrar desde Zarcero hasta Pacayas. En esta subregión se puede encontrar clima seco de altura (al norte de Heredia, como Monte de la Cruz y Santa Bárbara, y al norte de Alajuela, como Fraijanes y Bajos del Toro) y clima lluvioso de altura en Coronado, Oreamuno y Tierra Blanca. La precipitación anual media en esta subregión ronda entre los 3000 mm y 5000 mm, mientras que la temperatura anual media entre 8° C a 18° C.

En la Figura 7 y Figura 8, se muestra la precipitación media anual y temperatura media anual, respectivamente, en la GAM.

1.3.1.3. Relieve en la GAM

La Gran área Metropolitana presenta una variación importante en la elevación de su relieve, el cual va desde los 200 msnm hasta los 3400 msnm. Los cantones de menor elevación corresponden a Atenas, Mora, el sur de Alajuela, al norte de Santa Ana y Belén, donde los niveles van desde los 200 hasta los 900 msnm. Gran parte de los cantones de San José presentan elevaciones entre 900 y 1400, además, la zona sur de la provincia de Heredia, el norte del cantón de Alajuela, el centro de Cartago y gran parte de Paraíso, presentan las mismas elevaciones. Al sur de San José se pueden encontrar zonas montañosas con elevaciones desde 1800 a 2400 msnm, como en los cantones de Escazú, Alajuelita y Aserrí, lo mismo al este de San José en Coronado, Goicochea y Montes de Oca. Otra zona montañosa con elevaciones importantes (desde 1400 a 3400 msnm) se encuentra al norte de los cantones de Alajuela, Santa Bárbara, Barva, San Rafael y San Isidro. Por último, en Cartago se tiene las mayores elevaciones en la GAM y el relieve más pronunciado, principalmente en Alvarado, Oreamuno y al norte de Cartago, donde las elevaciones llegan hasta los 3400 msnm, mientras que, en El Guarco y la zona sur de Cartago, llegan hasta 2400 msnm.

En la Figura 9 se muestra la variación de elevaciones en la GAM

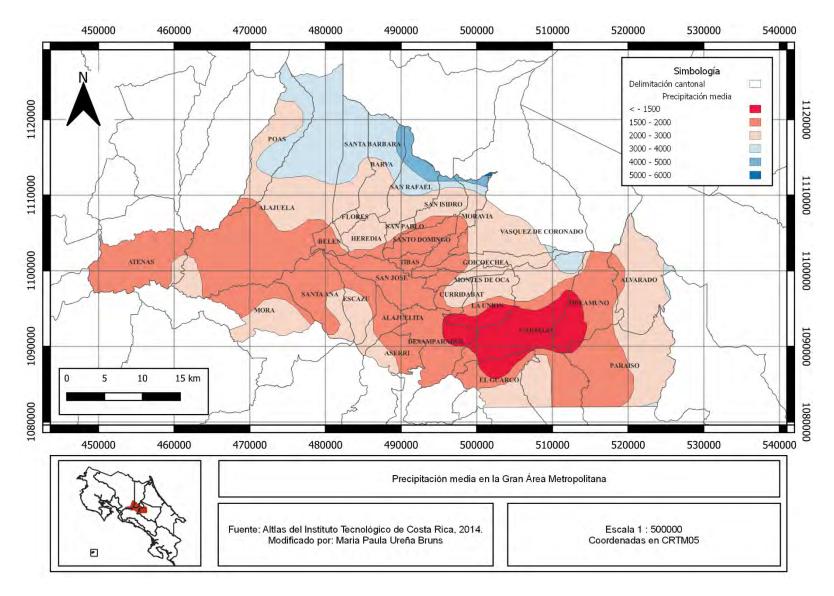


Figura 7. Precipitación media en la Gran área Metropolitana

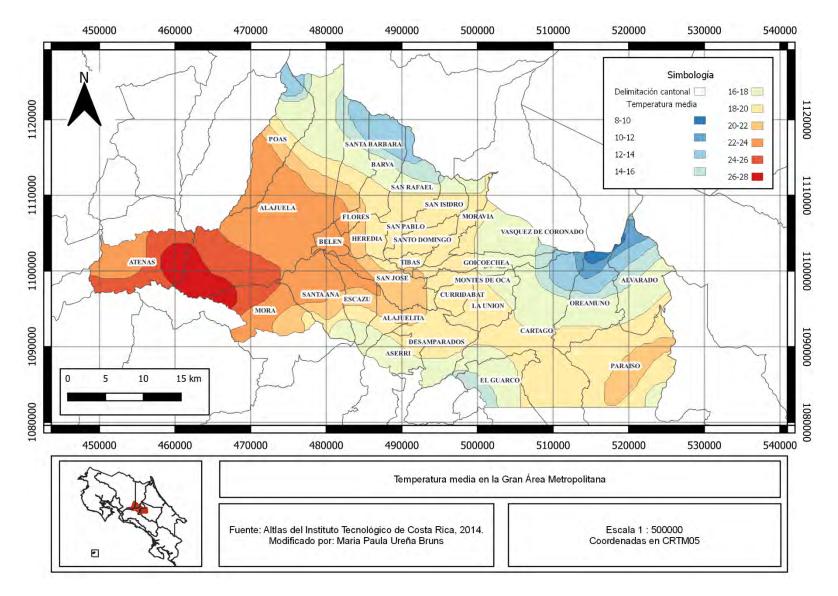


Figura 8. Temperatura media en la Gran área Metropolitana

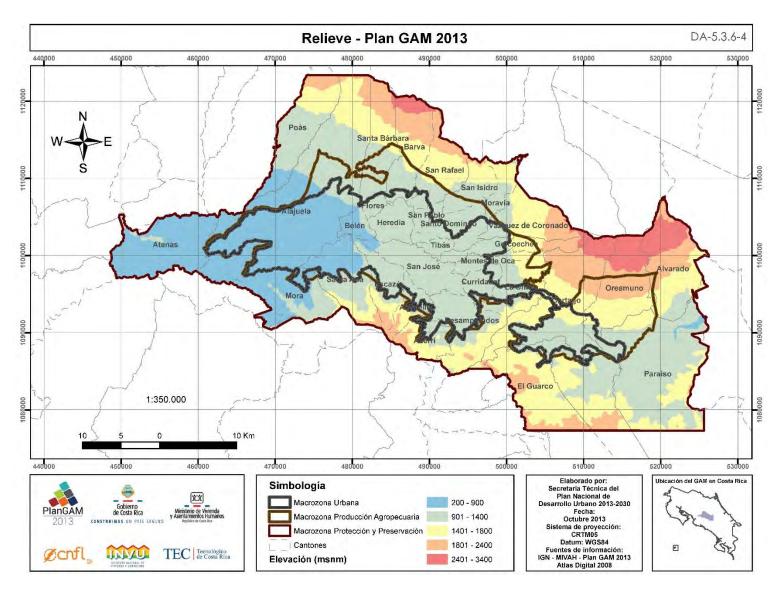


Figura 9. Relieve de la GAM Fuente: Plan GAM 2013

1.3.2. Ensayos de campo y laboratorio

Los ensayos geotécnicos, de campo o de laboratorio, permiten determinar propiedades físicas y mecánicas de los suelos, por ejemplo:

- La estratigrafía mediante el ensayo de penetración estándar
- La plasticidad mediante los límites de Atterberg.
- Clasificación del suelo, ya sea por el Sistema Unificado de Suelos (SUCS) o por el Sistema de Clasificación de Suelos AASHTO.
- Caracterización granulométrica (distribución de tamaños).
- Contenido de humedad natural.
- Características de resistencia (ensayos de corte directo y compresión triaxial).
- Compresibilidad.

Para la zonificación geotécnica desarrollada en el presente trabajo se utilizará la clasificación de suelos SUCS, humedad natural y resistencia a la penetración estándar para la clasificación de los suelos analizados.

1.3.2.1. Ensayo de penetración estándar

El ensayo de penetración estándar es comúnmente realizado en la exploración geotécnica. Se basa en la norma ASTM D1586, la cual consiste en hincar en el terreno una barra metálica mediante golpes. El procedimiento consiste en dejar caer a 76 cm de altura un martillo de 64 kg sobre la barra metálica que se hincará en el suelo. La cantidad de golpes necesario para penetrar de 15 a 45 cm, definen el número de golpes, relacionado con la resistencia del suelo, según lo que indica la norma, se calcula de la siguiente manera:

$$N_{SPT} = N_{15-30} + N_{30-45} \tag{1}$$

Donde:

N_{SPT}: Resistencia a la penetración estándar

 N_{15-30} : Número de golpes en el intervalo de profundidad de 15 cm a 30 cm N_{30-45} : Número de golpes en el intervalo de profundidad de 30 cm a 45 cm

1.3.2.2. Humedad natural

La humedad de un suelo se define como la relación entre el peso del agua en una masa de suelo, con el peso de las partículas sólidas (Das,2013). Esta propiedad del suelo se determina mediante los parámetros establecidos en la norma ASTM D-2216, en la cual se especifica que

se debe secar la muestra de suelo en un horno a 110 \pm 5 °c, y la diferencia entre pesos se interpreta como el peso del agua.

1.3.2.3. Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se determinan en suelos y finos y se refieren al grado de adhesión entre partículas del suelo, así como la resistencia a deformarse o romperse de un suelo (Das,2013). Estos se basan en el estado del suelo fino según su contenido de agua: sólido cuanto está seco, semisólido, plástico y líquido, donde el punto límite entre dos estados se conocen como límite de contracción, límite plástico (LP) y límite líquido (LL), como se muestra en la siguiente figura.

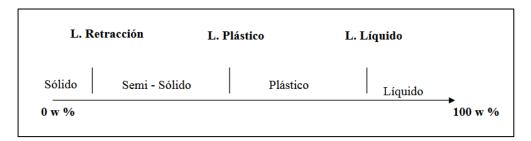


Figura 10. Límites de consistencia del suelo Tomado de: Masís, 2017 Fuente: Villalaz, 2004

El límite líquido se define como el contenido de humedad respecto al peso seco de la muestra, con el que el suelo pasa de estado líquido a plástico. Mientras que, el límite plástico, se define como el contenido de humedad respecto al peso seco de la muestra, para el cual el suelo pasa de un estado semisólido a plástico (Das,2013).

La norma ASTM D-4318 brinda el procedimiento a seguir para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

1.3.2.4. Clasificación SUCS

El sistema de clasificación SUCS fue desarrollado por A. Casagrande en 1942 y modificado en 1952 por él mismo. Este sistema de clasificación se basa en la división de suelos en grano grueso, fino y orgánicos Los suelos de grano grueso se clasifican según su granulometría y los de grano fino por su plasticidad. Para el caso de la clasificación realizada en la nueva propuesta de zonificación geotécnica, se utilizará únicamente la clasificación de suelos finos, ya que se sabe que en la Gran Área Metropolitana se tienen mayoritariamente limos y arcillas (suelos finos).

La nomenclatura de la clasificación de suelos finos es C para arcillas y M para limos, además está, L para baja plasticidad y H para alta plasticidad, lo que da como resultado 4 clasificaciones:

- ML: limo de baja plasticidad.
- MH: limo de alta plasticidad.
- CL: arcilla de baja plasticidad.
- CH: arcilla de alta plasticidad.

Para la clasificación es necesario ubicar en el gráfico mostrado en la Figura 11 el límite líquido e índice de plasticidad obtenidos mediante el ensayo de Límites de Atterberg.

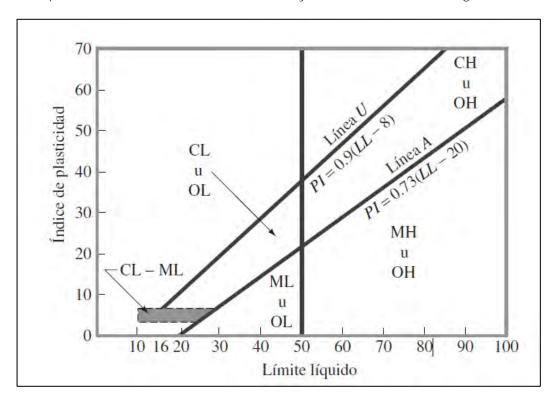


Figura 11. Gráfica de plasticidad Fuente: Das, 2013

1.3.3. Mapas y su aplicación en la ingeniería civil

1.3.3.1. Mapas y sus elementos

Según Alfaro et al. (2016) el mapa es una representación sobre un plano a escala de una parte de la superficie terrestre, que tiene como propósito representar elementos de manera ordenada y clara, además, indican que los elementos básicos de los mapas son los siguientes:

i. Título

El título se concentrar en el tema principal del mapa y debe sobresalir del resto del texto, ser corto y sintético.

ii. Leyenda o simbología

La simbología contiene todos los objetos representados en el mapa, esta debe ordenarse según los símbolos de la siguiente manera: puntos, líneas y polígonos, luego archivos de tipo ráster, por ejemplo, primero se coloca la simbología de la delimitación de la zona en estudio y después de coloca la simbología de colores del mapa.

iii. Escalas: gráfica y numérica

La escala representa una relación entre la magnitud real del terreno y la representada en el mapa, su diseño debe ser sencillo, indicar las unidades de medida (m y km) y mostrar valores enteros múltiplos de 5 ó 10.

iv. Coordenadas geográficas y métricas

Se debe indicar el sistema de coordenadas geográficas utilizado y el sistema de proyección oficial de Costa Rica, además, se deben representar, los extremos norte y sur, este y oeste y las coordenadas medias.

v. Flecha del norte

La flecha de norte es la representación de la dirección de los meridianos que son los que marcan el norte verdadero.

1.3.3.2. Mapas aplicados a la ingeniería civil

A lo largo del tiempo se han desarrollado diferentes mapas de gran importancia para la ingeniería civil, en el Cuadro 1 se muestran algunos de ellos.

Cuadro 1. Mapas aplicados a la ingeniería civil

Мара	Descripción	Aplicaciones	
Mapa topográfico	Contiene información de los accidentes geográficos, tanto naturales como artificiales, del terreno, además, contienen curvas de nivel y detallan el relieve.	Planificación de autopistas, líneas eléctricas y telefónicas o de tuberías, definición de cuencas.	
Mapa geológico	Representan las estructuras geológicas que afloran en la superficie terrestre y las rocas.	Exploración minera y de aguas subterráneas, construcción de obras civiles, ordenamiento territorial y zonas de riesgo.	
Mapa geomorfológico	Simboliza las formas del relieve según su génesis y dinámica en el tiempo.	Construcción de carreteras, canales, presas y embalses, puerto, para la explotación minera y zonas de riesgo.	
Mapa hidrológico	Brinda información del recurso agua.	Se emplean como herramienta en anteproyectos de infraestructuras hidráulicas.	

Fuente: Alfaro et al., 2016

1.3.4. Mapas geotécnicos

1.3.4.1. Definición de mapa geotécnico

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés), define los mapas geotécnicos como "un mapa que proporciona una representación de todos los componentes geológicos necesarios para la planificación urbana y el desarrollo de obras civiles. Por lo general, presentan características como propiedades de las rocas y los suelos (propiedades mecánicas, litología, entre otros), condiciones hidrogeológicas, condiciones geomorfológicas y fenómenos geodinámicos, según sea el propósito del mapa." (UNESCO, 1976)

1.3.4.2. Clasificación de los mapas geotécnicos

Los mapas geotécnicos se pueden clasificar según diferentes parámetros, como su propósito, contenido y escala, en el Cuadro 2 se describen las propiedades mencionadas.

Cuadro 2. Clasificación de los mapas geotécnicos

	Clasificación de lo	s mapas geotécnicos	
Propósito	Contenido	Descripción	Escala
Especial o específico (aspecto geotécnico	Analíticos	Detallan o evalúan condiciones geotécnicas.	Gran escala: menor a 1:10 000
específico)	Completos	Condiciones o zonificaciones geotécnicas.	Escala media: mayor de 1:10000 y menor que
Multipropósito	Auxiliares	Mapas de documentación.	1:100000
(diferentes aspectos geotécnicos)	Complementarios	Geomorfología, geofísica, entre otros.	Pequeña escala: mayor a 1:100000

Fuente: UNESCO, 1976

1.3.4.3. Tipos de mapas geotécnicos

En general, los mapas geotécnicos pueden ser mapas de evaluación geotécnica del terreno o mapas de caracterización geotécnica (Alfaro et al., 2016). Los primeros hacen referencia a mapas cualitativos que brindan información acerca de zonas problemáticas, clasificaciones generales, uso que puede tener el terreno, entre otros. Mientras que los segundos pueden incluir caracterización global del terreno, zonificaciones y cartografía geotécnicas con detalle.

1.3.4.4. Contenido de los mapas geotécnicos

El detalle de la información y la complejidad del mapa geotécnico depende de los siguientes factores (Alfaro et al., 2016):

- La escala y extensión.
- La importancia de los diferentes factores geológico-geotécnicos y sus relaciones.
- La información disponible, datos y representatividad.
- Las técnicas de representación.

La información básica con la que debe contener un mapa geotécnico se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 3. Elementos básicos de un mapa geotécnico

Elementos básicos de un mapa geotécnico	Descripción	
Topografía	Se debe contar con una base topográfica a la escala requerida.	
Clasificación geotécnica de suelos y rocas	Se deben realizar ensayos in situ, ensayos de laboratorio y análisis de muestras para conocer los diferentes parámetros geotécnicos.	
Condiciones hidrogeológicas	Esencial para los mapas geotécnicos utilizados para la planificación urbana y uso del suelo.	
Condiciones geomorfológicas	De gran importancia para conocer la caracterización física del terreno y detectar posibles deslizamientos.	
Fenómenos geodinámicos	Representas los procesos geológicos activos en la actualidad.	

Fuente: UNESCO, 1976

1.3.4.5. Aplicaciones de los mapas geotécnicos

Los mapas geotécnicos pueden presentarse mediante una zonificación, la cual se define como áreas aproximadamente homogéneas según sus propiedades geotécnicas, donde el detalle y el grado de homogeneidad depende de la escala utilizada (UNESCO, 1976). Bogantes (1999) señala algunos tipos de mapas geotécnicos, estos son:

- 1. Planificación urbanística y uso de suelos.
- 2. Movimientos del terreno.
- 3. Riesgos sísmicos.
- 4. Condiciones de cimentación.
- 5. Cavidades y subsistencia.
- 6. Disponibilidad de materiales.

Algunas de las zonificaciones más utilizadas en Costa Rica son: mapa de órdenes (Figura A 1) y subórdenes de suelos de Costa Rica, zonificación sísmica (Figura A 2) presente en el Código Sísmico de Costa Rica (2010), zonificación geotécnica de Costa Rica presente en el Código de

Cimentaciones de Costa Rica 2da. Edición (Figura A 3), mapa geológico de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica (Figura A 4).

Otra zonificaciones o microzonificaciones desarrolladas en trabajos finales de graduación son:

- Zonificación de la amenaza en la Carretera Interamericana Sur por deslizamiento de suelo y roca asociados con Iluvia intensa y sismo, por el Ing. Gerardo Rojas Chacón en el año 2000.
- Zonificación del potencial de licuación de suelos para la zona del Pacífico Central, entre los ríos Tárcoles y Parrita, por el Ing. Edgar Hernández Ávila, en el año 2002.
- Zonificación del potencial de licuación de suelos para la zona de la Península de Nicoya y alrededores, por el Ing. Sergio Chacón Cascante, en el año 2002.
- Zonificación de la amenaza de licuación en la Región Atlántica, por el Ing. Andrés Araya Rojas, en el año 2002.
- Zonificación combinada de amenazas naturales para infraestructura, en las cuencas alrededor de las ciudades de Cartago y Paraíso, Valle Central Oriental de Costa Rica, desarrollada por el Ing. José Francisco Garro Mora.
- Microzonificación sísmica de la hoja topográfica Santo Domingo: hoja 3345-I-4 IGN, escala 1: 10 000, por el Ing. Adrián Solís Salazar, en el año 2003.
- Microzonificación sísmica en Montes de Oca y Curridabat entre las coordenadas Lambert
 5 30 5 36 y 2 10 2 15, por el Ing. Michael Navarro Romero, en el año 2003.
- Zonificación de suelos residuales de origen volcánico en el Valle Central Occidental de Costa Rica elaborada por el Ing. Luis Gonzalo Lacayo Elizondo en el año 2005.
- Zonificación de amenazas naturales presente en el proyecto de graduación titulado "Evaluación conjunta de amenazas naturales para la infraestructura civil y vial de las principales poblaciones del Sur de San José", desarrollada por el Ing. Ricardo Zamora Monge en el año 2005.
- Características geotécnicas de los suelos derivados de cenizas volcánicas (andosoles) en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica, desarrollada por el Ing. Carlos Novoa Golfín.
- Zonificación de sitios para valoración de la aceleración pico efectiva según criterios del Código Sísmico de Costa Rica, por el Ing. Cristian Sotela Sobrado, en el año 2011.
- Microzonificación sísmica del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica.

1.3.5. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

1.3.5.1. Componentes

Los SIG son sistemas de información diseñados para trabajar con datos referenciados mediante coordenadas espaciales o geográficas que permiten analizar, presentar e interpretar hechos relativos a la superficie terrestre (Olaya, 2014). Los SIG están compuestos por cinco elementos fundamentales: datos, tecnología, análisis, visualización y factor organizativo. A continuación, se describe el papel que cumple cada una de ellas:

Datos

Los datos contienen la información geográfica necesaria para darle vida al SIG, es importante contar con un amplio conocimiento de las características de los datos que se utilizan, es decir, su forma y propiedades, con el fin de poder determinar cuáles métodos o procesos de un SIG son aplicables. Otro aspecto importante es saber cómo integrar los datos al sistema, ya que estos pueden ser de distintas procedencias. Además, se debe entender como esto puede afectar las propias características de los datos. Cabe destacar que uno de los elementos más importantes para aprovechar ampliamente las funciones de un SIG es la calidad de los datos que se utilizan.

Tecnología

Dentro de la tecnología de los SIG está el equipo físico o "hardware", lugar donde se ejecutan las aplicaciones. Por un lado, el "hardware" incluye una serie de funciones para tareas más específicas, como la entrada de datos geográficos y la creación de cartografía. Por otro lado, el **sistema o** "software" es el encargado de operar y manipular los datos, permitiendo visualizar, gestionar y analizar los datos geográficos. La tecnología de los Sistemas de Información Geográfica ha evolucionado en capacidad gráfica, almacenamiento de datos y entrada de datos, con el cual es posible generar mapas a mayor escala.

Análisis

La capacidad de análisis de datos por parte de los SIG los convierte en una herramienta competitiva y útil en diferentes campos. El análisis depende no solo del ámbito de la geografía, muchas de las funciones de los sistemas de información son gracias a la estadística. El aporte de esta rama, junto a la información georreferenciada, hace posible el conjunto de procesos de análisis de un SIG. Parte de las ventajas de incorporar todos estos procesos a una única

herramienta son la automatización de las tareas y la creación de nuevos procesos que, junto a un ordenador con capacidad, se obtienen resultados que no se tendrían con otra herramienta.

Visualización

La visualización es la forma principal para trabajar con un SIG, no solo porque hace que el tratamiento de información sea más fácil e intuitivo; sino porque es a la que estamos más acostumbrados. Tradicionalmente la información geográfica se ha almacenado de manera visual, a través de mapas. A diferencia de los mapas, los Sistemas de Información Geográfica trabajan con datos puramente numéricos, ya que así es como el ordenador puede procesarlos (Olaya, 2014).

Factor organizativo

A medida que los SIG han ido evolucionando, se han convertido en una herramienta más compleja que requiere una correcta organización y coordinación entre sus diferentes componentes. La relación entre el equipo de personas que forman parte del SIG es tan importante como la relación de los datos con todos los elementos (Olaya, 2014).

1.3.5.2. Evolución de los SIG

A principios de los años sesenta se desarrolló formalmente le primer Sistema de Información Geográfica en Canadá por Roger Tomlinson, denominado CGIS (Canadian Geographical Information Systems), que consistió en una herramienta para el manejo de los datos del inventario geográfico canadiense (Olaya, 2014). Estos programas marcaron el inicio del desarrollo de nuevas técnicas importantes en el ámbito de la geografía, como la codificación y el almacenamiento de información geográfica. En 1969 David Sinton, en el Harvard Laboratory, desarrolló el primer programa relacionado con los SIG tipo ráster o imagen de pixeles, que permitió almacenar información de forma cuadriculada, llamado "GRID" o malla. A raíz de esto se desarrollaron nuevos programas, como ESRI y GRASS, y los SIG primitivos fueron evolucionando y recorriendo diferentes etapas influenciadas por distintos factores, las cuales se muestran en la Figura 12.

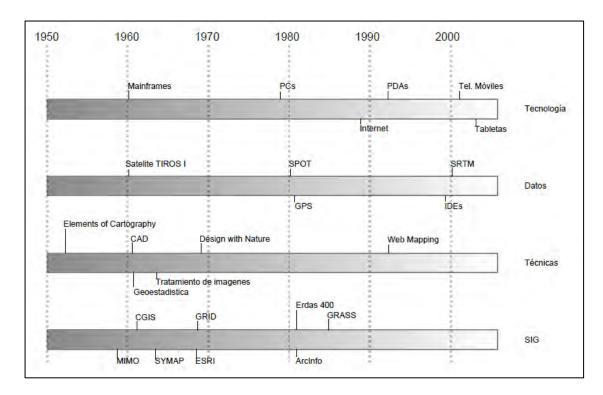


Figura 12. Evolución de los Sistemas de Información Geográfica Fuente: Olaya, 2014

La Figura 12 muestra el avance de los Sistemas de Información Geográfica en 4 aspectos: evolución como disciplina, evolución tecnológica, evolución de los datos y evolución de las técnicas y formulaciones. La evolución tecnológica hace referencia a 3 puntos principales: salidas gráficas, almacenamiento y acceso de datos y la entrada de datos, cuya evolución va de la mano de la aparición de nuevos ordenadores (desde las PC´s hasta las tabletas) y los softwares que se ejecutan en ellos. Por otro lado, la evolución de los datos es uno de los principales aspectos que han permitido el avance del sistema de información. Inicialmente los datos se digitalizaban manualmente a partir de una hoja cartográfica o mapas escaneados, hoy en día se cuenta con herramientas como los GPS y "Google Maps" que permiten obtener coordenadas geográficas exactas de cualquier sitio. Por último, la evolución de las técnicas y formulaciones se refiere al desarrollo de nuevos conceptos, enfoques, teorías que han dejado huella y permiten la evolución del SIG, por ejemplo, hoy en día los SIG incorporan capacidades similares a los CAD, permitiendo la digitalización de cartografía y la interpolaridad.

1.3.5.3. Datos para un SIG

Los datos son la parte principal para los Sistemas de Información geográfica. Los datos y la información son diferentes, ya que los datos son un conjunto de valores que representan algo, por ejemplo, la temperatura, pero la información es la correcta interpretación de estos datos.

La información geográfica tiene una componente geográfica o espacial, de carácter numérico que hace que la información pueda calificarse como geográfica, y otra componente temática, que es variada y de diferentes temas, que responde la pregunta ¿qué? (Olaya, 2014).

Además de los componentes, la información geográfica se divide en horizontal y vertical. La horizontal se refiere a espacio físico, por ejemplo, las hojas cartográficas en las que algún mapa está cartografiado, pero, el espacio físico no existe en los SIG. Mientras que, la información vertical se refiere a las capas para estructuras y trabajar dicha información, por ejemplo, puede existir una capa topográfica, de uso de suelo, suelo e hidrografía, como se muestra en la Figura 13.

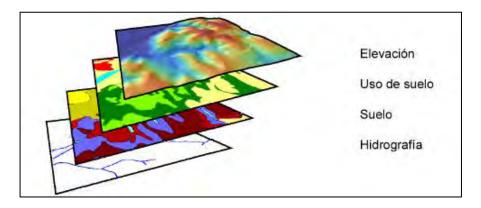


Figura 13. Información vertical de un SIG Fuente: Olaya, 2014

La información en capas es la raíz de muchas de las funciones de un Sistema de Información y permite una mejor integración de los datos.

1.3.5.4. Modelos de representación para la información geográfica

Los modelos de representación geográfica o modelos de datos permiten conceptualizar de manera particular y variada los espacios geográficos, por ejemplo, una variable como la elevación, es posible representarla de distintas formas (curvas de nivel, malla de celdas regulares, puntos regulares, red de triángulos irregulares, malla de celdas o conjunto de líneas, entre otros) ya que es una variable contina, como se muestra en la Figura 14, aunque, existen

capas, como una red vial, que solo se pueden representar visualmente de una manera, llamado modelo de entidades discretas como se muestra en la Figura 15 (Olaya, 2014).

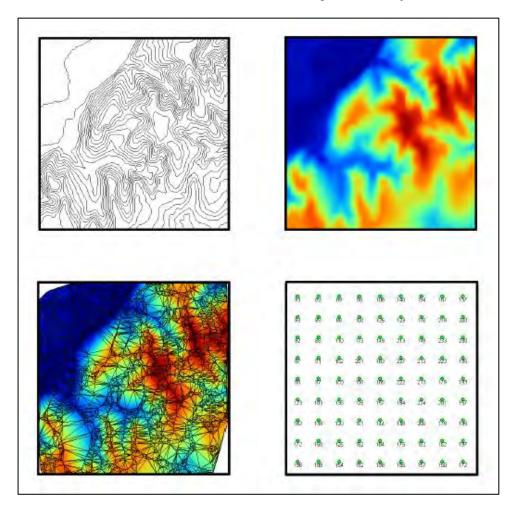


Figura 14. Modelos de representación para la información altitudinal. Fuente: Olaya, 2014



Figura 15. Modelos de representación para una red vial. Fuente: Olaya, 2014

Como se mencionó, existen distintas formas de representar una misma variable, estas se pueden clasificar en dos grandes grupos: representación ráster y representación vectorial. La representación ráster se basa en una división sistemática del espacio y se asemeja a un modelo geográfico de campos o celdas que cuentan con una localización geográfica y un conjunto de valores (Figura 16), ideal para variables continuas. El modelo vectorial no divide el espacio, sino que recoge la variabilidad y características y lo define mediante elementos geométricos que pueden ser puntos, líneas o polígonos (Figura 17), ideal para las entidades discretas. Lo anterior no quiere decir que los modelos vectoriales no pueden ser utilizados para representar campos y recoger variables como la elevación, existen capas vectoriales con topología, por ejemplo, TIN, que consisten en una red formada por un conjunto de triángulos interconectados, donde cada uno representa una zona con características homogéneas respecto a la variable estudiada, donde la cantidad de triángulos varía según las características de la zona.

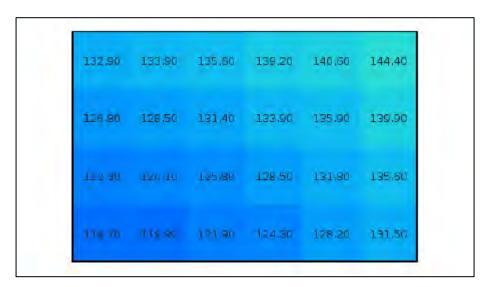


Figura 16. Celdas de una malla ráster y sus valores asociados Fuente: Olaya, 2014

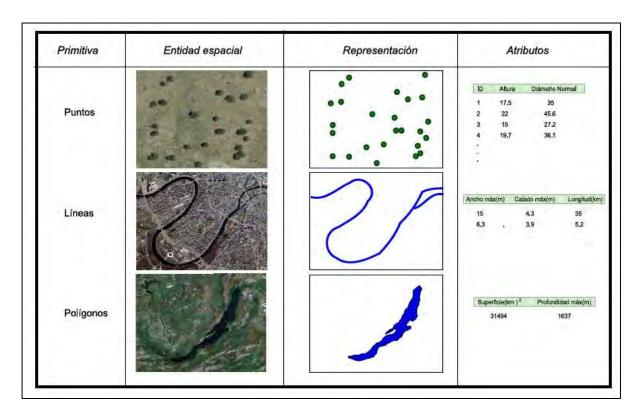


Figura 17. Representación de las variables tipo vectorial Fuente: Olaya, 2014

1.3.5.5. Análisis de patrones de puntos

Los patrones de puntos hacen referencia a un conjunto de puntos en el espacio que representan una información y su caracterización o descripción, que se realiza mediante un análisis estadístico. El análisis de patrones de puntos consiste en la comparación entre las propiedades de una distribución teórica (distinción de Poisson) y las de la distribución observada. Entre los tipos están:

- Análisis de cuadrantes, el cual divide la zona de estudio en unidades regulares o cuadrantes y estudia el número de puntos en cada cuadrante.
- Análisis de vecino más cercano, el cual se basa en la comparación de distancias entre puntos vecinos.
- Función K de Ripley, que incorpora la escala como una variable más del análisis.

1.3.5.6. Creación de capas ráster mediante la interpolación

La interpolación permite el cálculo del valor de un punto no muestreado, a partir de los valores de puntos cercanos y es una de las principales herramientas en los SIG. Su aplicación para la

creación de capas ráster viene de la mano de la bidimensionalidad de las capas. Según Olaya (2014), los diferentes métodos de interpolación se pueden clasificar en los siguientes 3 grupos:

- Según los puntos considerados para el cálculo de valores: algunos métodos, denominados globales, consideran que todos los puntos que se disponen tienen influencia sobre el valor de una celda; mientras que otros métodos locales, solo consideran una cantidad limitada de puntos. Cuando se trabaja con una gran cantidad de puntos se vuelve inviable el cálculo de las distancias entre todos los puntos, por lo que se recomienda utilizar índices espaciales para seleccionar los puntos de mayor influencia.
- Según su valor en los puntos de partida: los valores asignados a las coordenadas pueden ser exactamente los recogidos en ese punto (métodos exactos) o puede ser el valor que corresponde al mejor ajuste (métodos aproximados).
- Según la inclusión o no de elementos probabilísticos: los métodos utilizados pueden ser estocásticos (emplean elementos probabilísticos) o determinísticos (no emplean elementos probabilísticos).

Por vecindad

Es el método más sencillo para interpolar, consiste en asignarle a la celda sin muestreo el valor del punto más cercano, sin ninguna formulación matemática. Este razonamiento se utiliza para calcular los denominados polígonos de Thiessen, utilizados comúnmente en los análisis climatológicos. Este método no se recomienda para variables continuas.

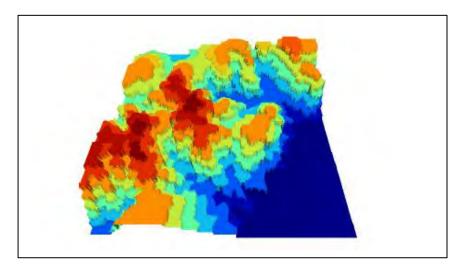


Figura 18. Superficies obtenidas mediante interpolación por vecindad. Fuente: Olaya, 2014

Ponderación por distancia

Los métodos basados en la ponderación por distancia son de tipo local, aproximado y determinístico, el valor de una coordenada se determina mediante una media ponderada de los puntos de influencia seleccionados.

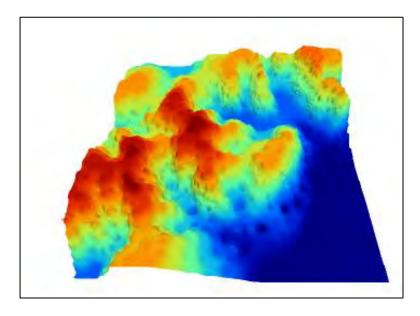


Figura 19. Superficies obtenidas mediante interpolación por ponderación por distancia. Fuente: Olaya, 2014

Ajuste de funciones (superficies de tendencia)

Método de interpolación determinístico o estocástico, aproximado y global, cuyo ajuste se realiza por mínimos cuadrados y las funciones utilizadas son de tipo polinomio, que permiten el cálculo de parámetros en todas las celdas de la capa ráster.

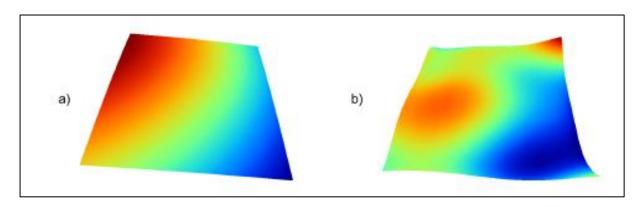


Figura 20. Superficies obtenidas mediante interpolación por ajuste polinómico de segundo (a) y quinto (b) grado.

Fuente: Olaya, 2014

Curvas adaptativas ("splines")

Método de interpolación exacto, determinístico y local, que crea superficies suaves cuyas características pueden regularse mediante el tipo de curva empleada. A diferencia del ajuste por funciones, "splines" emplea un polinomio a cada tramo, en lugar de utilizar uno solo para ajustar todo el intervalo. Visualmente est5a interpolación se asemeja a colocar una tela elástica sobre los puntos conocidos (Olaya, 2014).

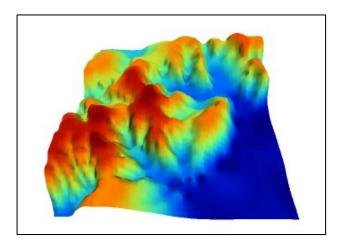


Figura 21. Superficies obtenidas mediante interpolación por curvas adaptativas Fuente: Olaya, 2014

"Kriging"

Método estocástico y exacto que se puede aplicar local o globalmente, que brinda una forma objetiva de establecer la ponderación óptima entre los puntos en un interpolador local, donde el error de predicción debe ser mínimo, los puntos cercanos deben tener mayor peso que los

lejanos, los puntos muy cercanos con valores similares deben agruparse y la estimación del error debe hacerse en función de la estructura de los puntos (Olaya, 2014).

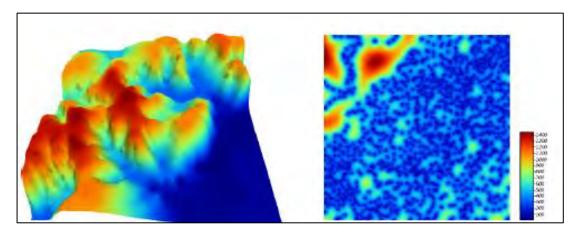


Figura 22. Superficies obtenidas mediante interpolación por kriging. Fuente: Olaya, 2014

1.3.5.7. Elección del método adecuado

La elección del método que mejor se ajusta a nuestros datos se ve influenciado por diversos factores, y no existe un método establecido como el más adecuado. Es importante considerar que un mismo método puede dar resultados distintos en función de los parámetros de ajuste. Algunos factores que se deben considerar a la hora de elegir el método más adecuado son (Olaya, 2014):

- Las características de la variable a interpolar.
- Las características de la superficie a interpolar.
- La calidad de los puntos de partida.
- El rendimiento de los algoritmos (tiempo de proceso).
- El conocimiento de los métodos.
- El uso de la capa resultante.

1.3.5.8. Quantum GIS

QGIS o Quantum GIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de software libre, creado por Gary Sherman en el 2002, que permite manejar formatos ráster y vectoriales, así como bases de datos. Lo cual lo hace en una opción viable para el presente trabajo final de

graduación. Se utilizará como base de datos para almacenar toda la información recolectada, además, será la herramienta principal para la elaboración de los mapas geotécnicos propuestos.

La información vectorial, en particular la disponible en forma de puntos, como la que se utilizará en el presente proyecto, puede convertirse en capas ráster a través del uso de métodos de interpolación. Como ya se mencionó, la interpolación es un proceso que utiliza puntos con valores conocidos para estimar valores desconocidos en otros puntos, con el fin de homogenizar zonas con valores de cierta variable y categorizar las zonas.

QGIS utiliza diferentes métodos ampliamente conocidos, dentro estos están: Vecino más cercano (Polígonos de Thiessen), Distancia Inversa Ponderada (IDW por sus siglas en inglés), Redes Irregulares Trianguladas (TIN por sus siglas en inglés), "Splines" y "Kriging".

Para todos los mapas realizados se utilizó el método de interpolación IDW ya que fue el que brindó mejores resultados, una vez realizada la interpolación se utilizó un filtro con el cual se suavizaron los mapas. Además, parte de la importancia del presente trabajo es demostrar que con un software de uso libre se pueden obtener resultados buenos resultados.

El programa se puede descargar en la dirección https://QGIS.org/es/site/forusers/download.html, la versión más actual es la 3.22 y requiere de un espacio aproximado de 2 GB. En Cuanto a las características del equipo a utilizar, el procesador dependerá del trabajo que se quiera realizar, sin embargo, para realizar interpolaciones es necesario un buen procesador. Además, e recomienda un mínimo de 8 GB de memoria RAM.

1.4. Delimitación del problema

1.4.1. Alcances

Los mapas de la zonificación geotécnica tendrán la delimitación establecida en el Plan GAM 2013, la cual cubre los siguientes cantones: San José, Escazú, Desamparados, Aserrí, Mora, Goicochea, Santa Ana, Alajuelita, Vásquez de Coronado, Tibás, Moravia, Montes de Oca, Curridabat, Alajuela, Poás, Atenas, Cartago, Paraíso, La Unión, Alvarado, Oreamuno, El Guarco, Heredia, Barva, Santo Domingo, Santa Bárbara, San Rafael, San Isidro, Belén, Flores y San Pablo. En total, la GAM incluye 164 distritos de los 33 cantones mencionados anteriormente, y cubre 1696 km², aproximadamente 3.5% del territorio nacional.

Los estudios geotécnicos serán brindados por la empresa Ingeotec S.A. con más de 20 años de experiencia, especializada en consultoría y construcción geotécnica. Específicamente se cuenta 938 informes geotécnicos realizados por la empresa desde principios del año 1995 hasta el año 2020, donde se incluyen los resultados de ensayos obtenidos de perforaciones SPT (ensayo de penetración estándar), como número de golpes, límites de Atterberg y humedad natural, los cuales se utilizarán para caracterizar geotécnicamente los suelos y generar la zonificación. Además, con ayuda de los límites de plasticidad, se caracterizarán los suelos con la clasificación con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Los mapas brindan información de las condiciones y características geotécnicas de los suelos de la GAM. Además, se considera que la información de cada zona es generalizada, por lo que pueden existir excepciones, esto quiere decir que, aunque una zona sea clasificada como con presencia de arcillas, por ejemplo, no implica que no se pueda encontrar otros tipos de suelos. Esto se debe a las variaciones y propiedades geotécnicas de cada zona. Es importante destacar que, la zonificación no es un remplazo al estudio geotécnico, simplemente informa y alerta al ingeniero de los posibles problemas del medio soportante.

1.4.2. Limitaciones

La información para la caracterización de los suelos será de estudios geotécnicos realizados por la empresa Ingeotec S.A., no se realizarán pruebas o ensayos de campo y laboratorio específicamente para este proyecto final de graduación, es decir solo se trabajará con información ya existente.

Cabe destacar que los ensayos mencionados anteriormente son únicamente de suelos, el estudio de las propiedades mecánicas de las rocas queda fuera del alcance de este proyecto. Además, la profundidad estudiada para elaborar los mapas queda limitada por el Ensayo de Penetración Estándar y las necesidades de cada proyecto, donde la profundidad máxima alcanzada fue de 16 m. Esta es una limitante principalmente para el mapa de espesor de suelo que se generará, ya que en muchas perforaciones no fue posible encontrar el fondo del estrato de suelo, sino un estrato de suelo firme. Para el mapa del nivel freático, ya que, en la mayoría de las perforaciones, no fue posible detectar la profundidad del nivel freático.

A pesar del gran desarrollo y el crecimiento en la GAM, existen zonas poco urbanizadas, en las cuales no se cuenta con estudios geotécnicos se cuenta con poca información, como en los cantones de Aserrí, Atenas, Barva, Oreamuno, Poás y Santa Bárbara.

1.5. Descripción de la metodología a usar

La metodología se dividirá en tres etapas a desarrollar. La primera consiste en consultar fuentes bibliográficas acerca de los suelos de Costa Rica y sus parámetros geotécnicos; la segunda comprende la elaboración de la base de datos y los mapas con un Sistema de información Geográfica.

En la Figura 1 se muestra la secuencia de las actividades a realizar para alcanzar los objetivos planteados previamente, esta consta en tres etapas:

- 1. Consiste en una revisión bibliográfica de los suelos en Costa Rica.
- 2. Comprende la elaboración de la base de datos.
- 3. Elaboración de los mapas geotécnicos.

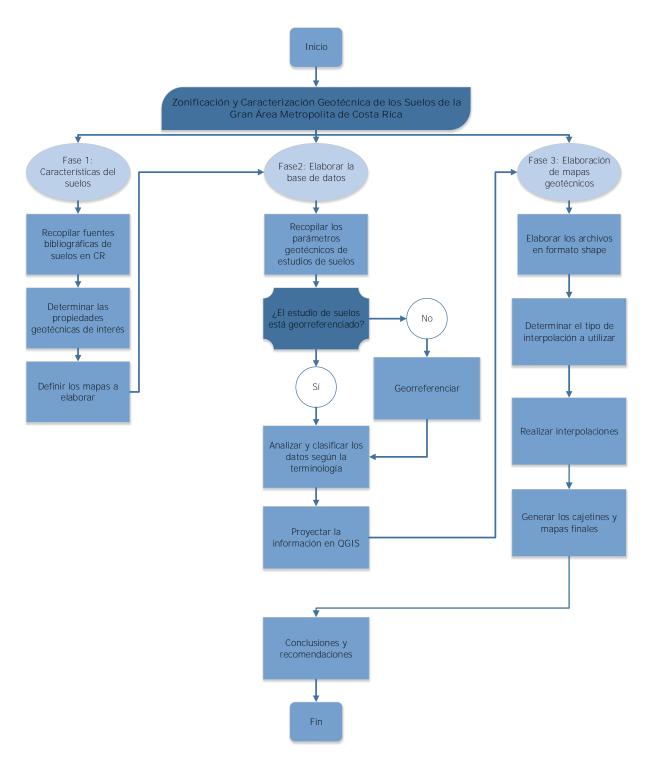


Figura 23. Esquema metodológico

1.5.1. Características del suelo a zonificar

La primera etapa del proyecto consiste en una investigación teórica de los suelos existentes en el territorio nacional y cuáles parámetros geotécnicos son necesarios para identificar la presencia de cierto tipo de suelo, para posteriormente definir los mapas a realizar y para generar la zonificación geotécnica.

1.5.1.1. Suelos presentes en Costa Rica

Para determinar cuáles parámetros recolectar para generar una base de datos y posteriormente la zonificación en la GAM, es necesario conocer los tipos de suelos existentes en Costa Rica, particularmente los de la GAM, y qué propiedades geotécnicas los caracteriza. Para el presente proyecto se utilizarán los tipos de suelos determinados en el Código de Cimentaciones de Costa Rica (2009), los cuales son:

- a) Arcillas de alta expansividad
- b) Limos de baja resistencia
- c) Rellenos artificiales
- d) Suelos granulares finos de baja densidad
- e) Suelos tixotrópicos

1.5.1.2. Propiedades geotécnicas de interés

Una vez estudiado los tipos de suelos presentes y las propiedades geotécnicas que los caracteriza, se procede a determinar los parámetros a utilizar para generar la zonificación geotécnica. A partir de los recursos que brinda la empresa Ingeotec S.A, de la zonificación geotécnica elaborada por Bogantes y de la Figura A 5, en los anexos, se determina que los parámetros requeridos son: límite líquido, índice de plasticidad, límite plástico, clasificación SUCS, humedad natural, resistencia a la penetración estándar (N_{SPT}), peso volumétrico y cohesión no drenada.

1.5.1.3. Definición de mapas a elaborar

Como se ha mencionado, parte de los objetivos del presente proyecto es extender los mapas realizados en este proyecto, con los mapas realizados por el ingeniero Roy Bogantes, estos son:

- Mapa de ubicación de arcillas expansivas
- Mapa de limos colapsables y suelos blandos

- Mapa de zonificación geotécnica
- Mapa de nivel freático
- Mapa de espesores de suelos

Debido al tipo de información con la que se dispone, se realizarán los siguientes 6 mapas:

- Mapa de espesor de suelo.
- Mapa de consistencia de los suelos de 0 a 2 m de profundidad.
- Mapa de consistencia de los suelos de 2 a 5 m de profundidad.
- Mapa de consistencia de los suelos de 5 ó más m de profundidad.
- Mapa de tipo de suelo.
- Mapa de nivel freático.

1.5.2. Elaboración de la base de datos

Esta etapa consiste en el procedimiento a seguir para la elaboración de la base de datos. Como primer paso, se obtendrán los parámetros geotécnicos mencionados en el apartado 6.1.2, seguidamente se georreferenciará los datos, se proyectarán en el Sistema de Información Geográfica. Los datos vectoriales en forma de punto se utilizarán para hacer las interpolaciones y con la capa ráster que se obtiene se realizan los mapas resultantes.

1.5.2.1. Obtención de parámetros geotécnicos

La empresa Ingeotec S.A. brindará la información de estudios geotécnicos realizados desde el año 1995 hasta el 2020, con el fin de obtener la mayor cantidad de datos posibles y cubrir en su totalidad la zona de estudio. Los parámetros geotécnicos se obtendrán de informes y hojas de perforación como la mostrada en la Figura 24 en la descripción de la base de datos realizada, como se observa, la hoja contiene la descripción de la litología, número de golpes (N_{SPT}), porcentaje de humedad natural (w%), límite líquido (LL), índice de plasticidad (IP), cohesión no drenada (c), peso volumétrico (γ) y clasificación SUCS. Todos los parámetros obtenidos corresponden a sondeos utilizados por la empresa Ingeotec en sus proyectos desarrollados.

-	ngeote	c. S. A.	35.5 Av. W.							Proyect	6:	
U	GEOTECHIA Y	C, S. A.	PERFIL DE SUE	LOS								
Loc	ealización	Sondeo:	Inicio				Nivel	Freá	tico:			
		Prof.	Final:			P	lateria	l org	ánico	ći i		
Profundi	idad m	Descripción	Lito Jogía	Gráfico N	N		2 1	P	LL	C kg/cm ¹	7x kg/m³	SUCS
0.00 -	0.50						7.7				EC. 2 . 25	
0.50 -	1.00						- 1					
1.00 -	1.50		-44				1 1					-
1.50 -	2.00								-10			
2.00 -	2.50											
2.50 -	3.00					1	-1	=1				
3.00 -	3.50											
3.50 -	4.00		-47 13						- 11	1		
4.00 -	4.50					1						
4.50 -	5.00		+1/			1			= 11			
5.00 -	5.50						1 1		- 11			-
5.50 -	6.00						-11+		-11			
6.00 -	6.50											
6.50 -	7.00		7.5									
7.00 -	7.50											
7.50 -	8.00										- 1	
8.00 -	8.50		144									
8.50 -	9.00											
9.00 -	9.50											
9.50 -	10.00								-11			

Figura 24. Hoja de perforación de la empresa Ingeotec S.A. Fuente: Ingeotec. S.A

1.5.2.2. Analizar y clasificar los datos recolectados según los mapas a generar

Una vez que se cuenta con estos parámetros geotécnicos de cada sitio, se procede a clasificarlos según una terminología específica, la cual se describe más adelante. Cuando esta información es analizada se clasifica en:

- Consistencia: muy blanda, blanda, media, firme o muy firme, con base en el número de golpes obtenido el ensayo SPT, según Quirós (1985).
- Tipo de suelo: arcilla, arcilla expansiva, limo o limo colapsable.

1.5.2.3. Georreferenciar los estudios geotécnicos recolectados

Los informes geotécnicos utilizados no contaban con coordenadas geográficas, por lo que fue necesario georreferenciar cada una de las perforaciones a utilizar para generar los mapas con el uso de un Sistema de Información Geográfica. Se georreferenció cada perforación, cuando se contaba con la ubicación exacta, mediante las coordenadas WGS84 obtenidas del servidor

"Google Maps" y se proyectarán en CRTM05 con el programa QGIS. Cuando no se contaba con la ubicación exacta de cada perforación realizada, se tomó la ubicación del sitio en estudio. Si no se cuenta con una ubicación lo más exacta posible, el estudio geotécnico no se considerará para la zonificación, ya que se deben generar resultados lo más veraces posible. En total se georreferenciaron 2180 perforaciones para la base de datos elaborada.

1.5.2.4. Proyectar información recolectada

Con el fin de verificar si la información con la que se cuenta es suficiente y cubre la Gran Área Metropolitana en su totalidad, se proyectarán como puntos georreferenciados cada perforación con ayuda del software de uso libre QGIS en el sistema CRTM05. Se utilizará la herramienta para proyectar capas con datos vectoriales, donde cada punto en el mapa representa un dato.

1.5.3. Generar mapas con QGIS

Una vez creada la base de datos en Excel es posible ingresarla al Sistema de Información Geográfica QGIS como una capa de texto delimitado usando el formato CSV. Cuando ya estén ingresados los datos georreferenciados es posible proyectar cada punto en el espacio Inicialmente las coordenadas de los datos son WGS84, sin embargo, estas serán proyectadas en CRTM05, ya que, según el Registro Nacional de Costa Rica, son las coordenadas oficiales de nuestro país. Seguidamente, se generarán los archivos en formato "shape", para poder ser utilizados en el programa. Se determinó que el interpolador a utilizar es el IDW, para generar los diferentes mapas. Es importante destacar que se utilizarán recursos del SNIT o Sistema Nacional de Información Territorial, por ejemplo, los límites cantonales y distritales del país.

Una vez generadas las interpolaciones se realiza el cajetín para imprimir los mapas, en el cual se indica la escala, el norte, simbología, coordenadas, cuadrículas, entre otros elementos. Con el fin de generar los mapas finales.

1.6. Mecanismos posibles de evaluación del proyecto

La eficiencia del presente proyecto de graduación será medida con los mapas realizados, donde la información obtenida del estudio geotécnico se convierte en una zonificación visual que brinda propiedades de los tipos de suelos en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica.

Una vez realizados los mapas de zonificación, se habrán alcanzado los objetivos específicos del proyecto, que van desde la realización de la base de datos hasta la comparación entre la nueva zonificación geotécnica y la antigua. Es importante destacar que, el presente proyecto va desde comparar las zonificaciones geotécnicas hasta expandir el área de los mapas.

Por otro lado, el impacto en el ámbito de la geotecnia en Costa Rica es alto, se contará con una nueva zonificación geotécnica que cubre una mayor el área de la GAM, que alertará a los profesionales de los posibles problemas del medio soportante.

Debido a lo mencionado anteriormente, el presente proyecto tiene una gran importancia para la ingeniería civil en Costa Rica. Dado a la antigüedad y al área de estudio de la zonificación realizada por el Ing. Roy Bogantes Gonzáles, nace la necesidad de realizar una nueva, que incluya estudios geotécnicos de los últimos años y que se expanda a un área mayor de la GAM actual.

En cuanto a los efectos positivos del proyecto y su perdurabilidad, se tiene el uso para los futuros proyectos de ingeniería. Desde el proyecto de graduación del Ing. Roy Bogantes Gonzáles se demostró la necesidad y la importancia de una zonificación geotécnica, la cual es inclusive utilizada en la actualidad y se encuentra en el Código de Cimentaciones de Costa Rica referente para el diseño geotécnico de nuestro país y de uso obligatorio. La nueva zonificación geotécnica podrá ser utilizada y aprovechada durante varios años, y actualizarse en la medida que se tenga acceso a más información.

Por último, diferentes profesionales en el ámbito de la geotecnia en Costa Rica podrán evaluar los resultados del proyecto de graduación, verificando con su experiencia si la zonificación de los suelos de la GAM presentada en este trabajo es adecuada y correlaciona adecuadamente con su experiencia.

CAPÍTULO 2

2. SUELOS PRESENTES EN COSTA RICA

2.1. Origen y composición de los suelos

La mayoría de los suelos conservan características físicas y geomecánicas únicas, las cuales provienen de sus minerales y del génesis a partir del cual se generó, es decir, el suelo es el producto de los efectos de la meteorización y erosión de la roca, el cual define el tamaño de las partículas, y, por ende, muchas de sus propiedades. La meteorización se define como el proceso de fragmentación o descomposición de las rocas, esta puede ser mecánicas (expansión y contracción por temperatura) o química (transformación de los minerales originales) (Das, 2015). Por otro lado, las rocas son la mezcla de diferentes minerales y para entender mejor la composición de los suelos, es necesario conocer la formación de las rocas. Según su origen, las rocas se pueden clasificar en tres grupos básicos: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Las rocas ígneas se forman dentro o fuera de la corteza terrestre a raíz del enfriamiento del magma, cuando ese se solidifica en la superficie se denominan rocas ígneas extrusivas o volcánicas, mientras que, cuando se solidifican en el interior de la tierra, se denominan rocas ígneas intrusivas o plutónicas (Vargas, 2010). Entre las rocas ígneas más comunes están el granito, la dolerita, la andesita y el gabro. Cabe destacar que, la mayoría de las rocas en la superficie terrestre son de este tipo. Algunas de las rocas ígneas presentes en nuestro país son coladas de basalto, gabro, ignimbritas, diorita, entre otras (Huapaya, 2013).

Las rocas sedimentarias se generan a partir de acumulación y compactación de sedimentos transportados por diferentes agentes como el agua o el viento (Vargas, 2010). Las rocas de sedimentarias se clasifican en detríticas (formadas a partir de fragmentos sólidos derivados de otras rocas) y químicas (formadas a partir de sustancias disueltas en el agua). Algunas de las rocas sedimentarias presentes en Costa Rica son lutitas, calizas, tobas, lutitas, areniscas, brechas, entre otras (Huapaya, 2013).

Las rocas metamórficas son el producto de la transformación de la composición y textura de las rocas mediante altas temperaturas y presión y presión (Das, 2015). El metamorfismo ocurre cando las rocas se ven sometidas a estados diferentes al de su formación, además, la presión y la temperatura aumentan según la profundidad de la tierra, por esto, la mayoría de las rocas metamórficas, se forman a grandes profundidades (Vargas, 2010). Debido a que la geología

de nuestro país se caracteriza por ser joven, no es común encontrar este tipo de roca en nuestro medio.

Las rocas quedan expuestas en la superficie a factores externos, como las precipitaciones, temperatura, viento cuerpos de agua, entre otros; provocando la formación de dos tipos de suelos: residuales y transportados, los cuales serán explicados más adelante.

2.1.1. Factores que intervienen en la formación de los suelos

Los suelos, en la Ingeniería Civil, se definen como aquellos materiales de la superficie terrestre que se pueden utilizar para cimentar estructuras, mientras que la geología los define como los materiales que resultan de la descomposición de rocas (Vargas, 2010). Los suelos se dividen en residuales y transportados, los primeros son producto de la fragmentación, desintegración y descomposición de las rocas que permanecen en su sitio de origen; mientras que los transportados fueron formados en un sitio distinto y luego llevado por diferentes agentes al sitio donde se encuentran.

La formación de los suelos es un proceso complejo que involucra diferentes factores, Ibáñez, Palomeque y Fontúrbel (2004) se refieren a 5 factores en específico:

- Roca madre: los suelos se conforman de material madre residual y adquieren ciertas propiedades físicas y mecánicas de ella. La roca madre se genera a partir de la solidificación del magma proveniente del centro de la tierra.
- El clima: los fenómenos atmosféricos son los responsables de la meteorización, el lavado y gran parte del transporte de los suelos.
- Los factores bióticos: todos los organismos y microorganismos del ambiente intervienen en los procesos de modificación del suelo y dan origen a los suelos orgánicos.
- La topografía: dependiendo de las condiciones topográficas los suelos se ven afectados, por ejemplo, puede entrar más o menos agua, los terrenos con pendiente permiten la escorrentía del agua, mientras que en los terrenos planos el agua puede llegar a ser absorbida por el suelo.

a. Suelos residuales

Los suelos residuales se generan a partir de la fragmentación, desintegración y descomposición química de las rocas causada por factores como el clima, cuyo proceso es denominado

meteorización o intemperización (Vargas, 2010). Este tipo de suelo permanece en su sitio de origen, donde la tasa de meteorización es mayor que la velocidad en la que los materiales son transportados por agentes externos, por ejemplo, zonas cálidas y húmedas (Das, 2015).

La meteorización de las rocas es uno de los procesos geológicos más importantes en la formación de suelos, la cual se genera a partir de los efectos del clima, como el viento, las precipitaciones, cambios de temperatura, efectos tectónicos, entre otros. Según Vargas (2010) la meteorización puede ser mecánica o química, la primera suele ser causada por esfuerzos tectónicos, cambios en la temperatura, lluvia, viento, descompresión o reducción de esfuerzos en las rocas formadas a profundidad, entre otros. Mientras que la meteorización química incluye procesos como la oxidación, carbonatación, disolución, reducción, entre otros, es decir, los minerales que componen la roca se ven alterados.

La naturaleza de los suelos residuales va a depender de las propiedades de la roca madre, cuya profundidad puede variar ampliamente. Por lo general, estos depósitos de suelos contienen una capa superior arcillosa o limosa, compuesta de fragmentos de roca (Das, 2015).

Ingenierilmente, estos suelos pueden provocar situaciones no tan favorables para las estructuras, por ejemplo, grandes cimentaciones con cargas pesadas pueden sufrir asentamientos importantes debido a la consolidación de estos suelos.

b. Suelos transportados

Por otro lado, los suelos transportados son el resultado del arrastre de los fragmentos de rocas y suelos, por agentes como el viento, agua, gravedad, entre otros, produciendo sedimentos y depósitos. Este tipo de suelos se caracteriza porque se encuentran en sitios diferentes al que se originó.

Según (Das, 2015), los depósitos de suelos transportados pueden ser:

 Depósitos transportados por gravedad o coluviales: se generan por el movimiento de suelos residuales a través de una pendiente natural y son depositados en las partes bajas de las laderas, si el movimiento es lento se denomina fluencia, mientras que, cuando es repentino se llama deslizamiento de tierra.

- Depósitos aluviales: arrastre de suelos por ríos y arroyos. Cuando el suelo es arrastrado por corrientes fluviales fluyen rápido y contienen grandes cantidades de sedimentos, por lo que una disminución en la velocidad de flujo provoca que estos sedimentos se depositen, generando depósitos con estratigrafías muy irregulares y con diferentes tamaños de partículas (desde limos, hasta gravas). Otra forma de que se generen los depósitos aluviales es cuando ocurren inundaciones y desbordamiento de los ríos, donde las partículas de tamaño arena y limo se depositan en las orillas formando diques naturales.
- Depósitos lacustres: los ríos fluyen con sólidos suspendidos hacia los lagos, generando que las partículas grandes se deposites y formen un delta, mientras que las partículas más finas se depositan en el fondo.
- Depósitos eólicos: existen diferentes depósitos generados por el transporte de partículas a través del viento, por ejemplo, las dunas se componen de arena arrastrada, cuyas partículas son muy informes. También se tienen depósitos de limos llamados loess, con distribución de partículas uniforme, estructura porosa y potencialmente colapsable. Además, la ceniza volcánica también puede ser arrastrada por el viento, su descomposición resulta en limos y arcillas con alta plasticidad y compresibles. En nuestro país, debido a la alta actividad volcánica, las cenizas volcánicas se depositan y generan este tipo de limos y arcillas mencionados.
- Suelos orgánicos: en zonas bajas con presencia de nivel freático genera el crecimiento de plantas que, al desimponerse, forman un suelo orgánico con características como alta humedad y compresibilidad.

En la Figura 25 se muestra un esquema del ciclo de formación suelo-roca, en la cual se muestra el proceso de formación de cada tipo de roca y suelo mencionados.

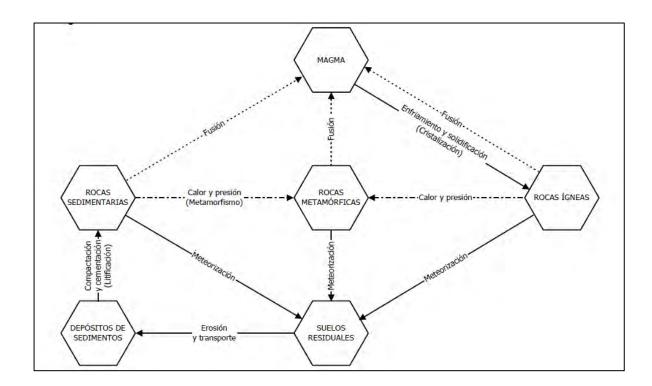


Figura 25. Proceso de formación de rocas y suelos Fuente: Vargas, 2010

2.1.2. Formación de minerales arcillosos

Los minerales son el constituyente más importante de las rocas y suelos, a partir de la meteorización mecánica y químicas, los suelos quedan formados por minerales provenientes de las rocas, según Vargas (2010), algunos de los minerales más comunes en las rocas se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Minerales presentes en las rocas y suelos

Mineral	Propiedades		
Dióxido de silicio SiO ₂	Uno de los minerales más importantes de las rocas y los suelos, este se puede presentar en la naturaleza en forma cristalina (cuarzo) y amorfa (pedernal, sílex y calcedonia). Este mineral es insoluble en agua, dura, tenaz, sin exfoliación y resiste la meteorización química y mecánica.		
Feldespatos	Constituido por polisilicatos de aluminios y potasio, sodio y calco, Se caracterizan por ser frágiles, con planos de exfoliación pronunciados y se rompen fácilmente.		

Cuadro 5. Minerales presentes en las rocas y suelos (continuación)

Micas	Normalmente contienen hierro, magnesio y potasio. Son blandas, flexibles, se separan y rompen fácilmente para formar láminas más pequeñas y finas
Ferromagnesianos	Mineral duro y resistente compuesto con silicatos complejos de aluminio, hierro y magnesio. Físicamente se rompen en fragmentos y presentan exfoliación pronunciada.
Óxidos e hidróxidos de hierro	Puede estar presentes originalmente en las rocas o ser producto de la meteorización, ya sea en estado ferroso o férrico.
Carbonatos minerales	La calcita y dolomita se presentan en forma cristalina y se rompen mecánicamente en fragmentos irregulares y prismáticos.

Fuente: Vargas, 2010

La descomposición de los materiales presentes en el Cuadro 5 se produce por reacciones químicas provocadas por factores como la humedad, temperatura, ambiente, presión, entre otros. La mayoría de los minerales arcillosos son de grano fino con una estructura cristalina definida, Según Das (2015), los minerales arcillosos más comunes son: caolinita, ilita, montmorillonita, clorita, haloisita, vermiculita y alofana. En el Cuadro 6 se describen las principales propiedades de los minerales mencionados.

Cuadro 6. Minerales presentes en los suelos arcillosos

Mineral	Características
arcilloso	
Caolinita	 Compuesta por una lámina tetraédrica silícica y una octaédrica alumínica. Bien equilibradas eléctricamente y solo se presenta sustituciones isomorfas limitadas, con láminas muy unidas que se apilan como las hojas de un libro. Se presentan por lo general en suelos muy meteorizados en forma de partículas muy finas y estables, debido a su baja capacidad de retención de agua. Los suelos con este mineral se consideran poco cohesivos, debido a su poca capacidad de absorber agua y desarrollar plasticidad.
Ilita	 Formada por una lámina octaédrica entre dos tetraédricas. Se presentan comúnmente en las lutitas y otros depósitos de arcillas que sufrieron cambios ambientales. Son el producto de la alteración de otros minerales arcillosos y su presencia genera suelos expansivos.

Cuadro 7. Minerales presentes en los suelos arcillosos (continuación)

Montmo-	Compuesta de una lámina alumínica y dos silícicas.
rillopito	 Presentan una substitución isomorfa abundante, donde cada una de ella
rillonita	produce un mineral distinto.
	 Por lo general, se forman en zonas con altas temperaturas y lluvias intensas
	con periodos secos prolongados, donde hay rocas ferromagnesianos, como las
	volcánicas.
	 Los suelos con este mineral presentan un alto potencial de expansión, ya que
	tienen una alta afinidad electroquímica con el agua, que, cuando ocurren
	cambios en la humedad, producen cambios volumétricos.
Clorita	Estructura micácea.
	 Presenta substituciones isomorfas.
Haloysita	 Miembro de la familia de la caolinita, su estructura química es similar, pero con
	estructuras tubulares so esféricas.
	Es un producto de la transición en el proceso de meteorización de las cenizas
	volcánicas.
	 En Costa Rica, la meteorización de las cenizas volcánicas tiene como resultado
	limos con potencial de colapso cuando se saturan.
Vermiculita	Estructura micácea.
	Muy similar a la montmorillonita.
	 Presenta substituciones isomorfas.
Alófana	Se forma a partir de la alteración de los minerales de las rocas ígneas.
	 Mineral poroso que facilita el lavado de los suelos y que puede generar que el
	suelo sea pobre.
	 Presenta baja plasticidad debido a la disminución de la humedad, y cuando se
	secan sus características mecánicas presentan un cambio significativo.

2.2. Permeabilidad de los suelos

La permeabilidad de un suelo se define según la facilidad con la que el agua de lluvias u otras fuentes pueden fluir a través de sus partículas, llegando a cierta profundidad donde se acumula el agua y satura el material (Figura 26). Esta profundidad donde se encuentra la acumulación de agua es conocida como nivel freático, es común que los suelos por debajo de este nivel se encuentran 100% saturados. Sin embargo, cuando se trata de suelos finos, como los presentes en la GAM, es posible encontrar suelos completamente saturados por encima del nivel freático, debido al fenómeno de capilaridad (Vargas, 2010).

La profundidad a la que se encuentra el nivel freático varía con las estaciones climáticas, es de esperar que durante la época lluviosa se encuentren niveles más superficiales y durante la época seca más profundos. Esto puede variar según la permeabilidad de los suelos, ya que, si se trata de un suelo poco permeable, la acumulación de agua va a ser mayor que en un suelo

permeable. Además, es importante destacar que, cuando existen zonas con un estrato de suelo permeable con un o impermeable encima, es común que generen niveles freáticos colgados o en condición "artesiana" (Vargas, 2010), como se muestra en la Figura 27 y Figura 28.

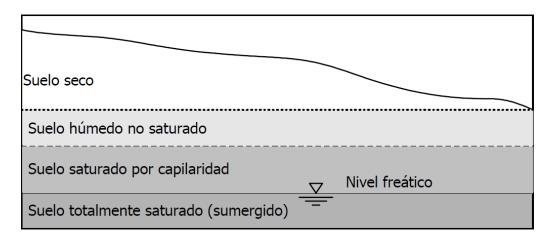


Figura 26. Nivel freático Fuente: Vargas, 2010

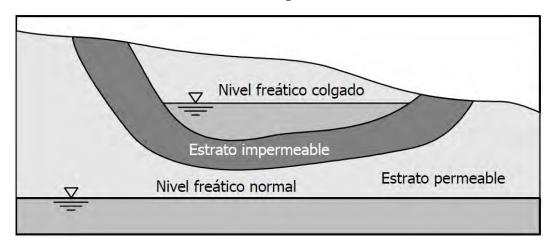


Figura 27. Nivel freático colgado Fuente: Vargas, 2010

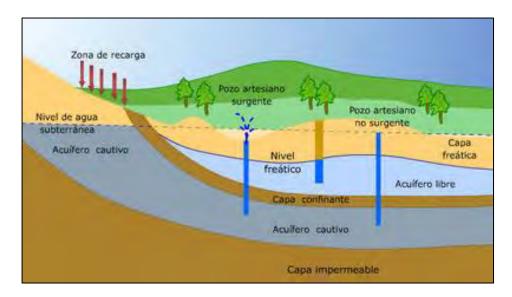


Figura 28. Nivel freático en condición artesiana o cautiva Fuente: Hidro Ambiente, 2020

La permeabilidad vería según el tamaño de las partículas de los suelos o su relación de vacíos, entra más finos sean menos permeables son, como el caso de las arcillas, y entre más grueso más permeable son, como el caso de las arenas y gravas. Además del tamaño de las partículas, otros factores que influyen en la permeabilidad son la porosidad, la orientación de las partículas y las trayectorias de flujo, el grado de saturación, propiedades del fluido como viscosidad y densidad, entre otros (Vargas, 2010). En la GAM de nuestro país, predominan los suelos finos como limos y arcillas, donde los limos son un poco más permeable que las arcillas. En el Cuadro 8 se muestra los coeficientes de permeabilidad (k) de algunos suelos.

Cuadro 8. Valores típicos del coeficiente de permeabilidad de los suelos naturales

Tipo de suelos	Coeficiente de permeabilidad (cm/s)
Arcilla	<10 ⁻⁷
Arcilla arenosa	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁶
Limo	10 ⁻⁸ -10 ⁻⁷
Turba	10-7-10-4
Arena fina	10-4-10-2
Arena gruesa	10 ⁻² -10 ⁻¹
Arena gravosa	10 ⁻¹ -10 ⁰
Grava	>100

Fuente: Berry & Reid, 1993

2.3. Taxonomía de suelos

En Costa Rica existe una gran diversidad de suelos, a pesar de que la extensión territorial o superficie sea pequeña, en comparación con otros países, y que se caracteriza por una geología joven. Esto se debe a la variabilidad de materiales, relieves heterogéneos, condiciones climáticas y biológicas (Bertsch, Henríquez & Mata, 1993).

La clasificación de los suelos simplifica el manejo de las propiedades de cada uno de ellos y su ubicación en el territorio nacional. En nuestro país se utilizan las clases propuestas por La Taxonomía de Suelos del USDA, la cual se compone de 11 grupos de órdenes de suelos, en Costa Rica se encuentran 9 de estos grupos (Cuadro 9), sin embargo, solo se describirán los 6 órdenes que cubren prácticamente la totalidad del territorio. En la Figura A 1 de los anexos, se muestra el mapa de órdenes de suelos a lo largo del territorio nacional.

Cuadro 9. Extensión aproximada de los órdenes de suelos en Costa Rica

Orden	Extensión (Km²)	Porcentaje (%)
Iceptisoles	15642	38.6
Ultisoles	8402	21.0
Andisoles	5874	14.4
Entisoles	4963	12.4
Alfisoles	3857	9.6
Vertisoles	621	1.6
Molisoles	546	1.4
Histosoles	390	1.0
Espodosoles	62	0.2

Fuente: (Bertsch, Henríquez & Mata, 1993)

Cuadro 10. Propiedades de los suelos Inceptisoles

Orden	Iceptisoles
Origen	Es posible distinguir una secuencia de horizontes moderadamente desarrollados, sin embargo, sus características no son acentuadas.
Distribución, extensión y uso	Cubre un 38.6% del territorio y se distribuye por todo el país. Permiten la producción agropecuaria de diferentes productos como el banano, palma de aceite, caña de azúcar, entre otros.
Propiedades mineralógicas, físicas y nutricionales	No predomina ningún material en especial, lo que más se encuentra en ellos son mezclas de varios tipos de arcillas y minerales primarios.

Fuente: (Bertsch, Henríquez & Mata, 1993)

Cuadro 11. Propiedades de los suelos Ultisoles y Alfisoles

Orden	Ultisoles y Alfisoles						
Origen	Se originan por grandes cantidades de precipitación durante un periodo						
	prolongado. Se caracteriza por la formación de un horizonte de						
	acumulación de arcilla iluviada (que migra de la superficie al fondo).						
	Pertenecen a los suelos más antiguos y meteorizados del país.						
Distribución,	Cubren 31% del país (21% Ultisoles y 10% Alfisoles). Se produce						
extensión y uso	prácticamente toda la piña del país. Los Ultisoles se encuentran en la zona						
	norte del país (Sarapiquí, San Carlos, Cutris), en el sur (Prez Zeledón,						
	Buenos Aires) y en la Cordillera de Talamanca.						
	Los Alfísoles se ubican en la Península de Nicoya y Pacífico Central (Atenas,						
	Orotina, San Mateo).						
Propiedades	Dominancia de arcillas coalinita, con buenas condiciones físicas, como su						
mineralógicas, físicas	estructuración y drenaje natural.						
y nutricionales	Suelos con baja fertilidad, debido a que son suelos ácidos con problemas						
	de toxicidad.						

Fuente: (Bertsch, Henríquez & Mata, 1993)

Cuadro 12. Propiedades de los suelos Andisoles

Orden	Andisoles
Origen	Suelos derivados de materiales volcánicos con enriquecimiento nutricional
	constante. Presentan buen drenaje y por lo general están asociados a
	limos colapsables y suelos blandos.
Distribución,	Se encuentran en el Valle Central y las faldas de sus volcanes, faldas de
extensión y uso	la Cordillera de Guanacaste y la región entre Coto Brus y Panamá. Se
	desarrolla la producción cafetalera, de caña de azúcar, hortalizas, flores,
	fresa
Propiedades	Predomina la arcilla alofana, la cual es muy reactiva. En relieves
mineralógicas, físicas	intermedios puede llegar a formar hailosita.
y nutricionales	Sus propiedades físicas son muy buenas, con buen drenaje, retención de
	la humedad y baja densidad aparente.
	Son suelos muy fértiles.

Fuente: (Bertsch, Henríquez & Mata, 1993)

Cuadro 13. Propiedades de los suelos Entisoles

Orden	Entisoles						
Origen	Suelos con menor desarrollo, es decir, que no es posible identificar una secuencia de horizontes definido. Suele encontrarse en las zonas más altas						
	de las montañas.						
Distribución,	Cubre cerca de 12% del territorio. No se recomiendan para actividades						
extensión y uso	agropecuarias, ya que suelen estar cerca de ríos, presentan pocas						
	propiedades nutritivas y fuertes pendientes.						
Propiedades	Suelos con poca profundidad radical, exceso de humedad y alta						
mineralógicas, físicas							
y nutricionales	susceptibilidad a erosión hídrica y/o eólica.						

Fuente: (Bertsch, Henríquez & Mata, 1993)

Cuadro 14. Propiedades de los suelos Vertisoles

Orden	Vertisoles						
Origen	Para su formación es necesario una zona depresional que impida el						
	drenaje, suelos ricos en Si, Ca y Mg. Estas condiciones propician la						
	formación de arcillas montmorillonitas, que, por sus propiedades						
	expansivas, favorecen la inversión constante de los materiales. Además,						
	estos suelos poseen una permeabilidad muy baja.						
Distribución,	Se expande en solo 2% del territorio, en zonas aledañas al Río						
extensión y uso	tempisque y Bebedero, llanuras aluviales del Pacífico norte, alrededores						
	de Santa Ana y Alajuela.						
	Su principal producto agrícola es el arroz inundado, y en época seca es						
	factible sembrar melón, algodón, soya, entre otros.						
	Son suelos muy fértiles.						
Propiedades	Las arcillas montorillonitas son las más ricas en Si y con propiedades						
mineralógicas, físicas	coloidales muy acentuadas. Son expansivas, con alta cohesión, alta						
y nutricionales	pegajosidad, alta plasticidad y gran capacidad para retener agua.						

Fuente: (Bertsch, Henríquez & Mata, 1993)

En la Figura 29 se muestra la distribución de los órdenes de suelo en la Gran área Metropolitana de Costa Rica.

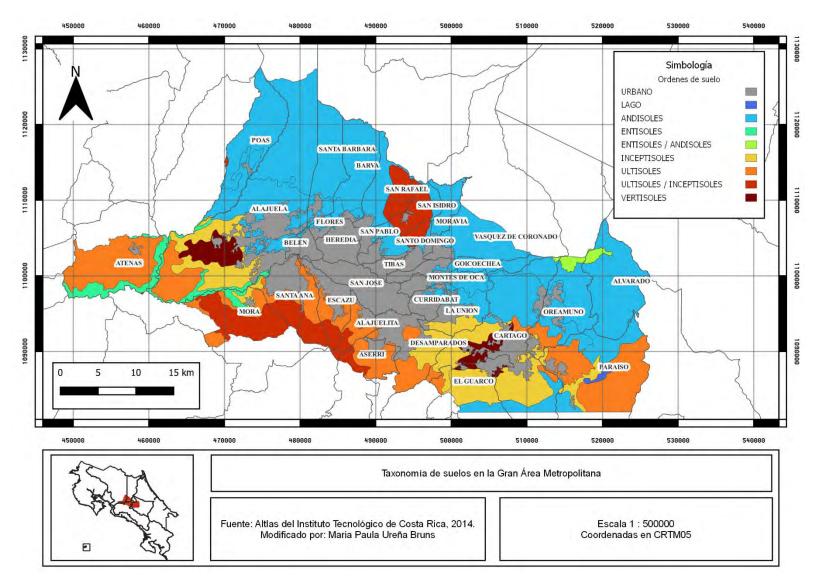


Figura 29. Mapa de órdenes de suelos en la GAM

2.4. Principales suelos en Costa Rica

El Valle Central y otras zonas de Costa Rica, presentan diversos tipos de suelos afectados por todos los factores mencionados. El Código de Cimentaciones de Costa Rica (2009) señala que "es posible generalizar que las topografías escarpadas corresponden a suelos residuales originados de la alteración de la roca madre y con depósitos coluviales producto de la erosión y deslizamientos de otros terrenos. Mientras que, las zonas planas o plano-onduladas corresponden a suelos transportados, como depósitos aluviales, coluvio-aluviales, llanuras de inundación, mesetas o valles, entre otros".

El conocimiento geotécnico de los suelos es necesario para el diseño de cualquier obra de ingeniería. Además, en los últimos años se ha presentado una expansión socioeconómica que trae también como consecuencia, un aumento de la cantidad y tamaño de las obras civiles. En muchas ocasiones, la falta de conocimiento de los suelos ha provocado la falla de estructuras y grandes pérdidas económicas e incluso de vidas. El CCCR (2009) establece tipos de suelos que comúnmente presentan problemas en el Valle Central, estos son:

a) Arcillas de alta expansividad

Consisten en suelos transportados o residuales, color negro, café amarillento y gris oscuro o claro. Se encuentran presentes en una gran parte del territorio nacional, algunos de los sitios donde se identificaron arcillas de alta expansividad son: Desamparados, Alajuelita, Escazú, El Coyol de Alajuela, Siquiares, Santa Ana. En Cartago aparecen hacia el sur del cantón, principalmente en la zona con topografía planas. Su propiedad principal es la expansión o hinchamiento, que las hace capaz de levantar losas, pisos, pavimentos, entre otros. Además, pueden sufrir asentamientos cuando disminuye su humedad.

Estas arcillas pueden originarse por la depositación en áreas bajas de materiales principalmente orgánicos, originados por la erosión, meteorización o actividad orgánica de los suelos piroclásticos. Es común que los espesores de arcilla ronden entre los 0.5 y 4 m, y que se compongan de bloques de rocas, como ignimbritas, materiales aluviales o laháricos, envueltos en una matriz arcillosa (Laporte, 2007).

El fenómeno de expansión que sufren este tipo de arcillas depende de su composición mineralógica, descrita en el apartado 2.1.2. Esta expansión o presión de hinchamiento ocurre únicamente bajo una expansión libre y un cambio de humedad desde el límite de contracción hasta la saturación o máxima humedad de campo (Laporte, 2007). Es decir, si no hay cambio

en la humedad, no hay presión de hinchamiento, o si no se permite la expansión libre por medio de una presión vertical, se anula esta presión de hinchamiento.

El potencial de expansión y presión de hinchamiento de un suelo puede determinarse mediante diferentes maneras, en la sección 3.2.3.1 se describe la clasificación del potencial de expansión utilizado para la presente zonificación.

b) Limos de baja resistencia

Dentro de los limos de baja resistencia están los limos colapsables, que bajo saturación total su estructura colapsa súbitamente en presencia de un sismo. Se han encontrado estos tipos de suelos en algunas zonas de Coronado, Curridabat y Tres Ríos. Otros limos arcillosos de baja resistencia pueden presentar espesores de suelos de hasta 9 m y valores N_{SPT} de 1 a 5 golpes, estos se han encontrado en zonas como Alajuela, Grecia y Naranjo. Se detectan fácilmente al presentar cambios drásticos en sus límites de plasticidad en su estado natural, otras de sus características son sus pesos volumétricos bajos de hasta 7 kN/m³.

Los limos colapsables se originan de la alteración de cenizas volcánicas y materiales piroclásticos, entre las características más comunes está una alta relación de vacíos, alta permeabilidad, alta humedad natural, además, pueden sufrir el fenómeno de colapso (Laporte, 2007). Como ya se mencionó, en la GAM se pueden encontrar estos tipos de limos en diferentes zonas, es muy importante conocer sus propiedades para evitar daños en las estructuras y sobrecostos en los proyectos.

c) Suelos granulares finos de baja densidad

Relacionado principalmente a depósitos marinos, aluviales y eólicos, se encuentran como capas de arena final, mal graduadas, de baja densidad que, junto a niveles freáticos cercanos a la superficie y presencia de sismos, pueden perder resistencia y sufrir el fenómeno conocido como licuación o licuefacción. Algunas zonas que presentan esta amenaza se encuentran en las costas del Caribe, en las llanuras aluviales de los ríos grandes y algunas áreas de la costa Pacífica.

Las zonas donde se encuentran estos tipos de suelos quedan fuera del alcance de este proyecto final de graduación.

d) Suelos tixotrópicos

Algunos limos y arcillas sufren cambios en su comportamiento geotécnico debido a vibraciones producidas por la energía aplicada en el método de perforación SPT. Este comportamiento se debe a la sensibilidad del suelo (tixotropía), la generación de presión de poro o a la combinación de ambos fenómenos. Se destaca este comportamiento en limos y arcillas de origen marino (Moín en Limón, Laureles de Corredores) y en los limos haloysiticos (Faldas de la Cordillera Volcánica Central y de Guanacaste). Este fenómeno puede dar problemas de interpretación, como subestimar la resistencia del suelo.

2.5. Condiciones geológicas y geotécnicas en la Gran Área Metropolitana

Según lo mapas geológicos presentes en el Atlas del Instituto Tecnológico de Costa Rica (2014), la Gran Área Metropolitana está constituida por materiales de los periodos Cretácico, Terciario y Cuaternario, donde predominan los del último periodo mencionado.

Entre los materiales del periodo Terciario están las rocas de origen sedimentario, volcánico e intrusivo. Las sedimentarias provienen de las formaciones:

- Térraba, compuesta de lutitas, areniscas tobáceas, conglomerado y turbiditas.
- Pacacua, constituida por interestratificaciones de conglomerados brechosos y areniscas,
 limolitas y lutitas, todas tobáceas.
- Coris, la cual contiene capas delgadas de lutita y arenisca cuarzosa.

Las rocas sedimentarias del periodo terciario, y las tres formaciones mencionadas, se pueden encontrar en los cantones de San José, Escazú, Mora, Santa Ana, Alajuelita, Desamparados, La Unión, Cartago y Paraíso.

Las rocas volcánicas del periodo Terciario provienen de las formaciones:

- Aguacate, compuesta principalmente por coladas de andesita, basalto, aglomerados, brechas y tobas.
- Doan, compuesta de aglomerados, tobas duras, conglomerados volcano clásticos brechosos de andesita y basalto, lutitas, entre otros.

Estas se pueden encontrar en el sector sur de Desamparados, El Guarco, Paraíso, Cartago, Alajuela y Atenas.

Por último, las rocas intrusivas del periodo terciario, como dioritas cuárcicas, gabro y granitos, se pueden encontrar en Escazú, Mora, Santa Ana, Alajuelita, Aserrí, La Unión, Desamparados y Curridabat (Castillo, 1993).

En cuanto a los materiales del periodo Cuaternario se encuentran rocas de origen volcánico y sedimentario. Las rocas volcánicas corresponden a Lahares, los cuales comprenden la mayoría de territorio de Goicochea, el sureste de Vásquez de Coronado, parte de Moravia, Montes de Oca y Curridabat. Además, se tiene la formación Edificios Volcánicos Recientes, la cual cubre la mayor parte de la GAM, como la totalidad de los cantones de Tibás, San Pablo, Belén, Flores, Barva, Santa Bárbara, Poás y Alvarado, también se encuentran presentes en Escazú, Santa Ana, Mora, Goicochea, San José, Curridabat, Alajuelita, Vásquez de Coronado, Heredia, Paraíso y Oreamuno. Las rocas volcánicas también corresponden a materiales volcánicos como lavas, tobas y piroclastos, los cuales se extienden por los cantones de Alajuela, Poás, Heredia, Santo Domingo, Barva, Santa Bárbara, San Rafael y San Isidro.

En la Figura 30 se muestra la distribución de las formaciones geológicas mencionadas anteriormente, en la cual se observa que:

- La formación Volcano Reciente es la que cubre mayor parte de la GAM, donde se acumularon materiales volcánicos como lahares y cenizas, producto de la actividad volcánica de la Cordillera Volcánica Central.
- La segunda formación que cubre mayor parte de la GAM es la Aluvial Cuaternaria. La formación Grupo Aquacate está presente en Atenas, El Guarco y al sur de Cartago.
- La formación Peña Negra es posible encontrarla en el sur de Mora, Santa Ana, al norte de Aserrí y el sur de Desamparados.
- La formación Pacacua, también se puede encontrar en Mora, Sanata Ana, Escazú y
 Alajuelita, es importante mencionar que en esta formación los estratos de suelo pueden
 variar desde pocos cm hasta menos de 1 m (Bogantes, 1999). Cerca de estas
 formaciones también es posible encontrar la formación Escazú, específicamente en los
 cantones de Escazú, Aserrí y Desamparados, y la formación Intrusivo Escazú.
- Entre los cantones de Cartago, El Guarco, Desamparados y La Unión se encuentra la formación Coris, en la cual se pueden llegar a encontrar estratos de gran espesor, de hasta 390 m (Bogantes, 1999).
- Al sur de El Guarco es posible encontrar la formación Grifo Alto y al sur de Cartago la formación Terraba.

En la Figura 31 se muestra la descripción geológica de la GAM en la cual se observa que se tiene mayoritariamente rocas volcánicas recientes. En Figura 32 se observa las composiciones geológicas, de la cual es posible determinar que en la GAM se tiene mayoritariamente materiales como coladas de lava, conglomerados, lahares y cenizas volcánicas. Además, como ya se mencionó, geológicamente los materiales de la GAM son fueron formados principalmente en el periodo Terciarios (Figura 33).

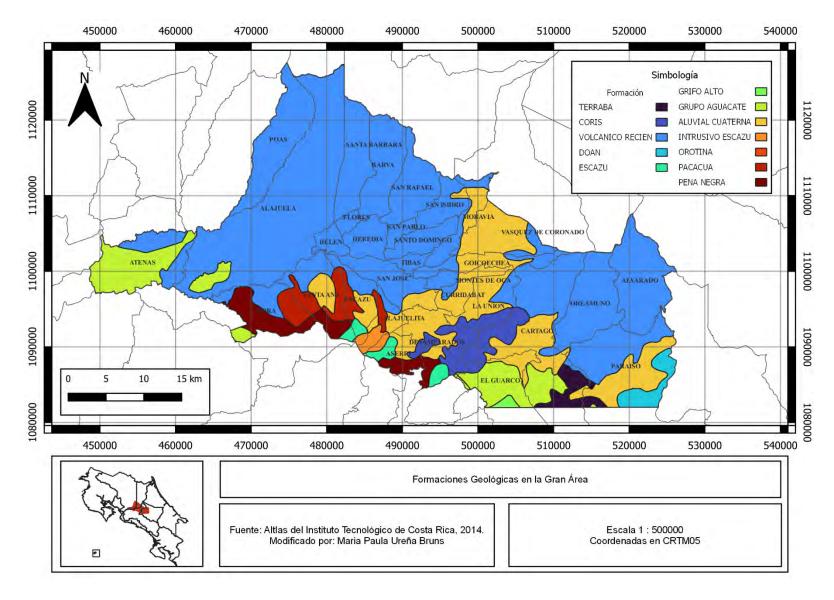


Figura 30. Mapa de formaciones geológicas en la GAM

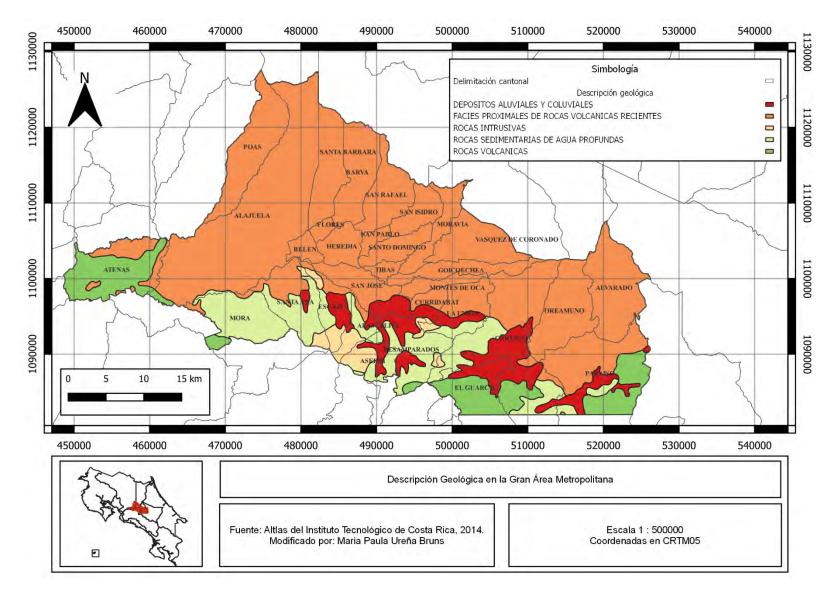


Figura 31. Descripción geológica en la GAM

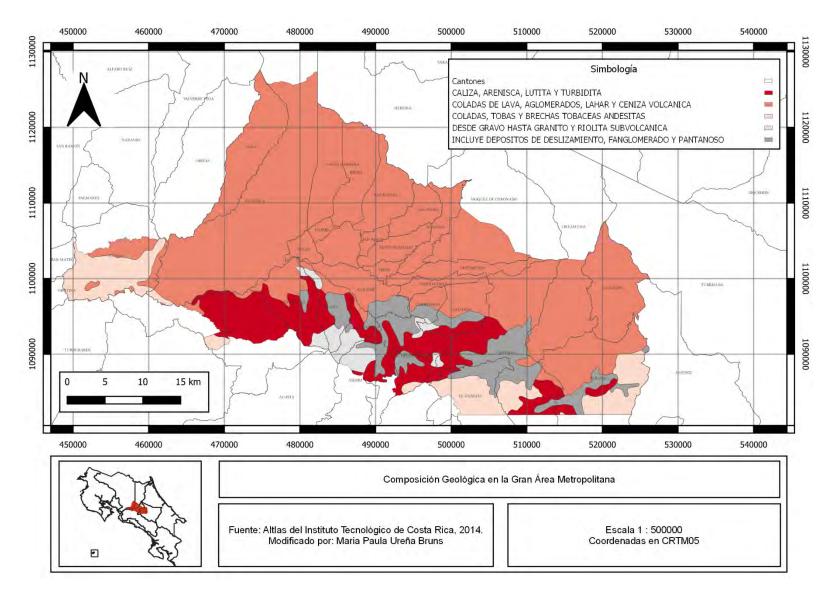


Figura 32. Mapa de composiciones geológicas en la GAM

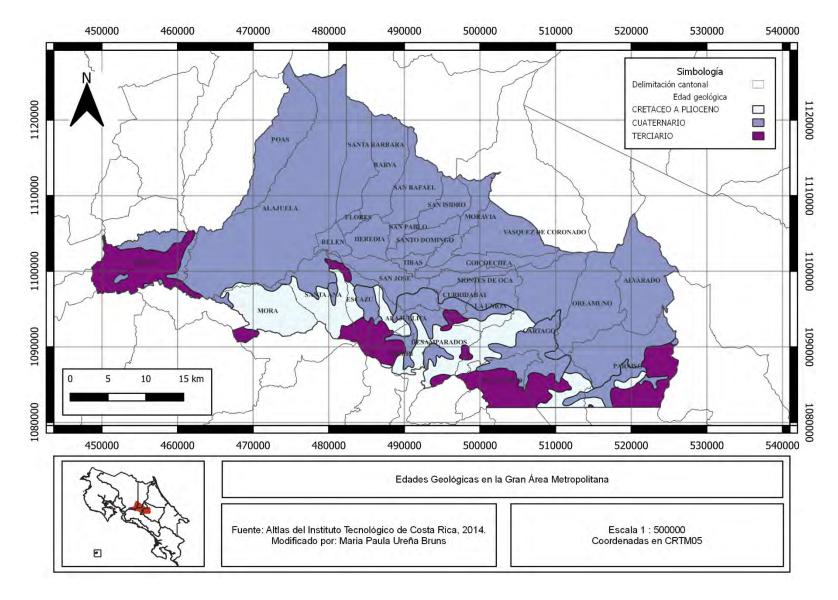


Figura 33. Mapa de edades geológicas en la GAM

2.5.1.1. Caracterización geomorfológica de la GAM

En los cantones de la provincia de San José que forman parte de la GAM se pueden encontrar cuatro unidades geomorfológicas:

- i. Forma de origen volcánico.
- ii. De denudación.
- iii. Originada por acción intrusiva.
- iv. Originada por remoción en masa.

En los cantones de la provincia de Heredia se puede encontrar únicamente la unidad de origen volcánico. En Cartago se pueden encontrar cuatro unidades, estas con:

- i. Unidad de origen tectónico y erosivo.
- ii. De origen volcánico.
- iii. De sedimentación aluvial.
- iv. Por remoción en masa.

Mientras que en Alajuela se tienen tres unidades:

- i. De origen volcánico.
- ii. Estructural.
- iii. De denudación.

En el Cuadro 15 se muestran las subunidades en la que se compone cada unidad, una breve descripción de cada una de ellas (tomada de Madrigal & Rojas, 1980) y los cantones de la GAM que las componen y en la Figura 34 la distribución de cada una de las subunidades geomorfológicas de la GAM.

Cuadro 15. Unidades y subunidades geomorfológicas presentes en la GAM

Unidad	Subunidad	Descripción	Ubicación
	Serranías de ladera de fuerte pendiente	Conformada por laderas de fuerte pendiente susceptibles a deslizamientos debido al grado de meteorización de las rocas volcánicas que la componen.	Cantón de Mora.
	Volcán Irazú	Las pendientes de sus laderas son pronunciadas, superando los 30° en algunas zonas, está compuesta por rocas volcánicas, como brechas, lavas, tobas, aglomerados, ignimbritas, ceniza y también muchas corrientes de lodo y lahares.	Casi la totalidad de los cantones de Goicoechea y Vásquez de Coronado, así como parte de Moravia, Montes de Oca y Curridabat. Noreste de Turrialba.
Origen volcánico	Relleno volcánico del Valle Central	Presenta un relieve plano ondulado conformado en la superficie por rocas sedimentarias, se tiene la presencia de una falla a lo largo de toda la sierra volcánica Central.	Toda la superficie de los cantones San José y Tibás, así como parte de Escazú, Desamparados, Aserrí, Mora, Goicoechea Santa Ana, Alajuelita, Moravia, Montes de Oca y Curridabat. Parte sur del cantón Heredia, las regiones de Santo Domingo, Belén, Flores y San Pablo, también en la zona sur de Barva, Santa Bárbara, San Rafael, San Isidro y La Unión.
	Volcán Barva	Sus laderas tienen pendientes muy variadas, donde su máxima elevación corresponde al volcán que lleva de nombre. En la cima del volcán se observan unos diez pequeños conos y cráteres, compuestos por lavas basálticas, las más antiguas, y andesíticas, las más recientes. Está compuesta de rocas volcánicas como lavas, aglomerados y piroclastos.	Distrito Varablanca del cantón de Heredia y la mayor superficie al norte de los cantones de Barva, Santa Bárbara, San Rafael y San Isidro
	Volcán Turrialba	Las laderas tienen pendientes de fuerte a escarpadas, presenta espacios interfluviales amplios. Es posible, encontrar rocas de composición andesíticas, brechas lávicas, tobas y cenizas en la superficie del terreno.	Norte de Paraíso y al sur de Alvarado y Oreamuno.

Cuadro 16. Unidades y subunidades geomorfológicas presentes en la GAM (continuación)

Unidad	Subunidad	Descripción	Ubicación
Origen volcánico	Colinas irregulares de lava de Cervantes	Está caracterizada por una irregularidad en su superficie, donde encima existe una lava de ceniza reciente. Presenta lomas longitudinales cuyo origen se debe al movimiento de la lava, las cuales están compuestas de rocas del tipo traquiandesita y andesito basáltico, poco alteradas.	Norte de Paraíso y al sur de Alvarado y sureste Oreamuno.
	Volcán Poás	Esta subunidad corresponde al macizo del mismo nombre, el cual es el más grande del país. Se caracteriza por laderas con todo tipo de pendiente, donde es posible encontrar todo tipo de rocas volcánicas, principalmente de composición andesítica.	Cantones de Alfaro Ruiz, Valverde Vega, así como la mayor superficie de la parte Poás y Alfaro Ruiz y Alajuela
Denudación	Lomas de pendiente suave en rocas de la formación Pacacua	Presenta pequeños espacios planos, donde se pueden observar pequeños diques. Esta subunidad está compuesta por rocas muy meteorizadas de la formación Pacacua, por ejemplo, areniscas tobáceas y conglomerados.	Cantón de Alajuelita, Escazú y el distrito de San Juan de Dios de Desamparados
Por acción	Macizo de Escazú	Presenta laderas de fuerte pendiente, con divisorias redondeadas pero muy escarpadas. Está compuesta de rocas ígneas intrusivas y volcánicas muy meteorizadas en la superficie.	Cantones de Escazú, Aserrí, Mora, Santa Ana y Alajuelita
intrusiva	Loma del Alto de las Palomas	Esta subunidad consiste en una loma alargada, con laderas de pendiente suave, las cuales corresponden a la formación Pacacua. Está compuesta por areniscas tobáceas muy meteorizadas.	Cantones de Escazú y Santa Ana
Por acción intrusiva	Cerros de Escazú	Presenta laderas de fuerte pendiente, redondeadas pero muy escarpadas. Se pueden encontrar rocas ígneas intrusivas y volcánicas.	Sureste de Alajuela.
Por remoción en masa	Deslizamiento del Alto de Tapesco	Este deslizamiento se caracteriza por una marcada cicatriz en la parte alta (donde inicia el movimiento), con grietas longitudinales y diferencias de niveles, cuyo origen se debe a una capa arcillosa con profundidad de 10 a 20 m, acompañada de un alto grado de humedad. Está compuesto por rocas muy meteorizadas de la formación Pacacua, como areniscas, conglomerados y lutitas.	Ladera norte del cerro de Escazú en el cantón de Santa Ana

Cuadro 17. Unidades y subunidades geomorfológicas presentes en la GAM (continuación)

Unidad	Subunidad	Descripción	Ubicación
	Deslizamiento en Lajas y Chitaría de Peralta	Presencia de lomas transversales a la pendiente, presenta una superficie muy irregular y desordenada, sin un patrón de drenaje específico. Está compuesta por rocas volcánicas y lahares.	Norte del cantón de Turrialba.
Por remoción en masa	Deslizamiento del río Reventado	Este se ubica en el cauce del río Reventado y el material del deslizamiento cae a este río o en alguno de sus afluentes. Su relieve presenta grietas y cambios bruscos, e cual está compuesto de volcánicas meteorizadas, procedentes del volcán Irazú.	En las nacientes y márgenes del curso medio del río Reventado en Oreamuno y Cartago.
Forma de origen tectónico y erosivo	Cordillera de Talamanca	Consiste en valles profundos con laderas de fuerte pendiente y divisorias angostas. La cordillera está influenciada por fallas y pliegues, por lo que su forma es compleja, además, está compuesta por diferentes rocas de rocas, principalmente rocas viejas de las formaciones San Miguel y Aguacate.	Cantones de Alvarado, Oreamuno, sector norte de Cartago y La Unión, así como el noroeste de Paraíso y Jiménez.
Sedimentación aluvial	Abanico aluvial de río reventado	Esta subunidad se caracteriza por pendientes suaves, entre 3° a 6°, laderas verticales que cortan río Reventado y una gran cantidad de antiguos canales abandonados, los cuales ocasionan un microrelieve muy irregular. Está compuesta por fragmentos subangulares de lava andesítica y lahares, todo esto dentro de una matriz muy piroclástica.	Cantones de Cartago, El Guarco y un pequeño sector de Oreamuno.

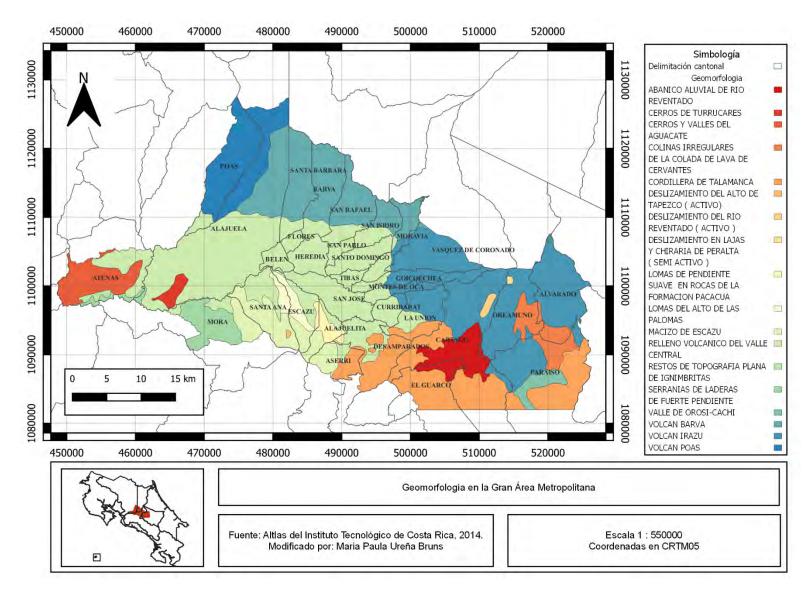


Figura 34. Geomorfología de la GAM

2.5.1.2. Problemas asociados al medio soportante

Siempre que se desarrolle un proyecto ingenieril es importante definir un marco geológico-geotécnico regional, ya que se podrían tratar de zonas inestables, con fallas geológicas, cerca de áreas de inundación, problemas de amplificación símica, entre otras. Además, es importante conocer las características y problemas del medio soportante, ya que el sistema de cimentación dependerá de ellos. Según el CCCR (2009) algunos aspectos que se deben considerar, según el medio soportante son: asentamientos inmediatos generados durante la construcción o por sismos en suelos granulares; efectos de licuación en arenas sueltas, mal graduadas y sumergidas; asentamientos a largo plazo (consolidación) en suelos blandos y arcillosos, así como los efectos de la inestabilidad volumétrica de las arcillas expansivas; asentamientos inmediatos debido al colapso de la estructura del suelo en limos poco plásticos, como los limos colapsables y la amplificación de la onda sísmica o efectos del mal comportamiento dinámico del suelos durante los sismos, principalmente en suelos arcillosos suaves o arenas sueltas, aunque también se puede deber a la topografía de la zona. Por último, es importante considerar las cimentaciones sobre rellenos, ya que, según estadísticas, el mayor número de fallas en las cimentaciones se debe a que están ubicadas sobre rellenos artificiales mal construidos.

2.5.1.3. Requisitos mínimos para la ejecución de estudios geotécnicos

Los estudios geotécnicos tienen como fin caracterizar física y mecánicamente los suelos, con el fin de brindar recomendaciones geotécnicas que podrían determinar la factibilidad de un proyecto ingenieril. Es recomendable realizarlos para edificaciones, movimientos de tierra, rellenos, muelles, estructuras de contención, puentes, excavaciones, entre otros (CCCR, 2009).

En el siguiente diagrama se muestran 3 etapas importantes que se deben considerar siempre que se realiza un estudio geotécnico: naturaleza del proyecto, modelo geotécnico y pruebas de laboratorio.:

- i. Naturaleza del proyecto.
- ii. Modelo geotécnico.
- iii. Pruebas de laboratorio.

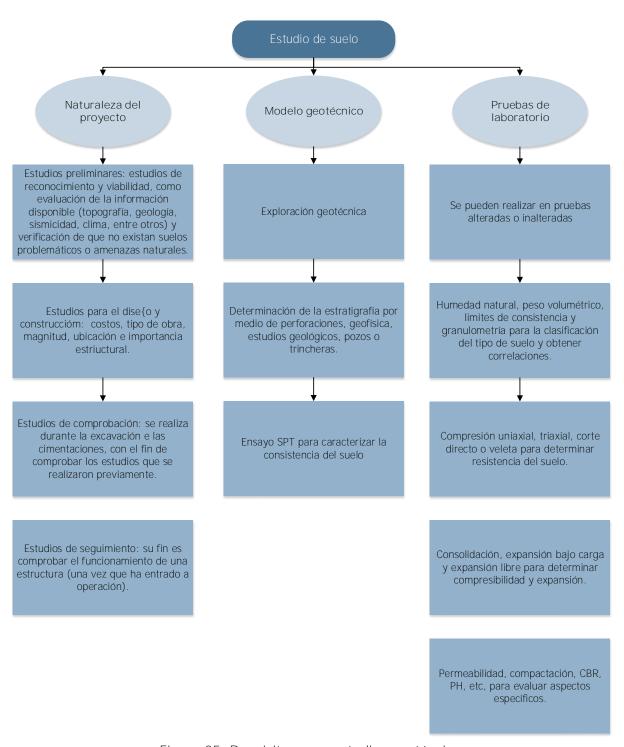


Figura 35. Requisitos para estudios geotécnicos

CAPÍTULO 3

3. MAPAS GEOTÉCNICOS

3.1. Descripción de la base de datos

A través de diferentes estudios geotécnicos realizados a lo largo de la Gran Área Metropolitana, se recopilaron propiedades geotécnicas de los suelos presenten en esta zona del país. Las principales características que componen la base de datos utilizada para la nueva propuesta de zonificación geotécnica de la GAM son el número de golpes obtenido del Ensayo de Penetración Estándar (SPT), humedad natural, límites de Atterberg (límite líquido e índice de plasticidad), clasificación del suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos y el nivel freático, si fue detectado en la perforación.

Los estudios geotécnicos analizados se realizaron desde 1996 hasta el año 2020 por la empresa Ingeotec S.A, la información se recolectó manualmente en los estudios realizados de 1996-2010 y del 2010 al 2020 la información se encontraba de manera digital. Todos los datos se extrajeron de hojas de perforación como la mostrada en la Figura 36, y fueron transcritas a una base de datos realizada en Excel, la cual se muestra en la Figura 37. Luego de recolectar toda la información, se procedió a clasificarla según la terminología descrita en el apartado 3.2.

En el Cuadro 18 se describe cada uno de los datos con los que cuenta la base de datos realizada en Excel.

Cuadro 18. Composición de la base de datos

Propiedad	Descripción							
Proyecto	En esta columna de la base de datos se cuenta con una etiqueta del proyecto							
	del cual se extrajo la información.							
Ubicación	Contiene una ubicación general del proyecto, en algunos casos se indica el							
	cantón, distrito, calle, barrio, nombre de la urbanización, nombre de la							
	institución, entre otros.							
Coordenada X	Incluye la coordenada X en el sistema WGS84.							
Coordenada y	Incluye la coordenada Y en el sistema WGS84.							

Cuadro 19. Composición de la base de datos (continuación)

Propiedad	Descripción
Perforación	Etiqueta utilizada para identificar la perforación analizada, ya que, en algunos
	proyectos se realiza más de una perforación.
Profundidad	Indica la profundidad de donde se realizó la Prueba de Penetración Estándar
	(SPT), o el estrato de donde se extrajo la muestra para los ensayos de humedad
	natural y Límites de Atterberg.
Descripción	Incluye una pequeña descripción visual que se realizó cuando se perforó el
	suelo, se mencionan características como su color, plasticidad, tipo de suelo y
	consistencia, sim embargo, todos estos parámetros son aparentes, es decir, se
	determinaron visualmente.
Número de golpes	Indica el número de goles N del ensayo SPT.
Humedad natural	Indica el porcentaje de humedad natural, determinado a partir del ensayo
	respectivo, descrito en la sección 1.3.2.2.
Límite líquido	Obtenido del ensayo Límites de Atterberg, descrito en la sección 1.3.2.3.
Límite plástico	Obtenido del ensayo Límites de Atterberg, descrito en la sección 1.3.2.3.
SUCS	Clasificación del tipo de suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de
	Suelos (sección 1.3.2.4).
Nivel freático	Incluye la profundidad en la que se detectó el nivel freático.
Estación	La estación lluviosa abarca los meses de mayo a noviembre, mientras que la
	época seca abarca de diciembre a abril.
Potencial de	Indica si el suelo tiene bajo, medio, alto o muy alto potencial de expansión,
expansión	según lo descrito en la sección 3.2.3.1 (Cuadro 22).
Tipo de suelo	Incluye la clasificación del tipo de suelo según lo descrito en el apartado 3.2.3.

Se recopiló la información de 938 proyectos realizados por la empresa Ingeotec S.A, donde de cada uno de ellos se extrajeron los datos obtenidos en varias perforaciones, en total se analizó la información de 2180 perforaciones. Se tienen 17800 datos de humedad natural, ya que en cada perforación se realizaba la prueba en diferentes capas, además, se cuenta con 2095 Límites de Atterberg y 715 niveles freáticos, ya que no en todas las perforaciones fue posible detectarlo. En la Figura 38 se muestra la distribución espacial de las perforaciones en el mapa de Costa Rica.

ngeotec, S. A. INGENIEROS - CONSULTORES GEOTECHIA Y MATERIALES			(T.A., OF W.)				Proyecto:							
U	INGENIEROS - C GEOTECHIA Y	CONSULTORES MATERIALES	PERFIL DE SUI	LOS										
Loc	Localización Sondeo: Início:			1	Vivel Fr	eático								
	7717 19 1 1 1 1 1	Prof.	Final			M:	terial o	orgánic	:0:					
Profund	idad m	Descripción	Lito logía	Gráfico N	N		% IP	LL	C kg/cm ¹	71 kg/m³	SUCS			
0.00 -	0.50		1 -2 -1		-		7 - 1		1					
0.50 -	1.00					1			1					
1.00 -	1.50						4				-			
1.50 -	2.00							-						
2.00 -	2.50					1								
2.50 -	3.00		111			1								
3.00 -	3.50													
3.50 -	4.00						1				-			
4.00 -	4.50		0.11											
4.50 -	5.00		9.14			10								
5.00 -	5.50						1				-			
5.50 -	6.00													
6.00 -	6.50					1								
6.50 -	7.00		F 34											
7.00 -	7.50						-	-						
7.50 -	8.00		1				1				1			
8.00 -	8.50													
8.50 -	9.00													
9.00 -	9.50		74				1							
9.50 -	10.00													

Figura 36. Hoja de perforación de la empresa Ingeotec S.A.

Proyecto	Ubicación	Coordenada 🗸	Coordenada 🗸	Perforacion	Profundidad (m) 🚽	Descripción	Numero de golpes (🚽		Limite Liquid 🚽	Indice de Plasticic 🚽	SUCS	Nivel freético	Estación	Potencial de expansiór 🚽	Tipo de suelo 🚅
IG-81-2006	Condominio Via Cipres, Curridabat	9.9240790207	-84.020983458	P1	1.50	Limo arcilloso de plasticidad media. Color café claro. Consistencia medianamente compacta.	15	36.5	57	11	МН				Limo
IG-81-2006	Condominio Via Cipres, Curridabat	9.9241578095	-84.020920206	P2	2.50	Limo arcilloso de plasticidad media. Color café claro. Consistencia muy blanda.	2		56	9	МН	2.70	Seca		Limo
IG-88-2006	Estadio Ecologico UCR, Sabanilla	9.9444261344	-84.044598316	P1	2.00	Limo arcilloso de plasticidad media. Color café oscuro. Consistencia compacta.	18	32.2	53	23	МН			Alto	Limo
IG-88-2006	Estadio Ecologico UCR, Sabanilla	9.9446914619	-84.044599701	P2	2.00	Limo arcilloso de plasticidad media. Color café oscuro. Consistencia medianamente compacta.	15	36.4	53	21	МН				Limo
IG-88-2006	Estadio Ecologico UCR, Sabanilla	9.9449424121	-84.044538157	P3	3.00	Limo arcilloso de plasticidad media. Color café oscuro. Consistencia medianamente compacta.	15	31.7	58	23	МН			Alto	Limo
IG-96-2006	Sabanilla, San Jose	9.9440904586	-84.029146873	P1	1.50	Limo arcilloso de plasticidad media. Color café claro. Consistencia medianamente compacta.	10		55	25	МН			Alto	Limo
IG-107-2006	Coopecoronado	9.9704534615	-84.022540549	P1	1.50	Limo arcilloso de plasticidad media. Color café oscuro. Consistencia compacta.	20		54	23	МН			Alto	Limo
IG-107-2006	Coopecoronado	9.9704622394	-84.021925200	P3	3.50	Limo arcilloso de plasticidad media. Color café claro. Consistencia muy compacta.	33		54	24	МН			Alto	Limo

Figura 37. Muestra de la base de datos realizada

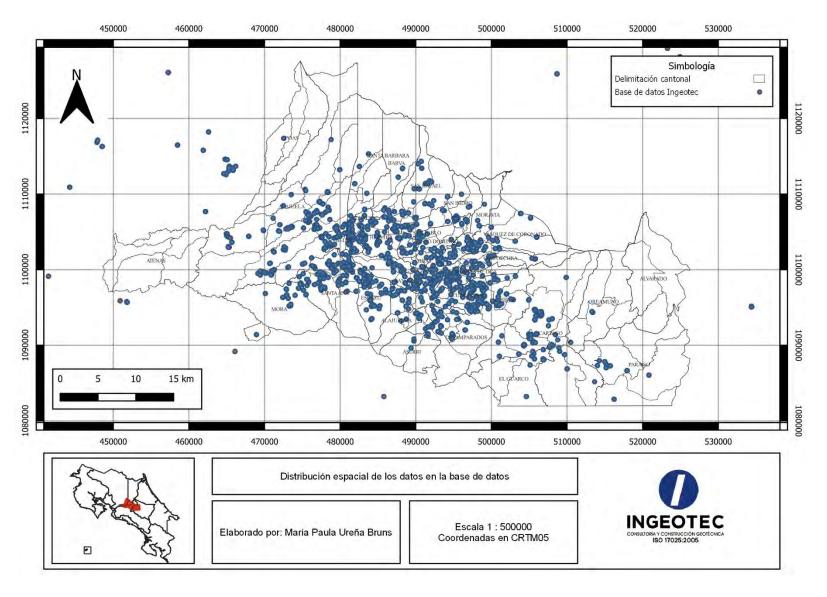


Figura 38. Distribución espacial de los estudios geotécnicos en la GAM

81

3.2. Definición de la terminología

A partir de las diferentes propiedades geotécnicas recolectadas en las diferentes zonas de la

GAM, es posible clasificar cada perforación para elaborar los diferentes mapas. Las

descripciones de los mapas se basan en la terminología utilizada por Bogantes (1999), con el

fin de generar mapas con las mismas características y sea posible un análisis y comparación

de la antigua propuesta de zonificación geotécnica y la actual.

3.2.1. Mapa de espesor de suelo

Se considera espesor de suelo aquella profundidad de una perforación en la cual el número de

golpes es menor o igual a 50, es decir, se considera "rebote" del mazo a un N del ensayo SPT

igual o mayor a 50. Es importante destacar que, la profundidad de las perforaciones depende

de la naturaleza del proyecto, por lo que, bajo este criterio, no siempre se llega al rebote del

mazo en todas las muestras.

3.2.2. Mapa de consistencia

Las pruebas de penetración estándar brindan correlaciones útiles para los ingenieros, como la

consistencia en suelos cohesivos, resistencia al corte no drenada e índice de consistencia (IC).

Szechy y Vargui (1978), citado por Das (2012), calcularon el índice de consistencia como:

$$IC = \frac{LL - w}{LL - LP}$$

Donde:

w = contenido de humedad natural

LL = limite liquido

LP = limite plástico

Mientras que Hara et. al (1971), citado por Das (2012), sugieren la siguiente correlación entre

la resistencia al corte no drenado de la arcilla (Cu) y N:

$$\frac{Cu}{Pa} = 0.29 * N^{0.72}$$

Donde:

 $Pa = presión atmosférica \left(\frac{100kN}{m^2}\right)$

Cu: Resistencia al corte no drenada (kN/m^2)

N: Número de golpes

En el Cuadro 20. Correlación aproximada entre IC, $N\,y\,qu$ se muestras las correlaciones entre IC, $N\,y\,qu$.

Cuadro 20. Correlación aproximada entre IC, Ny qu

Número de penetración estándar, N	Consistencia	IC	Resistencia a la compresión simple, q _u (kN/m²)
<2	Muy blanda	<0.5	<25
2-8	Blanda	0,5-0,75	25-80
8-15	Media	0,75-1,0	80-150
15-30	Firme	1,0-1,5	150-400
>30	Muy firme	>1,5	>400

Fuente: Das, 2012

Sin embargo, la actual zonificación geotécnica se basó en las definiciones utilizadas por Quirós (1985) donde el suelo muy blando es aquel que presenta un SPT menor a 5 hasta 2 m o más de profundidad, suelo blando se define como aquel que presenta número de golpes menor a 10, hasta 2m de profundidad, mientras que, el suelo duro, es el que produce rebote del mazo a menos de 5 m de profundidad. Esta clasificación será la utilizada en la propuesta de zonificación geotécnica a realizar.

En el Cuadro 21 se muestra la clasificación utilizada para el mapa de consistencia de los suelos en la GAM:

Cuadro 21. Consistencia de los suelos cohesivos

Número de penetración estándar	Consistencia		
<5	Muy blanda		
5-10	Blanda		
10-15	Media		
15-30	Firme		
>30	Muy firme		

Fuente: Das, 2012. Quirós, 1985.

3.2.3. Mapa tipo de suelo

3.2.3.1. Arcilla expansiva

A partir de propiedades geotécnicas, como el límite líquido y el índice de plasticidad es posible clasificar el potencial de expansión de los suelos. Para determinar el potencial de expansión de los suelos en la GAM se utilizarán los criterios del Cuadro 22.

Cuadro 22. Clasificación del potencial de expansión de las arcillas

Potencial de	Expansión (%) medida del consolidómetro	Límite líquido	Límite de contracción	Índice de plasticidad	Porcentaje de partículas	Expansión
expansión	bajo presión de 0.07 kg/cm²	LL (%)	(%)	(%)	menores a una micra	libre (%)
Muy alto	>30	>63	<10	>32	>37	>100
Alto	20-30	50-63	6-12	23-45	18-37	>100
Medio	10-20	39-50	8-18	12-34	12-27	50-100
Bajo	<10	<39	>13	<20	<17	<50

Fuente: Herrera, 1998

Debido a que las únicas propiedades que se tienen son el LL e IP, a partir de los datos recolectados, la clasificación del potencial de expansión se basará en las propiedades mencionadas. Todas las arcillas clasificadas como CH (arcilla de alta plasticidad) y con muy alto o alto potencial de expansión, según el Cuadro 22, son clasificadas como arcillas expansivas.

Adicionalmente, se clasificarán como arcillas expansivas aquellos suelos que tengan un límite líquido (LL) mayor a 70 y un límite plástico (LP) menor 30, es decir, un índice de plasticidad (IP) mayor a 40. Esta clasificación la establece el Código de Cimentaciones de Costa Rica (2009), en las propiedades típicas de las arcillas expansivas.

3.2.3.2. Limos colapsables

El potencial de colapso de un suelo está asociado con su estructura, donde la mayoría de los criterios para su clasificación se basan en la relación de vacíos. Sin embargo, no se cuenta con esta información en la base de datos realizada. Debido a esto se utilizará el criterio de Dash (1995), que también fue utilizado por Bogantes (1999), el cual clasifica a un suelo como con potencial de colapso según lo siguiente:

- Humedad natural mayor al límite líquido.
- Suelo muy blando.

Adicionalmente, se clasificarán como limos colapsables aquellos suelos que tengan un límite líquido (LL) mayor a 60 y un límite plástico (LP) menor a 90, es decir, un índice de plasticidad (IP) menor a 30. Esta clasificación la establece el Código de Cimentaciones de Costa Rica, en las propiedades típicas de los limos colapsables.

3.2.3.3. Limos y arcillas

Todos los suelos clasificados como CH y CL, según la clasificación SUCS, que no entren en la clasificación de arcilla expansiva, se clasificarán como arcilla, mientras que, todos los clasificados como ML o MH, pero que no entren en la clasificación de limo colapsable, será clasificado como limo.

3.2.4. Mapa de nivel freático

A partir de las perforaciones analizadas se obtuvo el dato del nivel freático detectado, cuando fue posible encontrarlo, además, se divide en época lluviosa (ensayos realizados de mayo a noviembre) y época seca (ensayos realizados entre noviembre y abril). Debido a que los datos son obtenidos de perforaciones para ensayos SPT no siempre fue posible encontrar el nivel freático, además, las profundidades de los niveles freáticos detectados son menores a las planteadas por Bogantes (1999), ya que las utilizadas por él fueron obtenidas mediante pozos profundos para explotación de agua, por lo que las profundidades son mayores.

3.3. Mapas resultantes

3.3.1. Mapa de espesor de suelo

Cada una de las perforaciones analizadas contiene un ensayo SPT, con los resultados de esta prueba se realizó el "Mapa de espesor de suelo", donde el fondo del suelo se consideró como la profundidad donde se alcanzó un número de golpes N igual o mayor a 50, donde en 697 perforaciones se alcanzó ese valor. En total se obtuvieron 1543 puntos donde se alcanzó ese número de golpes en el ensayo, ubicados a lo largo del territorio de la GAM, únicamente no se tienen datos para los cantones de Alvarado, Atenas y Poás, además, otros cantones con un poco densidad de puntos son Aserrí, Barva, El Guarco, Oreamuno, Paraíso, Santa Bárbara y Vásquez de Coronado. Mientras que los cantones con mayor cantidad de datos son San José, Santa Ana y Alajuela. En la Figura 39 se muestran la cantidad de datos por cantón de la GAM y en la Figura 40 la distribución espacial de estos.

Con el fin de verificar los valores obtenidos con la interpolación de los datos, se obtuvo la desviación estándar en cada perforación con el valor exacto obtenido con los estudios geotécnicos y el obtenido con la interpolación. La máxima desviación estándar obtenida fue de 5%, esto indica que los valores de la interpolación son bastante confiables, respecto a los valores puntuales analizados. Si los valores obtenidos por la interpolación difirieren a los obtenidos en los ensayos analizados, se considera que los resultados del mapa no son confiables. Del mapa de espesor de suelo, únicamente un 15% de los datos tuvieron una desviación estándar entre 1 y 5%, es decir, el 85% tiene una desviación menor al 1%, por lo que los datos son confiables.

En la Figura 41 se muestra el mapa resultante "Mapa de Espesor de suelo en la Gran Área Metropolitana". En los anexos se muestra la versión ampliada del mapa realizado y el elaborado por Bogantes (1999).

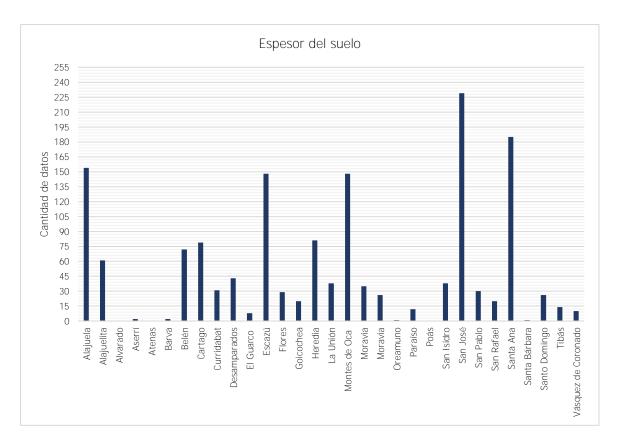


Figura 39. Cantidad de datos por cantón para realizar el mapa de espesor de suelo

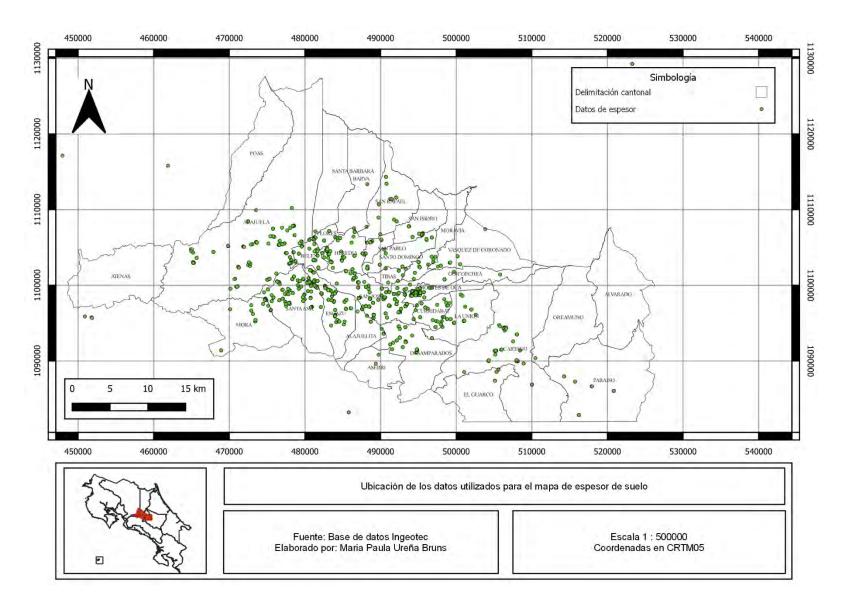


Figura 40. Distribución espacial de los datos utilizados para elaborar el mapa de espesor de suelo

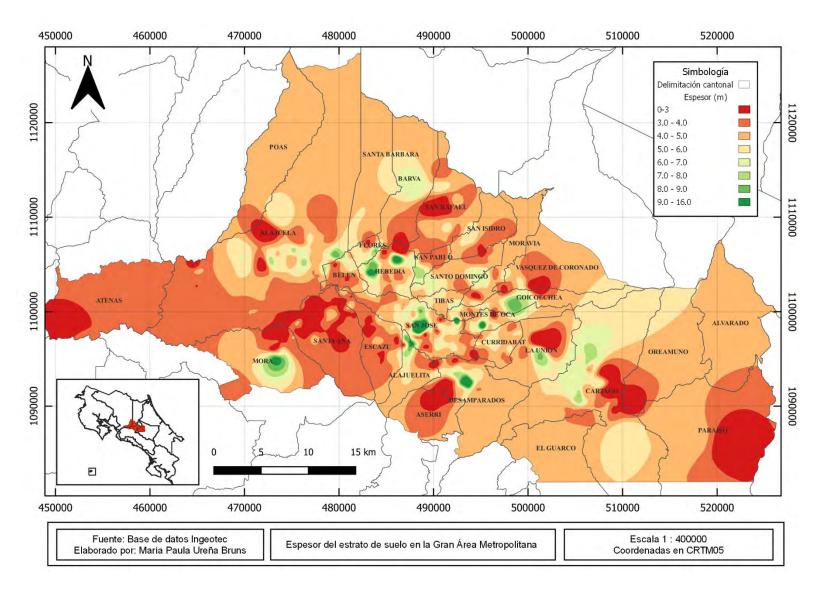


Figura 41. Mapa de espesor de suelo

3.3.2. Mapa de consistencia o resistencia al ensayo de penetración estándar

Para este mapa se analizaron los resultados del ensayo de penetración estándar, clasificando el suelo en "Muy blando", "Blando", "Intermedio", "Firme" y "Muy firme", según lo descrito en la sección 3.2.2. Adicionalmente, se dividió en tres estratos de suelo con el fin de conocer el comportamiento de la consistencia del suelo según la profundidad en la que se realizó la prueba SPT.

El primer estrato comprende desde los 0 a los 2 m, en total se recolectaron 5811 datos de número de golpes, distribuidos a lo largo de la GAM. Únicamente no se cuenta con datos en los cantones de Alvarado y Atenas, y se tiene pocos datos en Poás. Mientras que, los cantones con mayor cantidad de puntos son San José, Santa Ana y Alajuela. En Figura 42 se muestran la cantidad de datos por cantón de la GAM para mapa de consistencia de suelo en un estrato de suelo de 0 a 2 m y en la Figura 43 la distribución espacial de estos.

Con el fin de verificar los valores obtenidos con la interpolación de los datos, se obtuvo la desviación estándar en cada perforación con el valor exacto obtenido con los estudios geotécnicos y el obtenido con la interpolación. La máxima desviación estándar obtenida fue de 38.4%, sin embargo, de 1548 perforaciones, solo 99 obtuvo una desviación por encima del 10%. Esta desviación se debe a que en cada perforación se interpoló el promedio de Número de golpes, la cual consisten en una ponderación aritmética realizada por el programa QGIS, obtenidos de 0 a 2 m, y en algunas ocasiones, especialmente donde existen suelos firmes, la variación entre los datos de los primeros 2 m de espesor son muy variables.

En la Figura 44 se muestra el mapa resultante "Mapa Consistencia de los Suelos en la Gran Área Metropolitana (profundidad de 0 a 2 m). En los anexos se muestra la versión ampliada del mapa realizado.

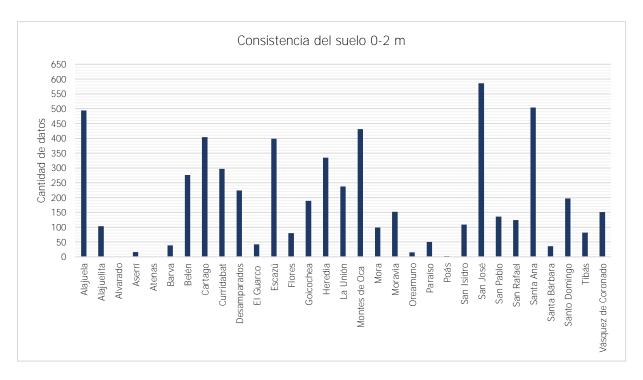


Figura 42. Cantidad de datos por cantón para realizar el mapa de consistencia del suelo de 0 a 2 m

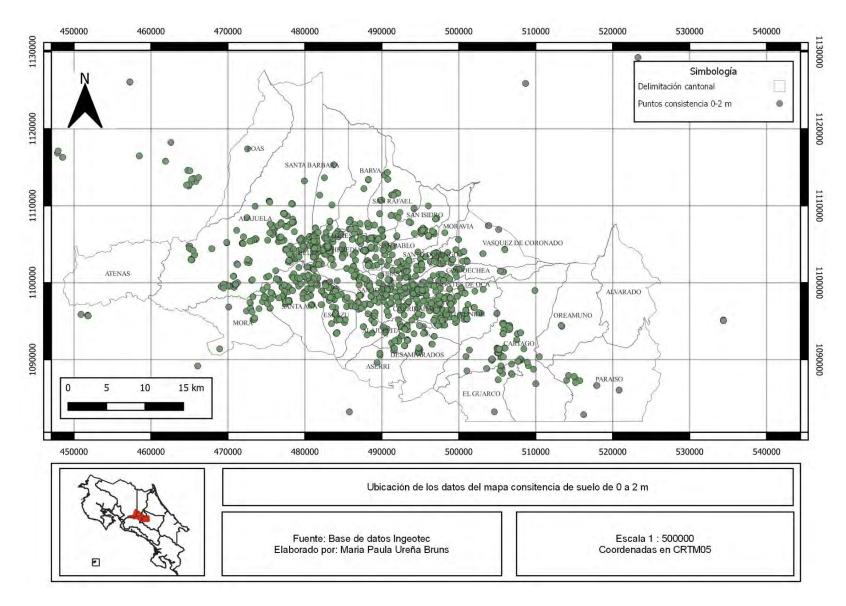


Figura 43. Distribución espacial de los datos utilizados para elaborar el mapa de consistencia del suelo en un estrato de 0 a 2 m

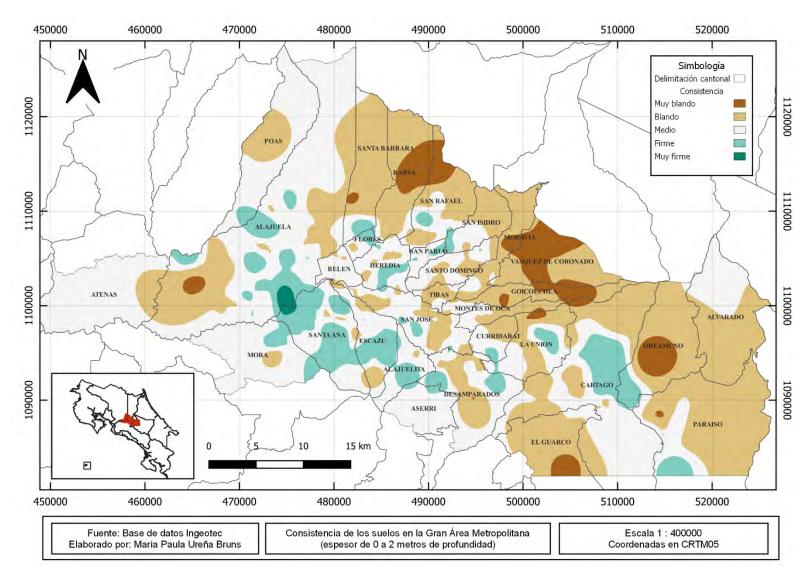


Figura 44. Mapa de consistencia del suelo en la GAM (espesor de 0 a 2 m de profundidad)

El segundo estrato abarca desde los 2 hasta los 5 m, en los cuales se recolectaron un total de 10017 puntos con un número de golpes asociado. Los cantones con mayor cantidad de puntos son San José, Alajuela y Montes de Oca. No se cuenta con datos en los cantones de Alvarado, Atenas, y se tiene poca información en el cantón de en Poás. En la Figura 45 se muestran la cantidad de datos por cantón de la GAM para mapa de consistencia de suelo en un estrato de suelo de 2 a 5 m y en la Figura 46 la distribución espacial de estos.

Con el fin de verificar los valores obtenidos con la interpolación de los datos, se obtuvo la desviación estándar en cada perforación con el valor exacto obtenido con los estudios geotécnicos y el obtenido con la interpolación. La máxima desviación estándar obtenida fue de 93.6%, de 1531 perforaciones, en 300 se obtuvo una desviación por encima del 10% y 130 por encima del 20% Esta desviación se debe a que en cada perforación se interpoló el promedio de número de golpes obtenidos de 2 a 5 m, y en este estrato analizado el valor de N varía significativamente conforme aumenta la profundidad.

En la Figura 47 se muestra el mapa resulta**nte "Mapa Consistencia de los Suelos en la Gran** Área Metropolitana (profundidad de 2 a 5 m).

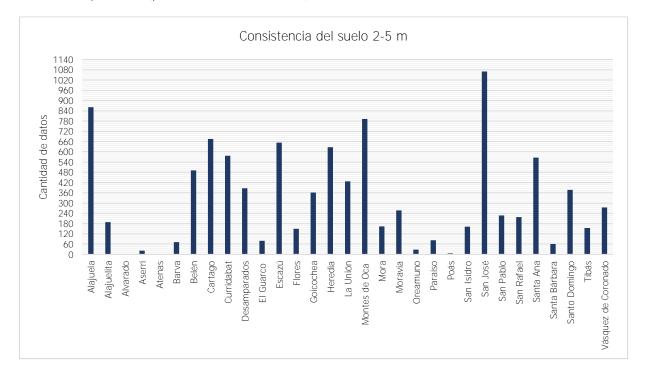


Figura 45. Cantidad de datos por cantón para realizar el mapa de consistencia del suelo de 2 a 5 m

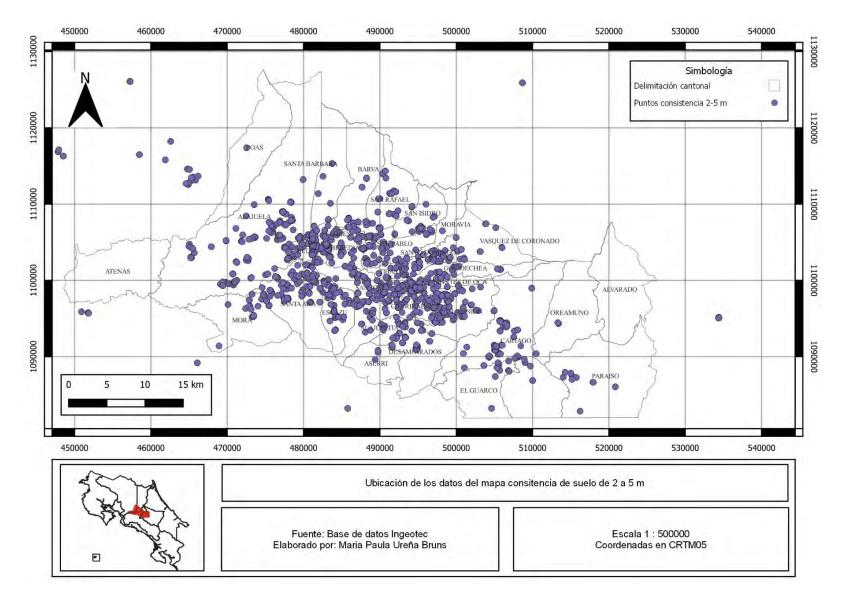


Figura 46. Distribución espacial de los datos utilizados para elaborar el mapa de consistencia del suelo en un estrato de 2 a 5 m

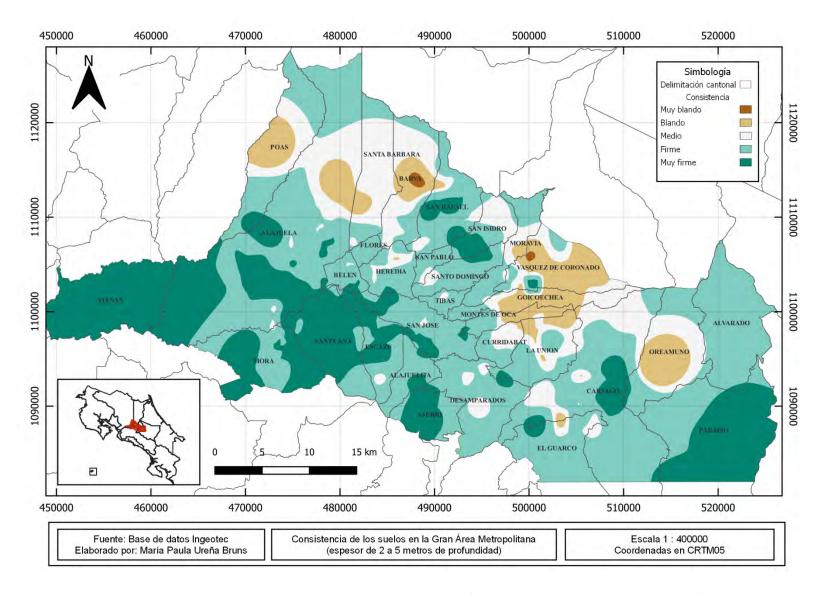


Figura 47. Mapa de consistencia del suelo en la GAM (espesor de 2 a 5 m de profundidad)

El tercer estrato comprende desde los 5 m hasta el fondo de la perforación, en el cual se recolectaron 4319, es de esperar que a estas profundidades la cantidad de datos sea menor, ya que, como se analizaron muestras obtenidas mediante ensayos SPT, la profundidad de la perforación quedaba limitado por la profundidad donde se daba el rebote del mazo. Los cantones con pocos o nulos puntos con información son Alvarado, Aserrí, Atenas, Oreamuno, Poás y Santa Bárbara. En la Figura 48 se muestran la cantidad de datos por cantón de la GAM para mapa de consistencia de suelo en un estrato de suelo de 5 o más m y en la Figura 49 la distribución espacial de estos.

Con el fin de verificar los valores obtenidos con la interpolación de los datos, se obtuvo la desviación estándar en cada perforación con el valor exacto obtenido con los estudios geotécnicos y el obtenido con la interpolación. La máxima desviación estándar obtenida fue de 88.9%, de 923 perforaciones, en 330 se obtuvo una desviación por encima del 10% y 135 por encima del 20% Esta desviación se debe a que en cada perforación se interpoló el promedio de número de golpes a 5 o más m de profundidad, este es el mapa con mayor variedad en la desviación estándar porque se tomaron en cuenta los datos hasta el rebote del maso, en algunas ocasiones las hojas de perforación indicaban valores de N de 100 hasta 150, por lo que la variabilidad en los valores de N en una sola perforación era significativa. En la Figura 50 se muestra el mapa resultante "Mapa Consistencia de los Suelos en la Gran Área Metropolitana (profundidad de 5 o más m).

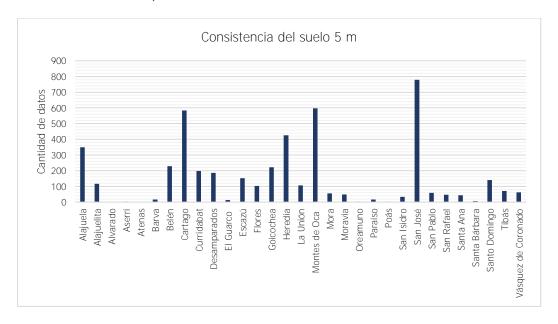


Figura 48. Cantidad de datos por cantón para realizar el mapa de consistencia del suelo de 5 o más metros

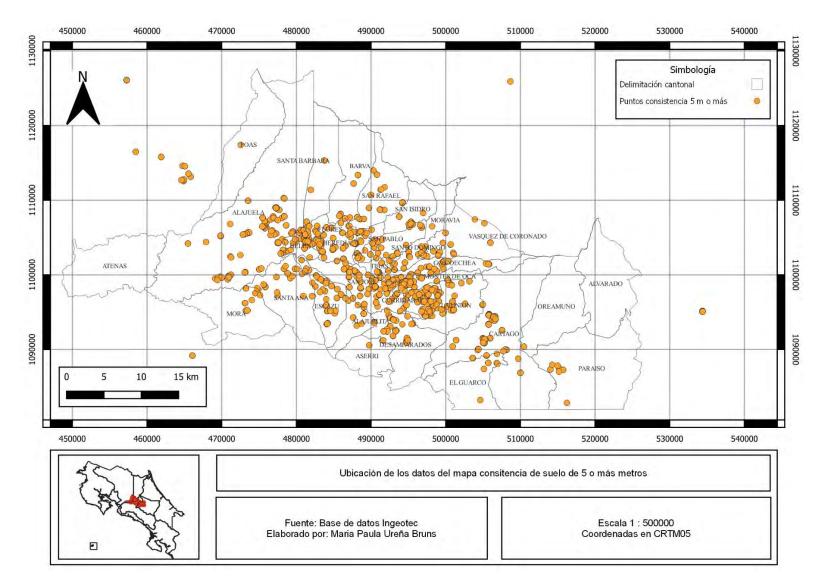


Figura 49. Distribución espacial de los datos utilizados para elaborar el mapa de consistencia del suelo en un estrato de 5 o más m

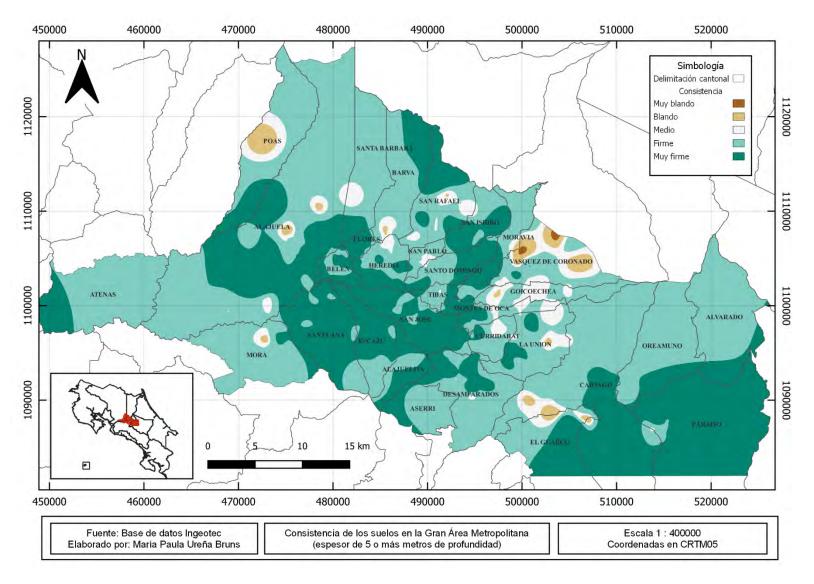


Figura 50. Mapa de consistencia del suelo en la GAM (espesor de 5 o más metros de profundidad)

3.3.3. Mapa tipo de suelo

El tipo de suelo se determinó aplicando la terminología explicada en la sección 3.2.3, basándose principalmente en límites de plasticidad, clasificación SUCS, consistencia del suelo, humedad natural y potencial de expansión del suelo. En total se clasificaron 1849 datos y únicamente en los cantones de Atenas y Alvarado no se tiene ningún estudio geotécnico. Otros cantones con una baja densidad de estudios son Aserrí, El Guarco, Oreamuno, Paraíso y Poás. Mientras que los cantones con más puntos son San José, Alajuela y Santa Ana. En la Figura 51 se muestra la cantidad de estudios clasificados por cantón, mientras que en la Figura 52 se muestra la distribución espacial de los puntos clasificados como limos, en la Figura 53 los limos colapsables, en la Figura 54 las arcillas y en la Figura 55 las arcillas expansivas.

Con el fin de verificar los valores obtenidos con la interpolación de los datos, se obtuvo la desviación estándar en cada perforación con el valor exacto obtenido con los estudios geotécnicos y el obtenido con la interpolación. La máxima desviación estándar obtenida fue de 2%, esto indica que os valores de la interpolación son bastante confiables, respecto a los valores puntuales analizados.

En la Figura 56 se muestra el **mapa resultante "Mapa Tipo de Suelos en la Gran Área Metropolitana".** En los anexos se muestra la versión ampliada del mapa realizado y el elaborado por Bogantes (1999).

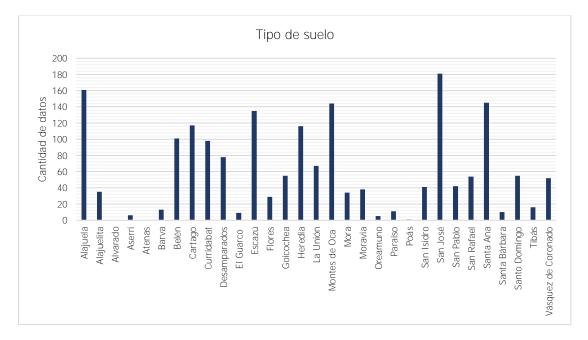


Figura 51. Cantidad de datos por cantón para realizar el mapa de tipo del suelo

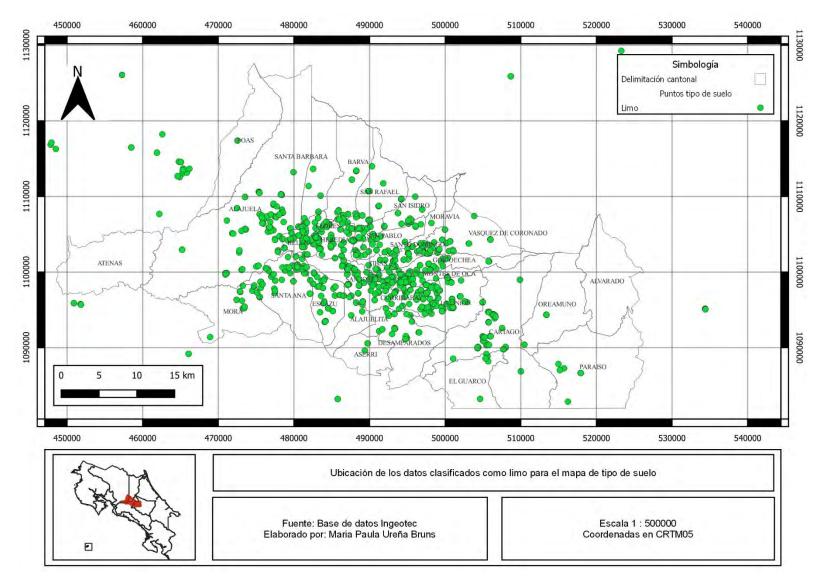


Figura 52. Distribución espacial de los suelos clasificados como limos

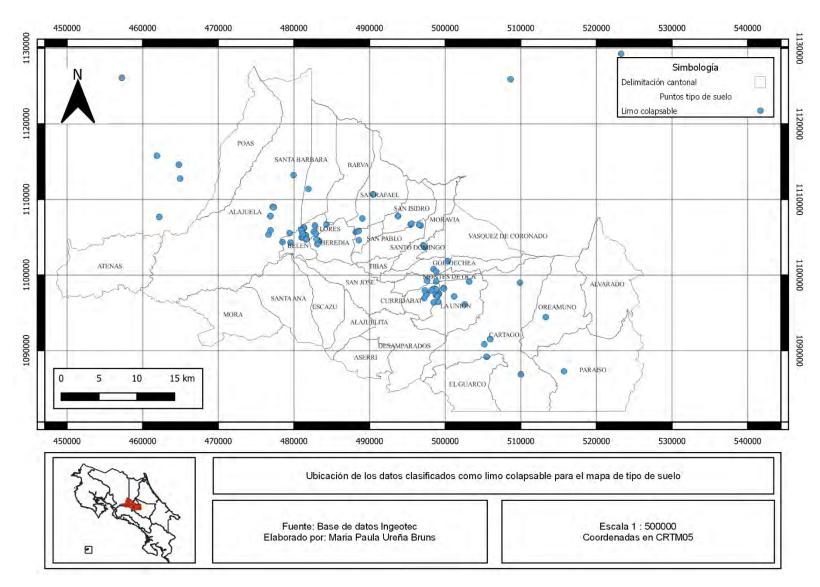


Figura 53. Distribución espacial de los suelos clasificados como limos colapsables

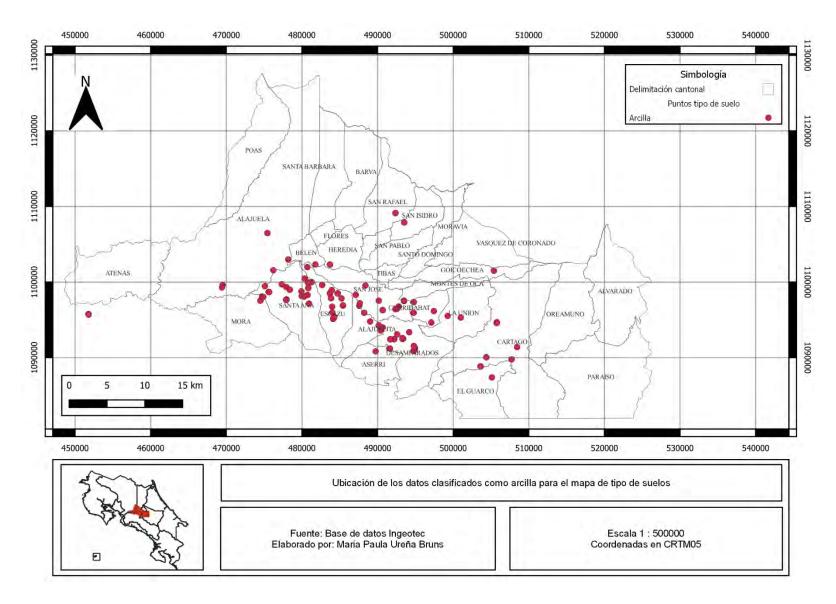


Figura 54. Distribución espacial de los suelos clasificados como arcillas

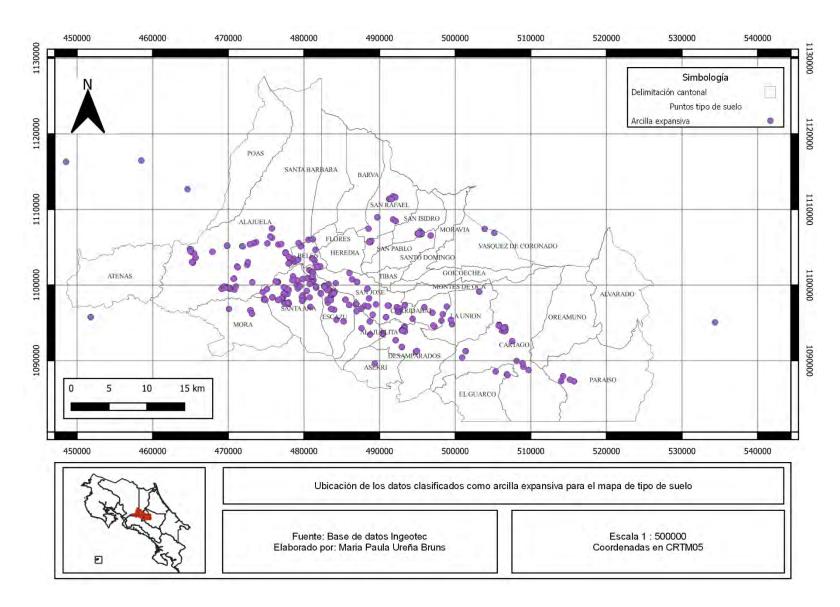


Figura 55. Distribución espacial de los suelos clasificados como arcillas expansivas

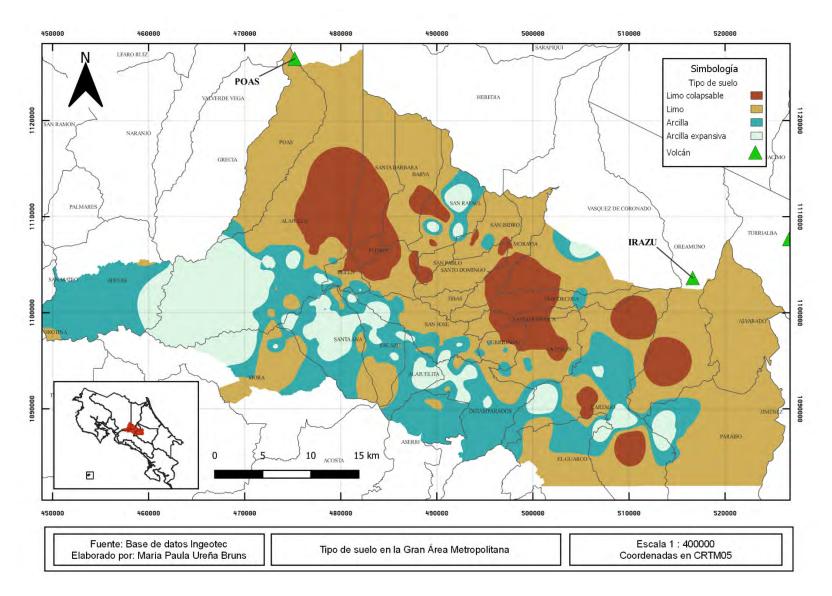


Figura 56. Mapa de tipo de suelo

3.3.4. Mapa de nivel freático

La profundidad de las perforaciones analizadas dependía de la naturaleza de cada proyecto, por ejemplo, cuando se trataba de un diseño de una cimentación para una casa la profundidad de las perforaciones podían rondar entro los 0 y 3 m por lo que, cuando el nivel freático se encontraba a una mayor profundidad, no era posible detectarlo. Además, la profundidad dependía del ensayo SPT, ya que no se consideraron las perforaciones a rotación en la presente zonificación geotécnica. En total se contabilizaron 595 lecturas de nivel freático, 147 en la época seca y 448 en la época lluviosa. Debido a que la cantidad de datos para realizar este mapa es menor, la extensión se redujo a las zonas con las que se tenía información. El mapa de nivel freático en época seca tiene una extensión de 842 km² y el de época lluviosa 1572 km², en comparación con los 1696 km² de la GAM actual, es decir, se trata de una extensión del 50% para el mapa en la época seca y un 93% en la lluviosa.

En la Figura 57 se muestra la cantidad de datos por cantón para el mapa de nivel freático en la época seca, no se tiene ningún dato para los cantones de Alvarado, Aserrí, Atenas, Barva, Belén, Flores, Mora, Oreamuno, Paraíso, Poás, San Isidro, San Pablo, San Rafael, Santa Bárbara y Tibás. Mientras que, en la Figura 58 se muestra la cantidad de datos por cantón para la época lluviosa, donde en los cantones de Alvarado, Aserrí, Atenas, Barva, Oreamuno, Paraíso, Poás, San isidro, San Pablo, San Rafael, Santa Bárbara, Santo Domingo y Tibás, no cuentan con ningún dato de nivel freático, esto no quiere decir que no exista nivel freático superficial en estas zonas. En la Figura 59 y la Figura 60 se muestra la distribución espacial de los datos mencionados.

Con el fin de verificar los valores obtenidos con la interpolación de los datos, se obtuvo la desviación estándar en cada perforación con el valor exacto obtenido con los estudios geotécnicos y el obtenido con la interpolación. La máxima desviación estándar obtenida para el mapa en la época lluviosa fue de 2% y en la época seca de 0.5%, esto indica que os valores de la interpolación son bastante confiables, respecto a los valores puntuales analizados.

En la Figura 61 se muestra el mapa resultante "Mapa Nivel Freático en la Gran Área Metropolitana durante la época seca" y en la Figura 62 el "Mapa Nivel Freático en la Gran Área Metropolitana durante la época lluviosa".

Adicionalmente, se realizó una separación de los datos interpolados, basándose en los cauces del río María Aguilar y el río Virilla, es decir, se interpolaron los datos al norte del río María

Aguilar, los datos entre ambos ríos, y los datos al sur del río Virilla, ya que no tiene sentido geotécnico interpolar los niveles freáticos entre el cauce de los ríos. Se eligieron estos dos ríos ya que son los que atraviesan gran parte de la GAM. En la Figura 63 se muestra el mapa resultante "Mapa Nivel Freático en la Gran Área Metropolitana durante la época seca (división por cauces)" y en la Figura 64 el "Mapa Nivel Freático en la Gran Área Metropolitana durante la época lluviosa (división por cauces)". En los anexos se muestra la versión ampliada del mapa realizado y el elaborado por Bogantes (1999).

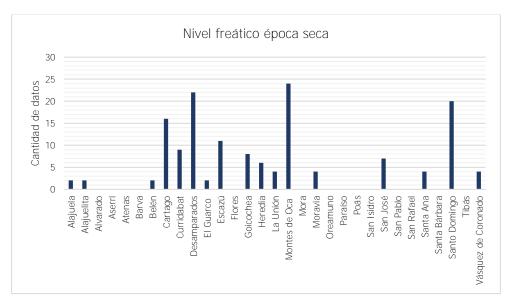


Figura 57. Cantidad de datos por cantón para realizar el mapa de nivel freático en la época seca

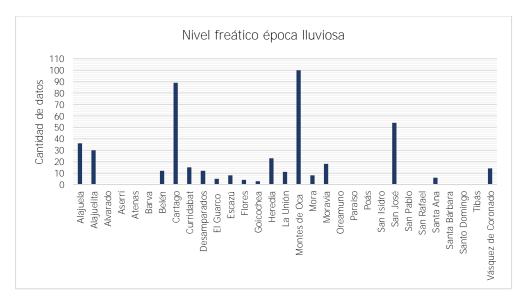


Figura 58. Cantidad de datos por cantón para realizar el mapa de nivel freático en la época lluviosa

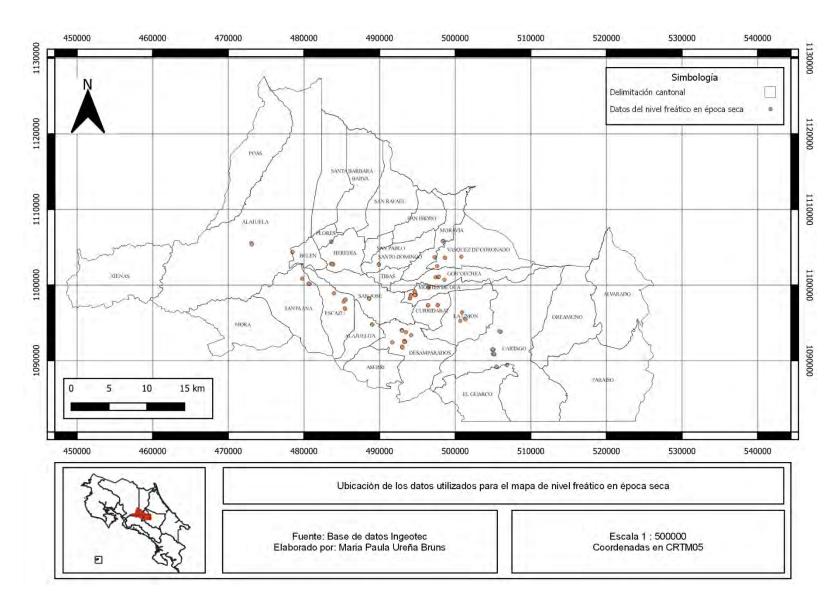


Figura 59. Distribución espacial de los datos utilizados para elaborar el mapa de nivel freático en la época seca

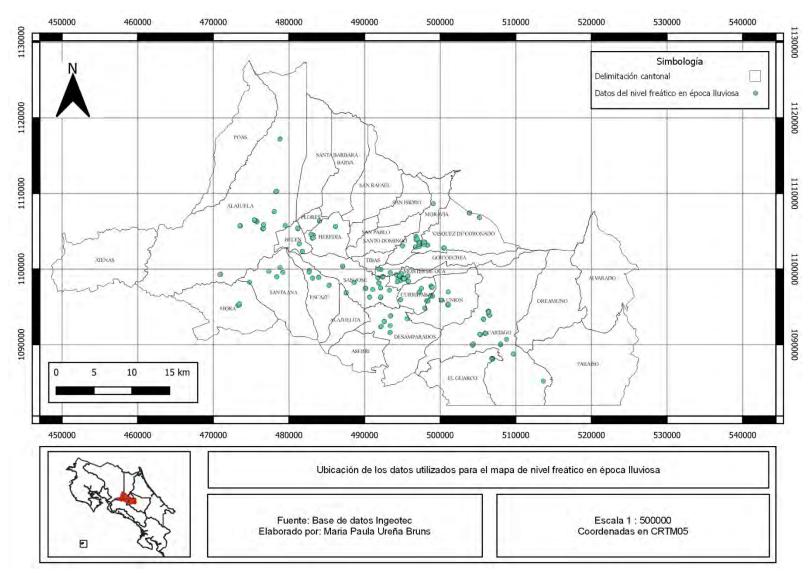


Figura 60. Distribución espacial de los datos utilizados para elaborar el mapa de nivel freático en la época lluviosa

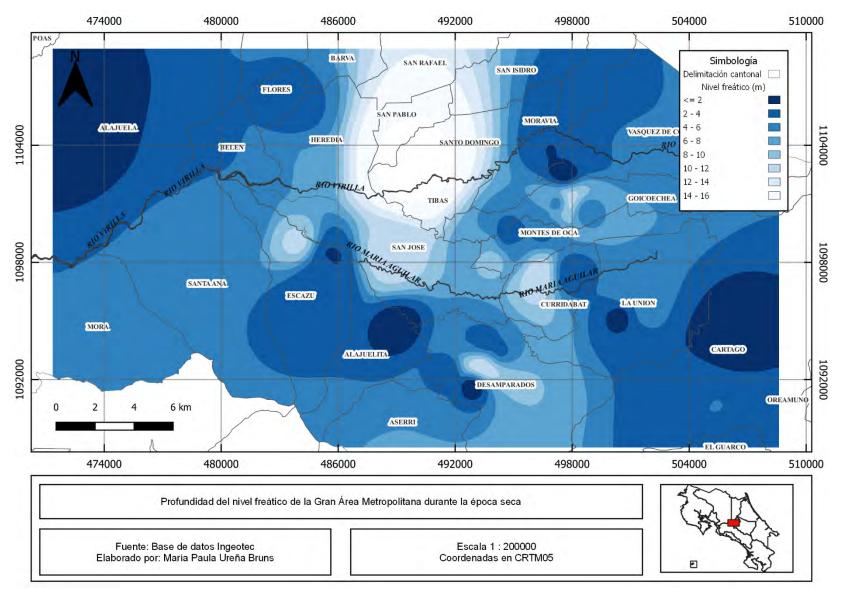


Figura 61. Mapa del nivel freático en la época seca

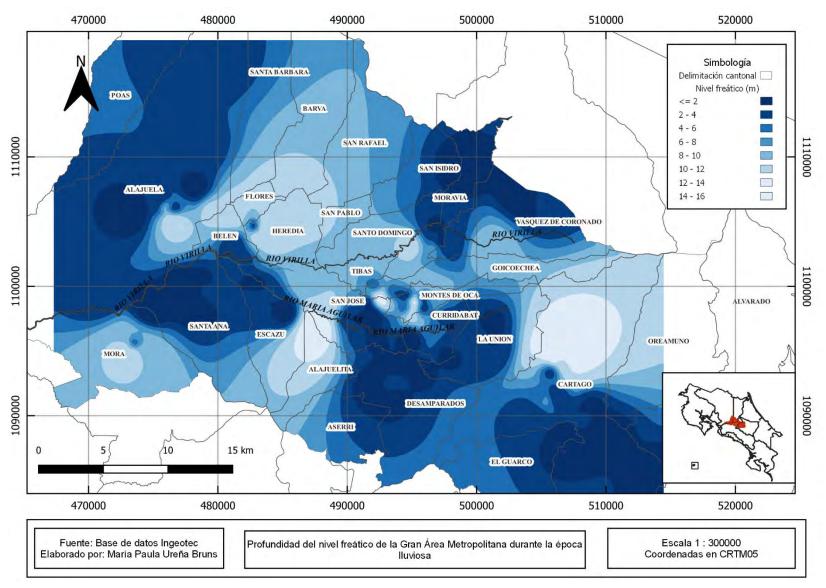


Figura 62. Mapa del nivel freático en la época lluviosa

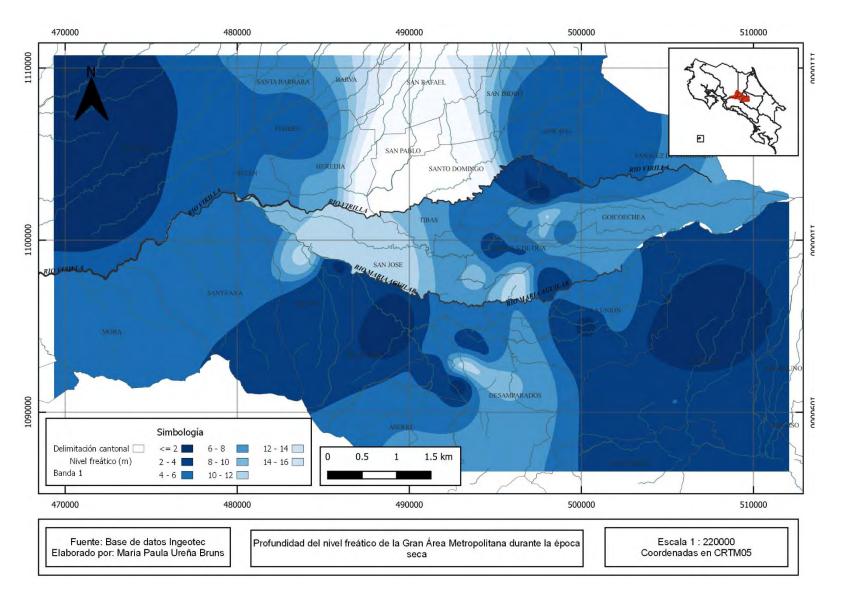


Figura 63. Mapa del nivel freático en la época seca (división por cauces)

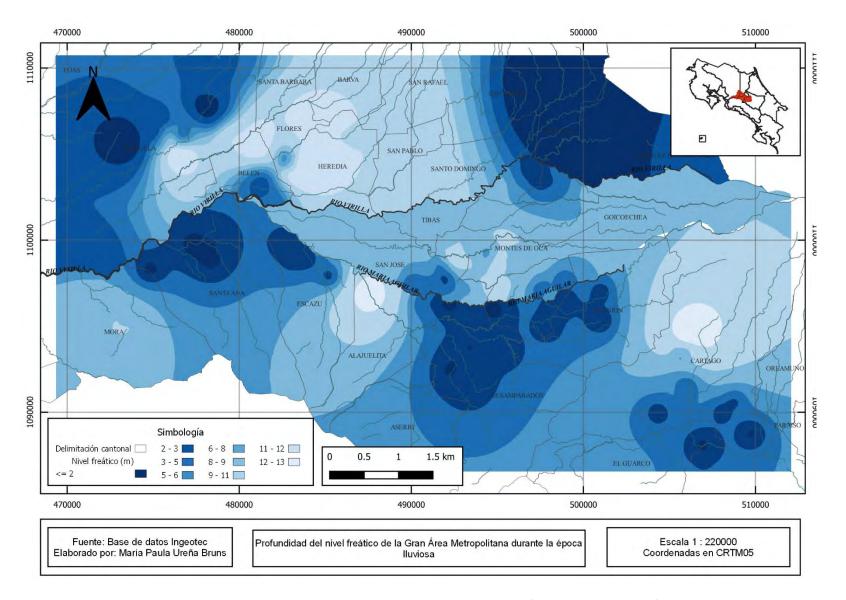


Figura 64. Mapa del nivel freático en la época lluviosa (división por cauces)

CAPÍTULO 4

4. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS

En este apartado se describirá cada uno de los mapas geotécnicos realizados, se presenta también una tabla resumen para cada uno de los cantones presentes en la GAM y sus diferentes propiedades geotécnicas. Adicionalmente, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos por Bogantes (1999) y la nueva propuesta.

Es importante mencionar que los resultados obtenidos son analizados y validados por expertos en el área.

4.1. Mapa de espesor de suelo

Para la elaboración del mapa de espesor de suelo se determinaron 1543 puntos donde se obtuvo un valor de número de golpes superior a 50 en el ensayo SPT, este criterio se utilizó para determinar la profundidad del estrato de suelo. Sin embargo, debido a que no se analizaron perforaciones a rotación, existe la posibilidad de que no se haya encontrado la profundidad real del estrato de suelo, sino que se trate de un estrato de suelo rígido.

La profundidad del estrato de suelo puede relacionarse con diferentes aspectos geotécnicos, como en qué sitios pueden existir zonas con suelos blandos, profundidad de un estrato competente para estructuras en las cuales la carga transmitida al suelo es muy alta, afloramiento de la roca, presencia de suelos residuales, formación de suelos arcillosos, entre otros.

En el Cuadro 23 y Cuadro 24 se muestra el espesor de suelos que predomina en cada cantón, basado en los mapas generados en el presente proyecto y el obtenido por Bogantes. Debido a que los nuevos mapas tienen una mayor extensión que los de Bogantes, existen cantones en los cuales no existía información del espesor de suelo.

Cuadro 23. Espesor de suelo por cantón

Cantón	Espesor de suelo de la nueva propuesta	Espesor de Bogantes (1999)	
Atenas	Las profundidades rondan entre los 0 y 4 m	-	
Alajuela	Gran variedad de profundidades hacía el sur los		
	espesores rondan entre 3 y 5m, en la zona	Entre 5 y 25 m.	
	central pueden alcanzar hasta los 7 m y hacía		
	el norte rondan entre los 4 y 5m.		
Poás	Profundidades entre 3 y 5 m.	-	
Santa Bárbara	Profundidades entre 4 y 6 m.	Entre 5 y 15 m.	
Donyo	Gran variabilidad en las profundidades, van		
Barva	desde los 0 hasta los 7 m.	-	
Heredia	En este cantón se pueden encontrar	Fatas 10 20 as	
nereula	profundidades de hasta 16 m.	Entre 10 y 20 m.	
Belén	Profundidades entre 3 y 5 m.	Entre 5 y 15 m.	
Flores	Profundidades entre 3 y 5 m.	Entre 5 y 15 m.	
San Rafael	Profundidades entre 0 y 5 m.	-	
San Pablo	Profundidades entre 4 y 8 m.	Entre 10 y 15 m.	
San Isidro	Profundidades entre 3 y 6 m.	Entre 5 y 15 m.	
Santo	Profundidades entre 3 y 7 m.	Entro E v 2E m	
Domingo		Entre 5 y 25 m.	
	Este cantón presenta diferentes profundidades,		
Mora	hacía el norte se pueden encontrar estratos	Entre 0 y 10 m.	
IVIOI d	desde 0 hasta 3 m, mientras que hacía el sir	Entre o y To III.	
	existen zonas con más de 9 m de espesor.		
Santa Ana	Zona con los espesores de suelos más	Entro 0 v 15 m	
	pequeños de la GAM, desde 0 hasta 4 m.	Entre 0 y 15 m.	
Escazú	Profundidades entre 0 y 5 m.	Entre 0 y 10 m.	
Alajuelita	Profundidades entre 3 y 7 m.	Entre 0 y 10 m.	
Desamparados	En este cantón predominan las profundidades		
	entre 4 y 5 m, sin embargo, existen zonas con	Entre 0 y 15 m.	
	espesores de 0 a 3 m y otras desde 5 hasta		
	más de 9 m.		
Aserrí	Profundidades entre 0 y 5 m.	-	
Curridabat	Profundidades entre 3 y 6 m.	Entre 5 y 15 m.	
	I .	L	

Cuadro 24. Espesor de suelo por cantón (continuación)

Cantón	Espesor de suelo de la nueva propuesta	Espesor de Bogantes (1999)	
San José	Gran variabilidad en el espesor del suelo, sin		
	embargo, predominan las profundidades desde	Entre 10 y 15 m.	
	5 hasta 16 m.		
Tibás	Profundidades entre 4 y 6 m.	Entre 15 y 25 m.	
	Gran variabilidad en el espesor del suelo, sin		
Montes de	embargo, predominan las profundidades desde		
Oca	4 hasta 6 m. Sin embargo, existe una zona con	Entre 10 y 15 m.	
Oca	grandes espesores de suelos, concentrada en		
	la zona de San Pedro.		
Goicochea	Profundidades entre 4 y 8 m.	Entre 10 y 15 m.	
Vázquez de	Profundidades entre 0 y 5 m.	Espesor entre 10 y 20 m.	
Coronado	Profundidades entre 0 y 3 m.	Lapeaur entre 10 y 20 III.	
Moravia	Predominan las profundidades entre 4 y 5 m.	Entre 10 y 25 m.	
La Unión	Gran variabilidad en el espesor del suelo, se		
	encuentran profundidades desde 0 hasta 8 m.	-	
Cartago	Gran variabilidad en el espesor del suelo, se		
	encuentran profundidades desde 0 hasta 8 m.	-	
Oreamuno	Profundidades desde los 0 hasta los 6 m.	-	
Alvarado	Profundidades desde los 3 hasta los 5 m.	-	
Paraíso	Profundidades desde los 0 hasta los 6 m.	-	
El Guarco	Profundidades desde los 4 hasta los 5 m.	-	

Del mapa presentado en la Figura 41 anterior y el Cuadro 23, se observa que en la zona oeste de la GAM (Escazú, Santa Ana, Atenas y el suroeste de Alajuela) corresponde a la zona de menor espesor de suelo en la GAM, principalmente en Santa Ana. En el centro de la GAM (San José y alrededores) se observa una gran variedad de estratos de suelo, lo mismo sucede en el cantón de Heredia. Se puede apreciar que en general en el centro de la GAM, como los cantones de San José, Tibás, Montes de Oca, Heredia, el sur de Santo Domingo, Goicochea, Curridabat, Desamparados y Alajuelita, presentan mayores espesores de suelo.

En la zona norte de la GAM, como Alajuela, Santa Bárbara, Barva, San Rafael se cuenta con una densidad baja de puntos (Figura 39), según la interpolación realizada, la profundidad del

estrato de suelos en Poás, Alajuela Y Santa Bárbara ronda entre los 5 y 6 m. Mientras que en el cantón de Barva desde los 4 hasta los 7 m de profundidad. En los cantones de San Rafael, San Isidro, Moravia y Vásquez de Coronado, se cuenta con pocos datos para determinar la profundidad del suelo, según el mapa realizado, estas abarcan entre los 3 y 5 m. Cabe destacar que en el cantón de Cartago se tiene una variedad de espesores de suelo.

Debido a que los datos que se utilizaron provienen de ensayos SPT la comparación directa con los espesores de suelo del mapa realizado por Bogantes (1999) no es posible, sin embargo, se observa que, en la zona sur del mapa, alrededor de Ciudad Colón, Santa Ana y Escazú, los espesores de suelos rondan entre los 0 y 5 m, lo que coincide con la nueva clasificación realizada. Las zonas con mayor profundidad según el mapa de Bogantes (1999) son Heredia, Santo Domingo, Moravia y Coronado, con espesores de 15 m o más. Según los ensayos de SPT, en Heredia se alcanzaron profundidades de hasta 16 m, en Santo Domingo y Moravia de 7 m y en Vázquez de Coronado de 6 m.

En el apartado 4.2 y 4.3 se analizará la relación del espesor del estrato de suelo con la consistencia y la formación de ciertos tipos de suelos, respectivamente.

4.2. Mapa de consistencia o resistencia a la penetración

Con el fin de conocer la variabilidad en la consistencia de los suelos respecto a la profundidad, se realizaron 3 mapas, uno abarca desde los 0 hasta los 2 m, ya que, por lo general, las estructuras de 1 y 2 niveles se cimientan en este estrato. El segundo mapa abarca desde los 2 hasta los 5 m de profundidad, estrato donde se cimientan comúnmente estructuras de mayor altura como edificios. Y un tercer mapa que abarca desde los 5 m hasta el fondo de la perforación analizada, este es de interés paras las estructuras como sótanos, cimientos profundos u otras estructuras subterráneas. Es importante destacar que estos mapas son para dar una idea general del comportamiento de los suelos en la GAM y alertar de posibles zonas problemáticas, pero nunca será un sustito de un estudio geotécnico.

En total se analizaron 20147 datos con un número de golpes asociado a una profundidad, 5811 para el estrato de 0 a 2 m, 10017 de 2 a 5 m y 4319 de 5 o más m. Como ya se mencionó, todas las zonas con un número de golpe promedio menor a 5 es considerado como suelo muy blando, menos de 10 como blando, entre 10 y 15 intermedio, de 15 a 30 firme, y mayor a 30 muy firme.

En el Cuadro 25 y Cuadro 26 se describe la consistencia que predomina en cada uno de los cantones de la GAM a las diferentes profundidades analizadas, basado en los diferentes mapas realizados en el presente trabajo final de graduación.

Cuadro 25. Consistencia o resistencia al ensayo SPT por cantón

Cantón	Consistencia 0-2 m	Consistencia 2-5 m	Consistencia 5 o más m
Atenas	Media	Muy firme	Firme
Alajuela	Mayoritariamente media, pero existe una zona de suelos blandos hacia el sur y algunas zonas con suelos firmes e incluso muy firmes	Firme y muy firme del centro hacía el sur y presencia de suelos con consistencia media y blanda hacia el norte	Mayoritariamente firme y muy firme en la zona central
Poás	Media a blanda	Firme y una zona con suelos blandos	Firme y una zona con suelos blandos
Santa Bárbara	Blanda	Consistencia media y blanda	Firme
Barva	Blanda a muy blanda	Consistencia media y blanda	Firme y muy firme hacía el noreste
Heredia	Media	Firme	Firme al norte y muy firme al sur
Belén	Media	Firme	Muy firme
Flores	Media	Firme	Muy firme
San Rafael	Media y blanda	Firme	Firme y algunas zonas media
San Pablo	Media	Firme	Firme
San Isidro	Media al sur y blanda hacia norte	Presencia de suelos con consistencia media hasta muy firme	Muy firme
Santo Domingo	Media a blanda	Firme	Muy firme y firme
Mora	Media mayoritariamente	Firme y muy firme	Firme
Santa Ana	Media a firme	Muy firme	Muy firme
Escazú	Media a firme	Firme y muy firme	Muy firme
Alajuelita	Media a firme	Firme y muy firme	Muy firme
Desamparados	Media a blanda	Firme	Firme y muy firme

Cuadro 26. Consistencia o resistencia al ensayo SPT por cantón (continuación)

Cantón	Consistencia 0-2 m	Consistencia 2-5 m	Consistencia 5 o más metros
Aserrí	Media	Firme y muy firme	Firme
Curridabat	Media a blanda	Media y firme	Firme y media
San José	Media a blanda	Firme	Muy firme
Tibás	Media a blanda	Firme	Firme
Montes de Oca	Blanda a muy blanda	Presencia de suelos blandos	Firme y media
Goicochea	Blanda a muy blanda	Presencia de suelos blandos	Firme y media
Vázquez de		December 1 de contra la	Firme con presencia de zonas
Coronado	Blanda a muy blanda	Presencia de suelos blandos y muy blandos	bandas e incluso muy blandas
Moravia	Blanda a muy blanda	Presencia de suelos blandos hasta firmes	Firme
La Unión	Firme a blanda	Media a firmes	Firme mayoritariamente
Cartago	Blanda hacia el norte, firme en el centro y media hacia el sur	Media a muy firmes	Firme hacia el norte y muy firme hacia el sur, existe una pequeña zona con presencia de suelos blandos (entre Desamparados y El Guarco)
Oreamuno	Blanda a muy blanda	Blandos a firmes	Firme
Alvarado	Blanda a media	Firme	Firme
Paraíso	Blanda mayoritariamente	Firme y muy firme	Firme y media
El Guarco	Blanda a muy blanda	Firme	Firme y media

En la Figura 44 anterior, se muestra la consistencia de los suelos en un estrato de 0 a 2 m, de la cual se observa que gran parte de la zona noreste de la GAM tiene presencia de suelos blando, en incluso muy blando. También hay presencia de una zona de suelos blandos en el sur de Alajuela hacia Atenas, Poás, Santa Bárbara, San Isidro, Alvarado y Paraíso. Es de esperar que en los dos primeros m de suelo se obtengan suelos con número de golpes relativamente bajos, sin embargo, se conoce que en la zona de Coronado existen grandes espesores de suelos blandos. Hacia el oeste de la GAM, se observa que en la mayoría de los cantones la consistencia del suelo varía entre mediana y firme, sin embargo, se observa que, entre Santa Ana y Alajuela, específicamente entre Brasil de Santa Ana y San Rafael de Alajuela, se tiene una zona de suelo muy firme.

Es importante relacionar el mapa de espesor de suelos con el mapa de consistencia, como se observa en la Figura 41 anterior, en Santa Ana existe una zona con un estrato de suelo de menos de 3 m, la cual coincide con la zona donde se detectaron suelos firmes y muy firmes a menos de 2 m de profundidad. Este comportamiento también se observa en Alajuela, Aserrí, Cartago, La Unión, San Rafael de Heredia y Escazú, donde hay presencia de suelos firmes las zonas donde el estrato de suelo es menor a 3 m. En la zona central de la GAM, como San José, Heredia, Tibás, Santo Domingo, Curridabat y Desamparados, se tiene una variabilidad en la consistencia, desde suelos blandos hasta firmes. Como se mencionó anteriormente, está área de la GAM también tiene una alta variabilidad en el espesor del estrato de suelo, relacionado también con la variedad de suelos encontrados en este sector, según lo presentado en el mapa de tipo de suelo elaborado en el presente trabajo.

En cuanto al mapa consistencia del suelo entre 2 y 5 m de profundidad, se observa en la Figura 47 que continua la presencia de suelos blandos en Poás, Alajuela, Barva, Moravia, Coronado, Goicochea, Montes de Oca, Oreamuno y Cartago. E incluso muy blandos en Coronado y Barva de Heredia. En los alrededores de los cantones mencionados se observan suelos con consistencia media. Por otro lado, debido a que en este mapa se analizaron pruebas SPT a mayores profundidades, el número de golpes es mayor, lo que indica mayores zonas con suelos firmes, lo cual se ilustra en el mapa. Además, se puede apreciar que las zonas con suelo muy firme son más amplias y abarcan zonas como Alajuela, Mora, Santa Ana, Escazú, Aserrí, Cartago y Paraíso.

Por último, en el mapa donde se analizaron ensayos a una profundidad de 5 m o más, se obtuvo que en la mayoría de la GAM los suelos son firmes o muy firme, sin embargo, continúa

la presencia de suelos medios, blandos e incluso muy blandos, en Coronado, Poás y Cartago. Este mapa se muestra en la Figura 50.

Según la zonificación geotécnica realizada por Bogantes (1999) los suelos blandos están presentes en Moravia, Santa Bárbara, Alajuela, noreste de San José, Montes de Oca, Coronado, Tibás y Curridabat. Estas zonas coinciden con las mencionadas anteriormente con presencia de suelos blandos.

Por lo general las zonas con suelos medios, firmes o muy firmes no son un problema para la ingeniería civil, más bien se convierte en una ventaja, ya que se encuentran estratos competentes para las cimentaciones a profundidades relativamente superficiales. A menos que se trate de una estructura que requiera cimentaciones profundas y sea necesario realizar perforaciones a rotación, lo que implicaría una elevación considerable en el costo del proyecto.

Al contrario, cuando se tratan de suelos blandos, pueden representar una dificultad a nivel ingenieril, ya que no se encontrará un estrato con capacidad suficiente para soportar una estructura, lo que podría implicar el uso de cimentaciones profundas o emplear técnicas para mejoramiento del terreno, lo que eleva el costo del proyecto.

En el apartado 4.3 se relacionará la presencia de suelos como arcillas expansivas y limos colapsables con la consistencia de los suelos.

4.3. Mapa tipo de suelo

Para el mapa de tipos de suelo en la GAM se analizaron en total 1849 estudios geotécnicos que contaban con Límites de Atterberg o límites de plasticidad. Debido a que la mayoría de los suelos en la GAM son cohesivos, se utilizó la clasificación SUCS para suelos finos, así como diferentes parámetros geotécnicos, como la humedad natural, consistencia y potencial de expansión, para clasificar el tipo de suelo, según lo mencionado en el apartado 3.2.3. En total se tienen 4 clasificaciones: arcilla, arcilla expansiva, limo y limo colapsable.

En el Cuadro 27 se menciona el o los tipos de suelos que predominan en cada cantón, según la nueva zonificación propuesta en el presente proyecto. De manera textual se realiza la comparación entre los resultados obtenidos y los de Bogantes.

Cuadro 27. Tipo de suelo por cantón

Cantón	Tipo de suelo
Atenas	Arcilla
Alajuela	Arcillas y arcillas expansivas al sur, y limos y limos colapsables al norte
Poás	Limos
Santa Bárbara	Limos y limos colapsables hacia el sur
Barva	Limos y limos colapsables hacia el sur
Heredia	Limos y limos colapsables hacia el noroeste
Belén	Limos hacia el norte y arcillas hacia el sur
Flores	Limos colapsables
San Rafael	Presencia de los 4 tipos de suelos
San Pablo	Limos en el norte y limos colapsables en el sur
San Isidro	Mayoritariamente limos
Santo Domingo	Mayoritariamente limos
Mora	Presencia de limos, arcillas y arcillas expansivas
Santa Ana	Arcillas y arcillas expansivas
Escazú	Arcillas y arcillas expansivas hacía el norte y limos hacía el sur
Alajuelita	Arcillas y arcillas expansivas
Desamparados	Arcillas y arcillas expansivas
Aserrí	Arcillas y arcillas expansivas
Curridabat	Limos y limos colapsables
San José	Limos y arcillas
Tibás	Limos
Montes de Oca	Limos y limos colapsables
Goicochea	Limos y limos colapsables
Vázquez de Coronado	Limos y limos colapsables
Moravia	Limos y limos colapsables
La Unión	Limos y limos colapsables
Cartago	Arcillas y arcillas expansivas en el centro y hacía el norte, en las demás
	zonas del cantón existe presencia de limos y limos colapsables
Oreamuno	Limos y limos colapsables
Alvarado	Limos
Paraíso	Limos, arcillas y arcillas expansivas hacia el oeste

El Guarco Limos y arcillas

En la Figura 56 anterior se observa que la zona noreste de la GAM está mayormente cubierta por limos, mientas que la zona suroeste por arcillas. Se tiene presencia de limos colapsables al norte de Alajuela, en la provincia de Heredia en cantones como Flores, Santa Bárbara, Barva, Heredia y San Rafael, en San José en los cantones de Moravia, Coronado, Goicochea, Montes de Oca, Curridabat y La Unión, mientras que en la provincia de Cartago están presentes en Oreamuno y Cartago.

Los limos colapsables se originan de la alteración de cenizas volcánicas y materiales piroclásticos, tienen características como alta relación de vacíos, alta humedad natural, alta permeabilidad y baja densidad (Laporte, 2007). Como se observa en la Figura 61 y la Figura 62, las zonas donde existe presencia de este tipo de suelo, los niveles freáticos son más profundos, debido a su alta permeabilidad.

Estos suelos están presentes en varias zonas del Valle Central, producto de la actividad de la actividad en la Cordillera Volcánica Central, principalmente los volcanes Irazú, Turrialba y Poás. Debido a que se tratan de suelos de baja plasticidad, es común que se hayan desarrollado en zonas con pendientes moderadas. Como se muestra en la Figura 9, los cantones de Coronado, Goicochea, el norte de Cartago, Oreamuno, Alvarado, Barva de Heredia y alrededores, son los que presentan mayores variaciones en la elevación del relieve. En cuanto a la taxonomía de los suelos, los limos colapsables se encuentran principalmente en los andisoles, los cuales se pueden encontrar en el norte del cantón de Alajuela, norte de Heredia, Santa Bárbara, San Rafael, Barva, Moravia, Goicochea, Montes de Oca, norte de Cartago, Oreamuno y Alvarado.

Una de las características de los limos colapsables es que son suelos bastante blandos, según los mapas de consistencia del suelo presentes en la Figura 44, Figura 47 y Figura 50. Los cantones ya mencionados donde se encuentran este tipo de suelo coinciden con la zona de suelos blandos y muy blandos en la GAM.

La principal problemática de estos tipos de suelo es que, ante condiciones de humedad y símicos particulares, son susceptibles a experimentar el fenómeno de colapso. Es importante mencionar que por lo general estos suelos poseen valores de resistencia mayores a los que se pueden correlacionar con el ensayo SPT, además, presenta asentamientos relativamente bajos ante cargas normales como casas, edificios pequeños, bodegas, etc (Laporte, 2007).

Se ha definido que se tiene presencia de arcillas expansivas en la zona sur del cantón de Alajuela, oeste de Mora, Santa Ana, Escazú, Alajuelita, Desamparados, San Rafael, Coronado al norte, Cartago y Paraíso. Según Laporte (2007), las arcillas expansivas se han encontrado hacia el sur de la GAM, en Desamparados, Alajuelita, Ciruelas de Alajuela, Escazú, Coyol de Alajuela, Lindora de Santa Ana, Pozos de Santa Ana y Siquiares de Alajuela. Además, en la provincia de Cartago se han detectado hacia el sur del centro de la ciudad. La formación de este tipo de arcilla, por lo general, se da en zonas con topografía bastante plana, como se muestra en la Figura 9, la zona oeste de la GAM es la que presenta menores variaciones de elevación en su relieve, lo cual correlaciones adecuadamente con lo anotado.

Por lo general, los espesores de arcillas varían entre los 0,5 y 4 m de profundidad (Laporte, 2007). Según el mapa de espesor de suelos, la zona oeste de la GAM, donde hay presencia de arcillas y arcillas expansivas, se tiene un espesor del estrato de suelo entre 0 y 5 m, lo mismo en la zona central y hacia el sur de Cartago.

Las arcillas están subyacidas por ignimbritas y materiales coluviales y laháricos, envueltas en una matriz arcillosa (Laporte, 2007). Según la Figura 32 anterior, donde se muestra la composición geológica en la GAM, en las zonas donde se encuentran arcillas expansivas predominan las coladas de lava, aglomerados, lahares y cenizas volcánicas, que provienen principalmente de las formaciones Aluvial Cuaternaria y Pacacua. Otra propiedad de este tipo de suelo es que su permeabilidad es muy baja y es común encontrar niveles freáticos altos, debido a que el suelo no drena el agua. En la Figura 61 y Figura 62 se muestra que en el mapa de nivel freático realizado se refleja este comportamiento.

En cuanto a la taxonomía de los suelos, los Vertisoles están conformados por arcillas expansivas, en la Figura 29 anterior se observa que este tipo de suelo está presente en el sur de Alajuela y algunas zonas del centro de Cartago, coincidiendo con zonas donde están presentes las arcillas expansivas.

Las arcillas expansivas pueden llegar a generar altas presiones de hinchamiento bajo condiciones de cambios importantes de humedad, generado altos empujes que podrán dañar estructuras. Entre las consecuencias más comunes se pueden citar grietas en pisos, aceras, pavimentos, daños en muros, rotura de tuberías, cajas de registro, entre otros. Además, aparte de su capacidad de hinchamiento, estas arcillas también se contraen cuando disminuye el contenido de humedad, provocando también daños en las estructuras.

4.4. Mapa de nivel freático

La cercanía del nivel freático a una cimentación tiene un efecto importante en la capacidad de carga y su asentamiento, por lo que es de gran importancia su estudio (Das, 2015). El nivel del agua varía en cada época del año, en el caso de Costa Rica se tienen dos épocas establecidas: seca y lluviosa. En algunos casos es necesario establecer niveles máximos y mínimos del nivel freático durante la vida útil de un proyecto y considerarlo en su diseño.

Además de la época del año, la permeabilidad del suelo, la cual está relacionada con el tamaño de la partícula, influye en la profundidad del nivel freático o la formación de niveles colgados. En general, los tipos de suelos en la GAM (limos y arcillas) tienen una permeabilidad baja, por lo que es común que haya superficies freáticas cercanas a la superficie. En las zonas que existan suelos más arenosos existirá un mejor drenaje del agua, como el de las aguas provenientes de las lluvias.

Para el mapa de niveles freáticos en la Gran Área Metropolitana, se recuperó la información de diferentes perforaciones, en total se recolectaron 595 profundidades de nivel freático, 147 en la época seca y 448 en la época lluviosa. Es importante destacar que no se analizaron perforaciones a rotación, por lo que, en algunos casos, puede que el manto freático se encuentre a profundidades mayores, las cuales se pueden alcanzar únicamente perforando los estratos duros o la roca. Además, muchas de las perforaciones analizadas eran para estructuras de 1 o 2 niveles, muy pocos proyectos analizados correspondían a estructuras donde fuera necesario perforar a grandes profundidades. El presente mapa es realizado con el objetivo de alertar y señalar las zonas con niveles freáticos a menos de 15 m, cabe destacar que, para la mayoría de las edificaciones, cuando el agua se encuentra a gran profundidad no se verá afectado el diseño de la cimentación, únicamente si se trataran de cimentaciones profundas o estructuras subterráneas.

Debido a que la cantidad de datos recopilados para realizar estos mapas es menor que con la que se cuenta para los demás mapas, sin embargo, la cantidad de datos recolectados es importante, permitiendo obtener los resultados esperados y cumplir los objetivos del presente trabajo final de graduación. Debido a esto, se redujo el área de cobertura para ambos mapas (época seca y lluviosa), con el fin de realizar mapas más confiables. El área de cobertura de los demás mapas es de 1696 km², mientras que el mapa de época seca tiene una extensión

total de 842 km² (50% del área de la GAM) y el de época lluviosa de 1572 km² (93% del área de la GAM).

Se dividieron las épocas del año con el fin de mostrar las variaciones del nivel freático con las filtraciones del agua. Lo anterior porque, si se interpolaran los datos de las dos épocas se podría tener una percepción errónea de la profundidad del nivel freático. Se llama la atención sobre la importancia de conocer cómo se comporta durante la época lluviosa, ya que son las profundidades críticas para el diseño de las cimentaciones. En el caso de las perforaciones analizadas, estas se realizaron a lo largo del territorio de la GAM y los puntos entre ambas épocas son distintos. Idealmente se deben medir las profundidades de los niveles freáticos en los mismos puntos geográficos en las dos épocas del año, con el fin de brindarle más precisión a los mapas y conocer la variación real del nivel en las diferentes épocas.

Otro aspecto importante que podría afectar la precisión y confiabilidad del mapa de nivel freático es que no se considera el efecto del relieve en la interpolación realizada, por lo que, en zonas con relieve ondulado y poca densidad de lecturas se podrían tener aproximaciones o interpolaciones incorrectas. En las zonas planas y con mayor densidad de lecturas tienen una mayor confiabilidad en el mapa. Las zonas con topografía más elevadas son hacia Cartago, principalmente en el canto El Guarco, Alvarado y Oreamuno. Mientras que las zonas más planas de la GAM son hacia el oeste, como los cantones de Mora y el suroeste de Alajuela.

En el Cuadro 28 se presenta la profundidad de nivel freático que predomina en cada cantón para ambas épocas del año.

Cuadro 28. Profundidad del nivel freático por cantón según los mapas resultantes

Cantón	Profundidad		
Garitori	Época seca	Época Iluviosa	
Atenas	-	-	
Alajuela	0-4 m	0-4 m	
Poás	=	2-6 m	
Santa Bárbara	-	4-12 m	
Barva	=	8-12 m	
Heredia	2-8 m	10-12	
Belén	2-6 m	2-12 m	
Flores	2-4 m	10-12 m	

Cuadro 29. Profundidad del nivel freático por cantón según los mapas resultantes (continuación)

Cantón	Profundidad		
Cariton	Época seca	Época Iluviosa	
San Rafael	12-16 m	6-12 m	
San Pablo	12-16 m	8-12 m	
San Isidro	2-10 m	0-6 m	
Santo Domingo	12-16 m	8-10 m	
Mora	6-8 m	8-12 m	
Santa Ana	4-6 m	0-6 m	
Escazú	2-4 m	0-6 m	
Alajuelita	0-6 m	8-16 m	
Desamparados	2-12 m	0-6 m	
Aserrí	4-8 m	2-8 m	
Curridabat	2-12 m	2-6 m	
San José	6-12 m	0-10 m	
Tibás	12-16 m	8-10 m	
Montes de Oca	2-6 m	2-10 m	
Goicochea	6-14 m	4-10 m	
Vázquez de Coronado	2-6 m	0-8 m	
Moravia	2-6 m	0-4 m	
La Unión	0-6 m	0-4 m	
Cartago	0-4 m	2-16 m	
Oreamuno	-	-	
Alvarado	-	-	
Paraíso	=	-	
El Guarco	-	0-6 m	

Durante la época seca se observa que las zonas con niveles freáticos más profundos son en la zona de Santo Domingo de Heredia, así como sus cantones limitantes: San Pablo, Heredia, San Rafael, Tibás y San José. Otras zonas con niveles freáticos profundos son algunos sectores de Desamparados; entre los distritos de Gravilias y Los Guido, Curridabat; entre los distritos de Curridabat y Granadilla, Goicochea y por los distritos de Ipis, Purral y Mata de Plátano. Mientras que, las zonas con los niveles freáticos más cercanos a la superficie son Alajuela y alrededores, Escazú, Alajuelita, Cartago y alrededores, Moravia y Coronado.

En cuanto al mapa de época Iluviosa mostrado en la Figura 62 se observan zonas con niveles freáticos altos en Coronado, Moravia, San Isidro, debido a que en esta zona los suelos poseen alta permeabilidad, se considera que el nivel freático es real y no colgado. En La Unión, Curridabat, Desamparados, San José hacia el oeste, Cartago hacía el sur, El Guarco, Santa Ana y Alajuela, también se tienen niveles freáticos altos, sin embargo, en estas zonas se pueden encontrar suelos poco permeables, por lo que se podrían tratar de niveles freáticos colgados. Las zonas con niveles más bajos o profundos en la época Iluviosa son San José hacía el sur, Alajuelita, Escazú, Heredia, Flores, Cartago hacia el norte y algunas zonas de Montes de Oca.

El ingeniero Bogantes (1999) realizó mapas de nivel freático, sin embargo, la información de las profundidades fue extraídas de pozos de hasta 100 o más m, por lo que las profundidades del mapa con las de la nueva propuesta no son comparables. Cabe destacar que en el mapa de ambas épocas de Bogantes (1999) las zonas con niveles freáticos más profundos son en Santo Domingo y Heredia, mientras que, en Desamparados, San José, Curridabat y Coronado tiene niveles freáticos altos. Además, en el mapa se observan niveles freáticos altos en Alajuela, Belén y Santa Ana, pero Bogantes (1999) indica que probablemente se deben a niveles freáticos colgantes, ya que esta zona tiene topografía más plana y con suelos más impermeables (arcillas y arcillas expansivas).

Comparando los mapas de nivel freático en ambas épocas del año en la zona de Cartago se observa un cambio significativo en las profundidades de los niveles freáticos, con niveles altos durante la época seca y profundos durante la época lluviosa. Esto se debe a que en la zona de RECOPE Ochomogo se hicieron perforaciones profundas que detectaron niveles freáticos entre los 10 y 12 m. De ahí la importancia de realizar estudios en ambas épocas y en los mismos puntos. Cabe destacar que esta zona de Cartago posee un relieve con elevaciones desde los 1400 hasta los 2400 msnm, por lo que la topografía genera un efecto importante en los resultados del mapa.

En la zona de Desamparados, Curridabat y el Oeste de San José se observa niveles freáticos más altos en la época lluviosa (0 a 6 m) que en la época seca (2 a 12 m), debido al aporte de las filtraciones por las precipitaciones. Lo mismo ocurre en la zona de Moravia y Coronado. Este comportamiento se debe a que estas zonas tienen suelos más permeables, relacionados con los limos colapsables y los suelos de orden Andisoles.

En la zona de Escazú y Santa Ana también se observan niveles altos en la época Iluviosa (0 a 6 m), mientras que en la época seca son un poco más profundos (2 a 6 m), sin embargo, la diferencia no es tan marcada como en la zona este de la GAM. Esto se debe a que, en la zona oeste, se tienen suelos menos permeables (arcillosos) que, en la zona este, por lo que el drenaje es menor. Estas propiedades están relacionadas con los suelos del orden Vertisoles. En la zona de Alajuela los niveles freáticos se mantuvieron igual en ambas épocas del año.

En la zona de Santo Domingo, Heredia y alrededores, como ya se mencionó, en la época seca se tienen niveles freáticos muy profundos (12-16 m), mientras que en la época lluviosa rondan entre los 6 y 12 m, que igualmente son profundos.

Como se mencionó, adicionalmente se realizó un mapa de nivel freático tanto en la época seca como lluviosa, con los mismos datos, pero interpolando los puntos según las zonas de la GAM divididas por los cauces de los ríos Virilla y María Aguilar. En general, el comportamiento del nivel freático es muy similar al descrito anteriormente. En el caso de la época seca, se conservan niveles más profundos en Cartago, Escazú y Alajuelita, donde pasaron de estar entre 2 y 6 m a alcanzar valores incluso menores a los 2 m. En la zona central entre los cauces, se observa que, al oeste del cantón de San José, los niveles freáticos son más profundos que los obtenidos con a la interpolación de todos los puntos. En la Figura 61 se muestra el mapa del nivel freático en época seca, interpolando todos los puntos juntos, y en la Figura 63 dividida por los cauces.

En el caso del mapa de época lluviosa, cuando se realizó la división por cauces, los niveles freáticos son menos altos que cuando se interpolan todos juntos. Principalmente en las zonas de Desamparados, Curridabat, Santa Ana, Escazú y Alajuela. Sin embargo, en general el comportamiento entre ambos mapas es muy similar. En la Figura 62 se muestra el mapa del nivel freático en época lluviosa, interpolando todos los puntos juntos, y en la Figura 64 dividida por los cauces.

Es importante mencionar que por un lado el nivel freático es una condición estacional y por otro lado se trata de zonas y no líneas, por lo que los mapas presentados en este trabajo final de graduación cumplirán adecuadamente con el propósito de servir de marco inicial para investigaciones geotécnicas ya particulares para una obra específica.

La presencia de nivel freáticos altos puede generar complicaciones en términos geotécnicos, como el aumento en el contenido de humedad de los suelos, lo que genera una disminución

en la cohesión y su resistencia, así como disparar el potencial de colapso de un limo colapsable y la expansión de los suelos con presencia de arcillas expansivas, aumentando el riesgo de falla de la estructura, además, cuando los suelos se encuentran saturados presentan mayores asentamientos. Otro tema de interés geotécnico es que, cuando se tienen niveles freáticos cercanos a la superficie y a nivel de la cimentación, se incrementa la presión que actúa en las estructuras, como el caso de los empujes sobre muros de retención. Adicionalmente, se pueden generar infiltraciones a través de muros e inundaciones durante las excavaciones y en los sótanos (Bogantes, 1999).

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Las conclusiones más relevantes del presente estudio son las siguientes:

- Se elaboró una nueva propuesta de zonificación geotécnica que cubre una mayor extensión (1696 km²) que la elaborada por Bogantes en 1999 (596 km²) y que cuenta con una mayor cantidad de estudios geotécnicos.
- 2. En las zonas hacia el noreste de la GAM, como Cornado, Moravia, Barva, San Rafael y el norte de Cartago, son las que tienen presencia de suelos blandos y muy blandos, principalmente en los cinco primeros m de espesor. Estas zonas están compuestas por suelos provenientes de materiales volcánicos como cenizas, los cuales se caracterizan por su consistencia blanda.
- 3. En la GAM la zona norte y este, está compuesta principalmente por limos, mientras que hacia el oeste y sur se observa la presencia de arcillas. Los limos colapsables se extienden hacia el norte de Alajuela, Santa Bárbara de Heredia, Flores, Heredia, Moravia, Coronado, Goicochea, Montes de Oca, hacia el norte de Curridabat, el noroeste de La Unión, en Cartago y Oreamuno. Mientras que las arcillas expansivas hacia el sur y el oeste, como en algunas zonas de Cartago (sur), Desamparados, Alajuelita, Escazú, Santa Ana y el sur de Alajuela.
- 4. Las zonas con niveles freáticos cercanos a la superficie se ubican hacia el sur y el oeste de la GAM, como Santa Ana, Escazú, Desamparados, Cartago hacia el Sur y Alajuelita, en ambas épocas del año. Adicionalmente, se detectó una zona con niveles freáticos altos durante la época lluviosa en los alrededores de Moravia y San Isidro de Heredia. A partir de los mapas de nivel freáticos elaborados considerando la separación por los cauces del río Virilla y María Aguilar se determinó que esta división no generó grandes cambios en los resultados de los mapas.
- 5. A pesar de que la información utilizada por Bogantes en su zonificación proviene de una fuente distinta a la utilizada en el presente trabajo final de graduación, las propiedades geotécnicas de los suelos de la GAM en ambas zonificaciones coinciden.

- 6. Se desarrolló una base de datos georreferenciada con información de 980 proyectos ubicados a lo largo de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica, de los cuales se extrajeron parámetros geotécnicos de 2180 perforaciones.
- 7. Con el Sistema de Información Geográfica QGIS de uso libre se obtuvieron los resultados deseados para la elaboración de los mapas.
- 8. Los mapas propuestos son zonificaciones generalizadas con las propiedades que se encuentran comúnmente en los alrededores de la GAM, esto no implica que no se pueda encontrar la presencia de otro tipo de suelo, espesor de estrato, consistencia del suelo o profundidad del nivel freático diferente a las características zonificadas.
- 9. Los mapas realizados pueden ser utilizados para la actualización del Código de Cimentaciones de Costa Rica, ya que cuentan con una cantidad de datos mayor y cubren un área mayor a la zonificación actual.

5.2. Recomendaciones

Las recomendaciones del presente proyecto son las siguientes:

- Los mapas realizados son de gran utilidad para etapas preliminares de proyectos y para alertar a los ingenieros sobre posibles problemas geotécnicos. Sin embargo, nunca sustituirá un estudio geotécnico ni son datos que se pueden utilizar para un diseño de cimentaciones.
- 2. A pesar de que esta es una segunda propuesta de zonificación geotécnica en la GAM es recomendable comprobar y validar el mapa a partir de la recolección de más información. Existen zonas donde la densidad de estudios es baja, por lo que es recomendable realizar pruebas de campo o contar con la colaboración de otras empresas geotécnicas que hayan realizado estudios geotécnicos en estas zonas. Principalmente se trata de los cantones de Alvarado, Aserrí, Atenas, El Guarco, Oreamuno, Paraíso, Poás, y Santa Bárbara.
- 3. Parte de las limitaciones para el mapa de nivel freático es que se analizaron únicamente perforaciones SPT, por lo que se podrían analizar perforaciones a rotación, con el fin de detectar los niveles freáticos que se encuentran debajo de los estratos de suelos. O incluso se podría analizar la información de pozos existentes a lo largo del país para contar con más información de profundidades de nivel freático y espesores de suelo.

- 4. Con el fin de mejorar la veracidad de los datos de profundidades de nivel freáticos, espesores de estratos de suelos y tipos de suelo, se recomienda considerar la topografía en el análisis y elaboración de futuras versiones de los mapas.
- 5. En cuanto al mapa de tipo de suelos, se podrían realizar pruebas de granulometría en las zonas donde existen limos colapsables, con el fin de contar con otra forma de verificar la existencia de estos suelos en las zonas descritas en capítulos anteriores.
- 6. Con la misma metodología empleada en el presente trabajo se podrían generar nuevas zonificaciones en otros sectores del país, es de gran importancia para los ingenieros contar con mapas geotécnicos para alertar sobre posibles problemas a tiempo y previo a la ejecución de un proyecto.
- 7. Cuando se trabaje con parámetros geotécnicos y con el programa QGIS, se recomienda utilizar el método de interpolación IDW, además de utilizar un filtro, con el fin de suavizar las superficies obtenidas.
- 8. Se recomienda la elaboración de una base de datos pública con datos de otras fuentes, con el fin de que trabajos como el presentado en este documento puedan ser de uso más generalizado.
- 9. Es recomendable realizar una actualización oficial de los mapas del Código de Cimentaciones de Costa Rica.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro et al. (2016). Guía para ala elaboración de mapas. Costa Rica: Universidad Nacional.
- Alvarado, A., Mata, R. & Chinchilla M. (2014). Arcillas Identificadas en Suelos de Costa Rica a Nivel Generalizado Durante el Período 1931-2014. [Versión electrónica]. *Agronomía Costarricense.* 38(1), 107-131.
- Alvarado, G., Barquero, R., Waldo, T., López, A., Cerdas, A. & Murillo, J. (2009). Geología de la Hoja General, Costa Rica. [Versión electrónica]. *Revista Geológica de América Central,* 40, 99-109.
- American Society for Testing and Materials. (2010). ASTM D-14318: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. United States of America
- American Society for Testing and Materials. (2011). *ASTM D-1586: Standard Penetration Test.*United States of America
- American Society for Testing and Materials. (2011). ASTM D-2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).

 United States of America
- Arguedas, B. (1995). Lineamientos generales para la elaboración de las cartas de zonificación.

 Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil,

 Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Asociación Costarricense de Geotecnia. (2009). *Código de Cimentaciones de Costa Rica*. Costa Rica: Editorial Tecnológico de Costa Rica.
- Badillo, J. & Rodríguez, R. (2005). Mecánica de suelos: *Fundamentos de la mecánica de suelos*. México: Editorial Limusa.
- Berry, P. & Reid, D. (1993). Mecánica de Suelos. Colombia: McGraw-Hill.
- Bertsch, F., Mata, R. & Henríquez, C. (1993, octubre). Características de los Principales Ordenes de Suelos Presentes en Costa Rica. En: *IX Congreso Nacional Agropecuario y de Recursos Naturales*. San José, Costa Rica
- Bogantes, R. (1999). Propuesta de Zonificación Geotécnica para el área Metropolitana. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Bogantes, R., Laporte, G., Quesada, C., & Vásquez, A. (s.f.). *Zonificación Geotécnica General de Costa Rica, considerando elementos edáficos y climáticos.*

- Bolaños, M. (1994). *Necesidad de un Código de Cimentaciones en Costa Rica*. Costa Rica: Revista del Colegio.
- Das, M. (2015). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. México: Cengage Learning Editores.
- Das, M. (2012). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones*. México: Cengage Learning Editores.
- Buzai, G. (2011). Geografía y Sistemas de Información Geográfica Evolución Tórico-Metodológica Hacia Campos Emergentes. [Versión electrónica]. *Revista Geográfica de América Central, 15-67.*
- Castillo, R. (1993). *Geología de Costa Rica*. Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Castro, E. (2012). Estudio de un suelo arcilloso expansivo del Valle Central Occidental de Costa Ricas para su uso como subrasante. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA). (2010). Mapa Digital de Suelos de Costa Rica. Extraído el 11 mayo, 2020 del sitio web de Centro de Investigaciones Agronómicas UCR: http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=139
- Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. (2010). *Código Sísmico de Costa Rica 2010, Revisión 2014".* Costa Rica: Editorial Tecnológico de Costa Rica.
- Consejo Nacional de Planificación Urbana. (2013). PlanGAM 2013. San José, Costa Rica.
- Crespo, A. (2013). La Historia geográficamente integrada y los Sistemas de Información Geográfica (SIG): concepto y retos metodológicos. [Versión electrónica]. *Historia Moderna*, 7, 1-46.
- Deyner, p., Arias, O., Soto, G., Obando, L. & Salazar, G. (2001). *Mapa Geológicos de la Gran Área Metropolitana*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Hellawell, E., Lamont-Black, J., Kemp, A. & Hughes, S. (2001). GIS as a tool in geotechnical engineering. [Versión electrónica]. *Geotechnical Engineering*. 149(2), 85-93.
- Henriquez, C., Calbaceta, G., Bertsch, F. & Alvarado, A. (2014). Principales Suelos de Costa Rica. Extraído el 11 mayo, 2020 del sitio web de Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica: http://www.mag.go.cr/bibioteca_virtual_ciencia/suelos-cr.html
- Herrera, G. (1998) Recomendaciones para la aplicación y uso del Código de Cimentaciones de Costa Rica. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en

- Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Hidro Ambiente. (2020). ¿Qué es un acuífero? Extraído el 6 noviembre, 2021 del sitio web de Hidro Ambiente Consultorías: https://www.hidroambientecr.com/notas/que-es-un-acufero
- Huapaya, A.S. (2013). Recorrido a Través del Tiempo Geológico de Costa Rica. Costa Rica: Ministerio de Ambiente y energía.
- Ibáñez, C., Palomeque, S. & Fontúrbel, F. (2004). *Elementos Principales del Suelo, Geodinámica y Dinámica de los Principales Componentes del Suelo.* Bolivia: Editorial Publicaciones Integrales.
- Instituto Geográfico Nacional. (2015) Captura, Gestión y Difusión de Datos Geoespaciales: El Caso de Costa Rica. Extraído el 10 de mayo, 2020, de https://unstats.un.org/unsd/geoinfo/RCC/docs/rcca10/E%20Conf_103_30_Cost a%2 ORica_Ponencia_UNRCCA_Max%20A%20Lobo-Hernandez.pdf
- Instituto de Fomento y Asesoría Municipal (IFAM). (2016). Caracterización de los cantones de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) (2014). Atlas Digital de Costa Rica. Extraído el 15 de mayo, 2021, de https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7477.
- Juárez, E. (2005). Mecánica de Suelos. México: Editorial Limusa.
- Laporte, G. (2007). Reflexiones sobre Cimentaciones en Condiciones Problemáticas. San José, Costa Rica.
- Madrigal, R. & Rojas, Elena. (1980) *Manual Descriptivo del Mapa Geomorfológico de Costa Rica*. Costa Rica: Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables
- Masís, D. (2017). Zonificación y caracterización geotécnica de los suelos de la sede central del Instituto Tecnológico de Costa Rica Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, Escuela de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Ministerios de Ambiente y Energía (MINAE). (2017). *Lineamientos y estándares del mapa geológico de Costa Rica a escala 1:50 000*. Costa Rica: DGM.
- Ministerio de Vivienda. (2008). Plan regional Urbano de la Gran Área Metropolitana PRUGAM. San José, Costa Rica.

- Olaya, V. (2014). Sistemas de Información Geográfica. España: Plataforma de publicación independiente CreateSpace.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (1976). *Engineering Geological Maps.* París: UNESCO.
- Peck, R., Hanson, W. & Thornburn, T. (1983). *Ingeniería de Cimentaciones*. México: Editorial Limusa.
- Poder Ejecutivo de Costa Rica. (1997). Plan Regional Desarrollo Urbano Gran Área Metropolitana (GAM) por INVU. Decreto N° 13583. San José, Costa Rica.
- Poder Ejecutivo de Costa Rica. (2014). Plan GAM 2013-2030. Decreto N° 38334. San José, Costa Rica.
- Quirós. L. (1985). Zonificación preliminar de los suelos del Área Metropolitana. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Solano, J. & Villalobos, R. (2001). Aspectos Fisiográficos aplicados a un Bosquejo de Regionalización Geográfico Climático de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- UNESCO. (1976). Engineering geological maps. París: The Unesco Press.
- Universidad de Costa Rica (UCR). (2016). CIA actualiza Mapa Digital de Suelos de Costa Rica. Extraído el 11 mayo, 2020 del sitio web de Universidad de Costa Rica: https://www.ucr.ac.cr/noticias/2016/08/04/cia-actualiza-mapa-digital-de-suelos-de-costa- rica.html
- Vargas, W. (2010). *Depósitos de Suelos Transportados Notas del curso Mecánica de Suelos:*Escuela de Ingeniería Civil. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Vargas, W. (2010). *Origen del Suelo Notas del curso Mecánica de Suelos: Escuela de Ingeniería Civil.* Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Vargas, W. (2010). *Origen y Composición del Suelo Notas del curso Mecánica de Suelos:*Escuela de Ingeniería Civil. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Vargas, W. (2010). *Agua en los suelos. Notas del curso Mecánica de Suelos: Escuela de Ingeniería Civil* Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Villatorio, M., Henriquez, C. & Sancho, F. (2008). *Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación del pH, Ca, CICE y P del suelo*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

- Vindas, J.C. (1988). Caracterización geotécnica de las áreas de reserva habitacional dentro de la Gran Área Metropolitana. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Wielemaker, G. & Vogel, A. (1993). *Un Sistema de Información de Suelos y Tierras para la Zona Atlántica de Costa Rica.* Holanda: Universidad Agrícola Wageningen.

7. ANEXOS

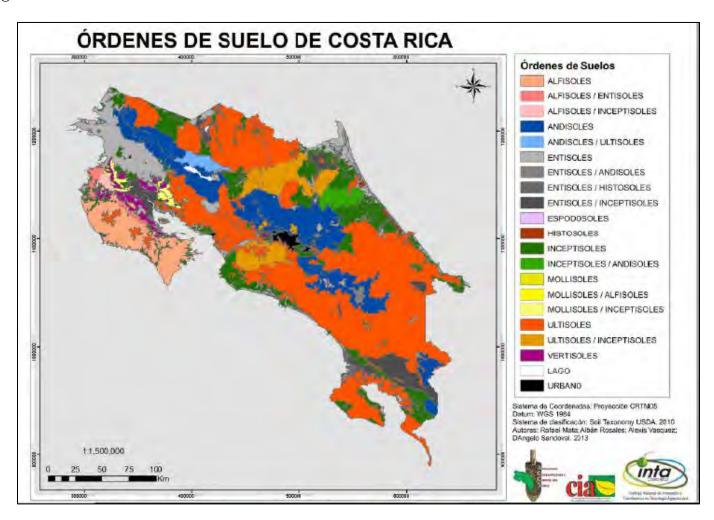


Figura A 1. Mapa de órdenes de suelos de Costa Rica Fuente: Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), 2010

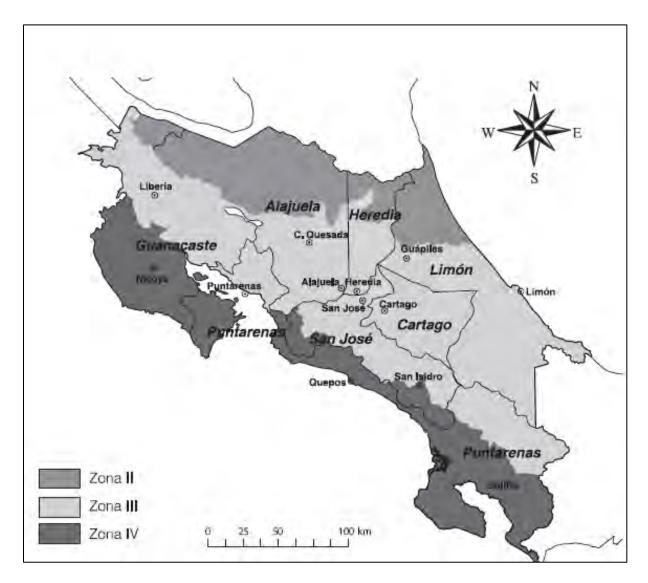


Figura A 2. Zonificación Sísmica Fuente: Código Sísmico de Costa Rica, 2010.

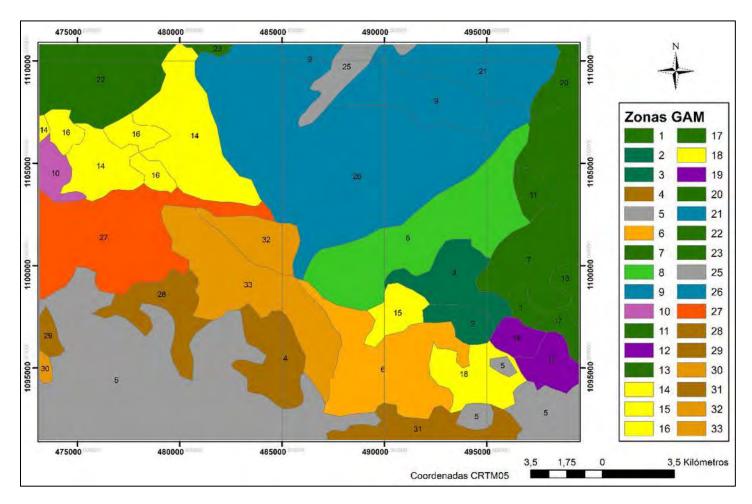


Figura A 3. Mapa de Zonificación Geotécnica Fuente: Bogantes, 1999

Cuadro A 1. Zonificación geotécnica de la GAM

Zona	Descripción			
1	Zona 1: Presencia de limos colapsables. Geología de depósitos piroclásticos. Nivel freático a menos de 5 m en invierno.			
2				
3	Zona 3: Suelos blandos. Geología de depósitos piroclásticos. Nivel freático a menos de 10 m en época Iluviosa.			
4	Zona 4: Presencia de arcilla café CH de un alto potencial de expansión.			
5	Zona 5: Presencia de arcilla gris CH de muy alto potencial de expansión. Sustrato rocoso superficial (a menos de 5 m de la superficie)			
6	Zona 6: Presencia de arcilla gris CH de muy alto potencial de expansión.			
7	Zona 7: Presencia de limos colapsables. Geología de depósitos piroclásticos. Nivel freático a menos de 10 m en invierno.			
8	Zona 8: Suelos blandos. Geología de piroclastos.			
9	Zona 9: Condiciones favorables de cimentación.			
10	Zona 10: Presencia de arcilla rojiza CH de alto potencial de expansión.			
11	Zona 11: Suelos blandos. Geología de depósitos piroclásticos. Nivel freático a menos de 10 m en época lluviosa.			
12	Zona 12: Presencia de limos colapsables y arcilla gris subsuperficial, de alto potencial de expansión. Geología de depósitos piroclásticos.			
13	Zona 13: Presencia de limos colapsables. Geología de depósitos piroclásticos. Nivel freático a menos de 5 m en invierno.			
14	Zona 14: Presencia de suelos blandos de alta plasticidad, principalmente arcilla café CH de alto potencial dee xpansión y limos MH muy plásticos.			
15	Zona 15. Presencia de suelos blandos y de arcilla gris CH de un muy alto potencial de expansión. El nivel freático se ubica a menos de 10 m durante todo el año.			
16	Zona 16: Presencia de arcilla gris CH de muy alto potencial de expansión. Nivel freático a menos de 15 m en época lluviosa.			
17	Zona 6: Presencia de limos colapsables. Geología de depósitos piroclásticos. Nivel freático a menos de 15 m en invierno.			

Cuadro A 2. Zonificación geotécnica de la GAM (continuación)

18	Zona 23: Presencia de arcilla gris CH de muy alto potencial de expansión. Nivel freático a menos de 10 m en todo el año.
19	Zona 19: Presencia de arcilla gris, potencial de expansión muy alto. Presencia de limos colapsables. Nivel freático a menos de 10 m en invierno.
20	Zona 20: Suelos blandos. Geología de depósito piroclástico.
21	Zona 21: Condiciones favorables de cimentación.
22	Zona 22: Presencia de suelos blandos de alta plasticidad, principalmente arcilla café CH de alto potencial de expansión y limos MH muy plásticos. Geología de piroclastos.
23	Zona 23: Suelos blandos. Geología lávica, formación Barva.
25	Zona 25: Colada de lava Los Ángeles, roca muy cerca de la superficie del terreno. Pueden presentarse dificultades al realizar movimientos de tierra.
26	Zona 26: Condiciones de cimentación favorables.
27	Presencia de arcilla negra superficial, subyacida por arcilla gris ambas de muy alto potencial de expansión CH.
28	Zona 28: Presencia de arcilla gris y café CH de alto potencial de expansión.
29	Zona 29: Presencia de arcilla gris y café CH de alto potencial de expansión.
30	Zona 30: Presencia de arcilla gris de muy alto potencial de expansión.
31	Zona 31: Presencia de arcilla gris y café CH de alto potencial de expansión.

Fuente: Bogantes, 1999

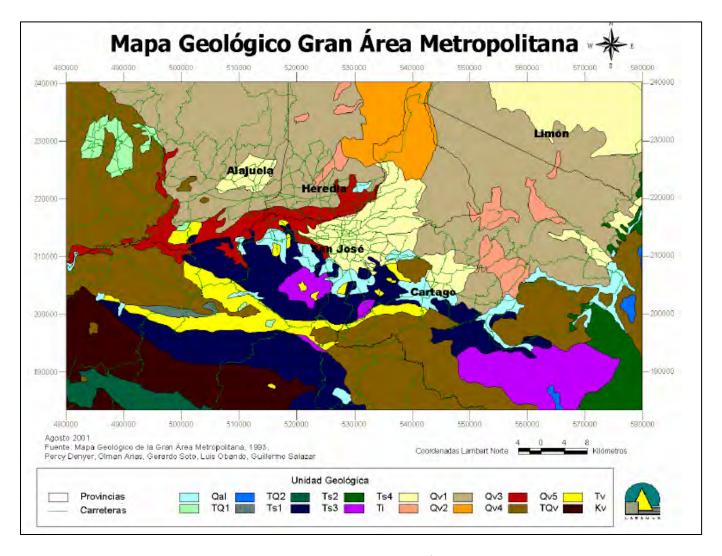
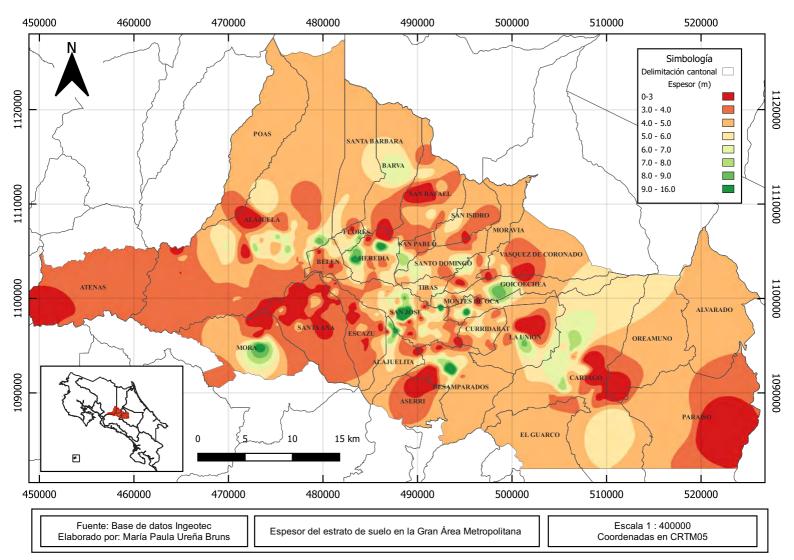
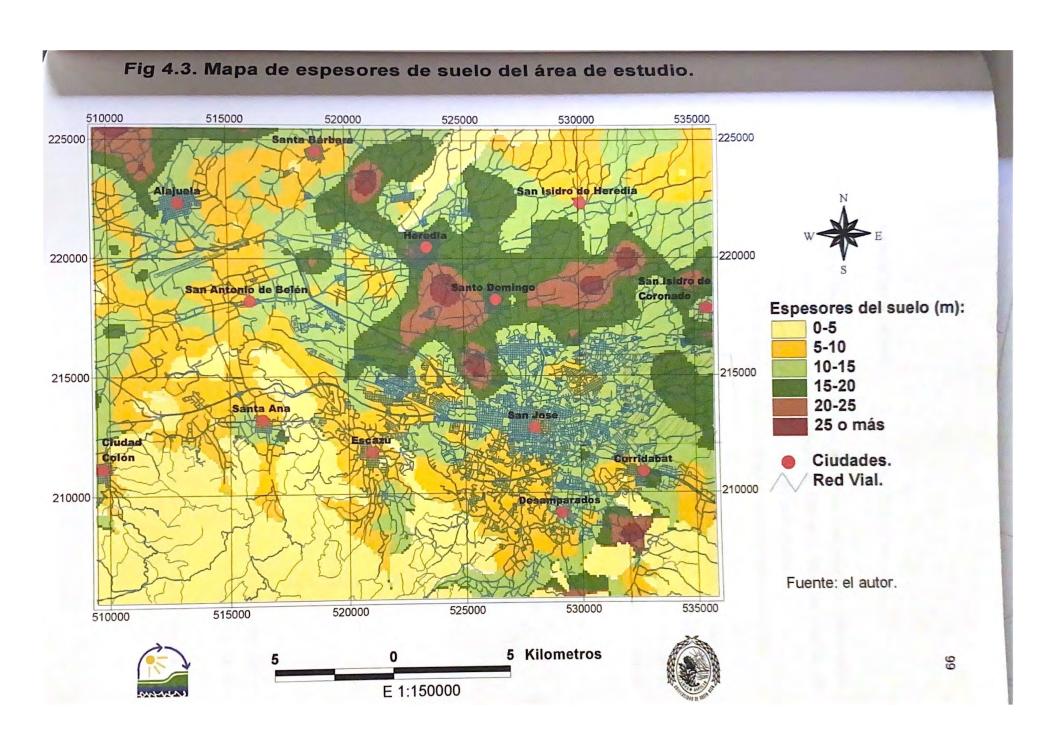


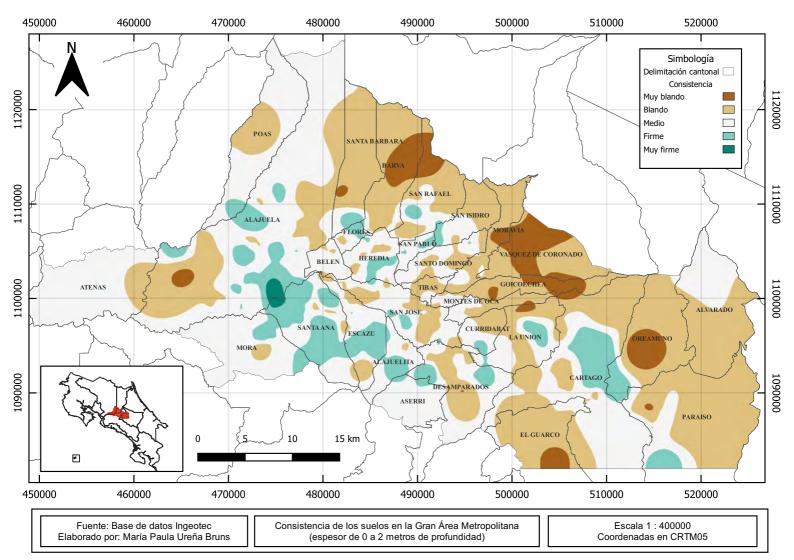
Figura A 4. Mapa geológico de la Gran Área Metropolitana Fuente: Deyner et al., 1993 Modificado por: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, 2001

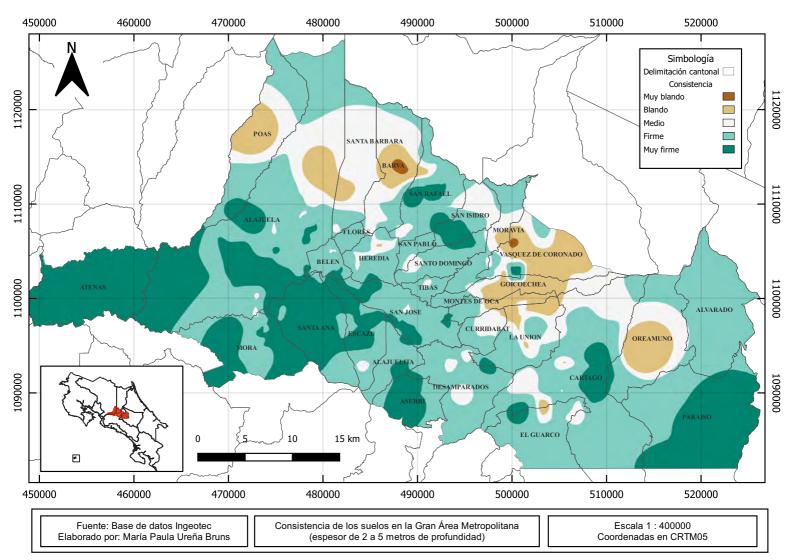
Tipo de Material	Arcillus expansiyas color gris	Limos arcillosos color café claro
Parámetro geotécnico		
Límite líquido [%]	77 – 150	6090
Límite plástico [%]	26 - 50	40 - 60
Límite de contracción [%]	9-18	8
Clasificación SUCS	CII	MH
% pasando la matta 200 [%]	90 - 95	80 - 85
Gravedad específica de sólidos (G _j)	2,63 - 2.70	2,68 - 2.73
Relación de vacíos natural (e)	1.10 - 1.80	1.50 - 2.30
Humedad natural [%]	40 - 50	70 - 80
Resistencia a penetración normalizada (N _i) _m	3-20	3-15
Peso volumétrico seco [kN/m³]	9,5-11	6.75 - 11
Presión de hinchamiento	hasta 700 kPa	Baja
Expansión libre (AASHTO)	100% a mayor	20-80%
Peso volumétrico seco máximo (Proctor) [kN/m³]	10-12,9	8.6-11
Humedad óptima (Proctor) [%]	25 - 39	50 - 105
Resistencia al corte no drenada [kPa]	40-100	20 - 50
Índice de compresión	0.30 - 0.70	0.55 - 0.70
Índice de humedad	1.4 - 2.4	8

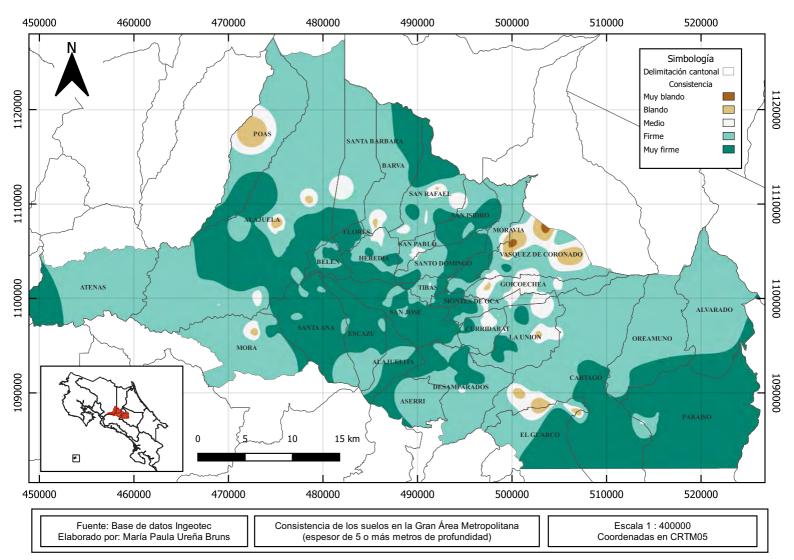
Figura A 5. Propiedades típicas de arcillas expansivas y limos de baja resistencia. Fuente: Código de Cimentaciones de Costa Rica, 2009

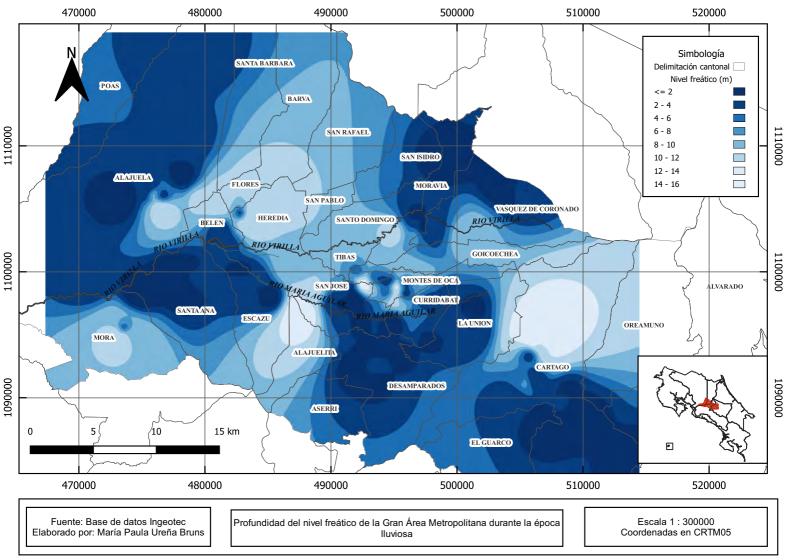


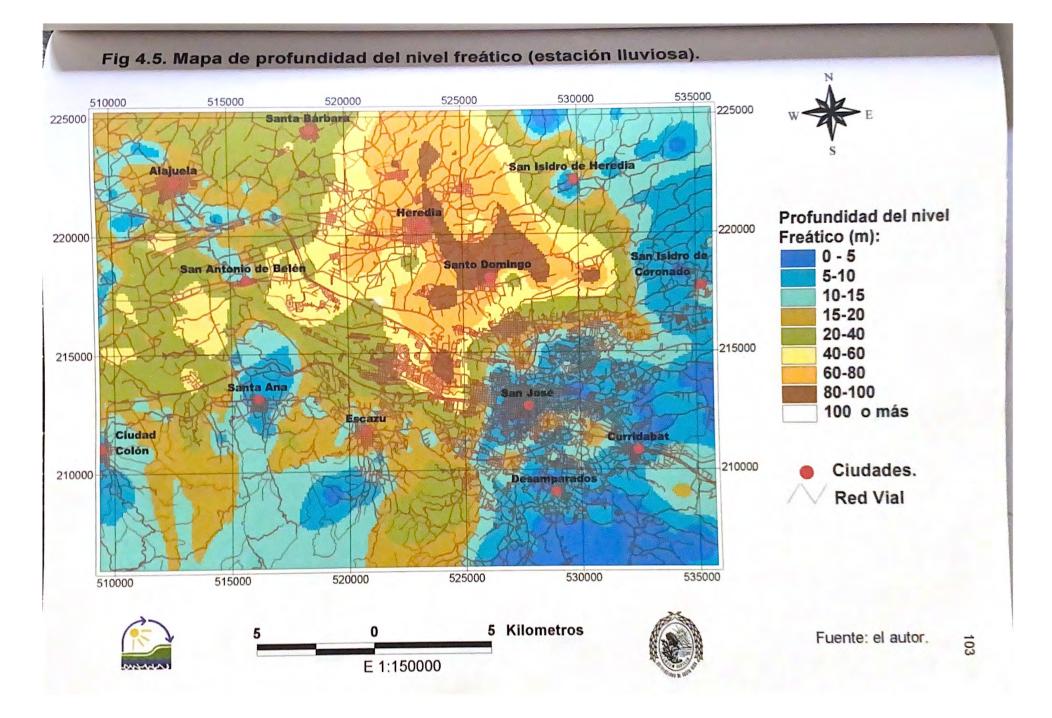


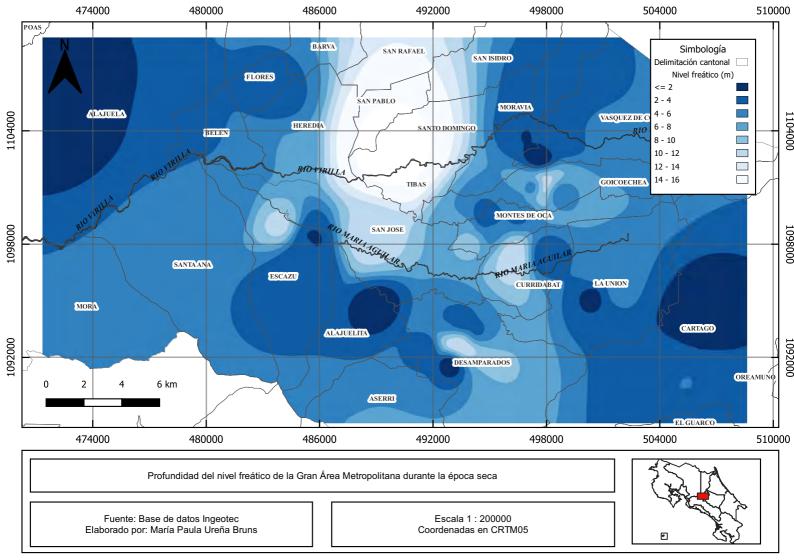


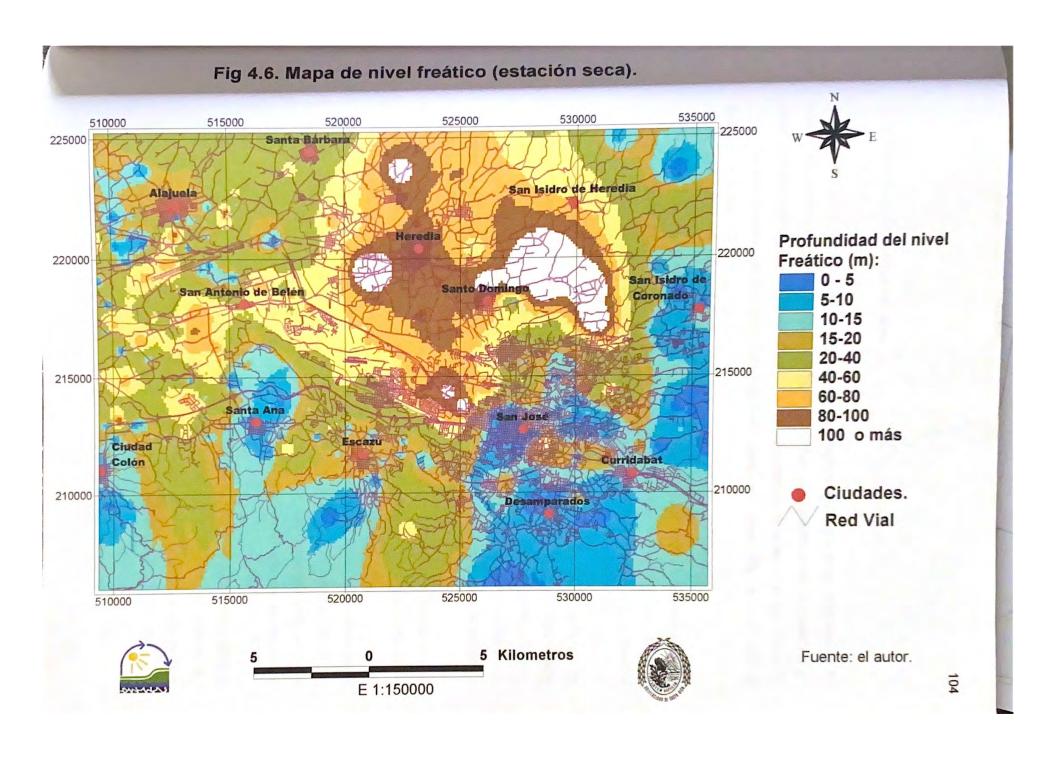


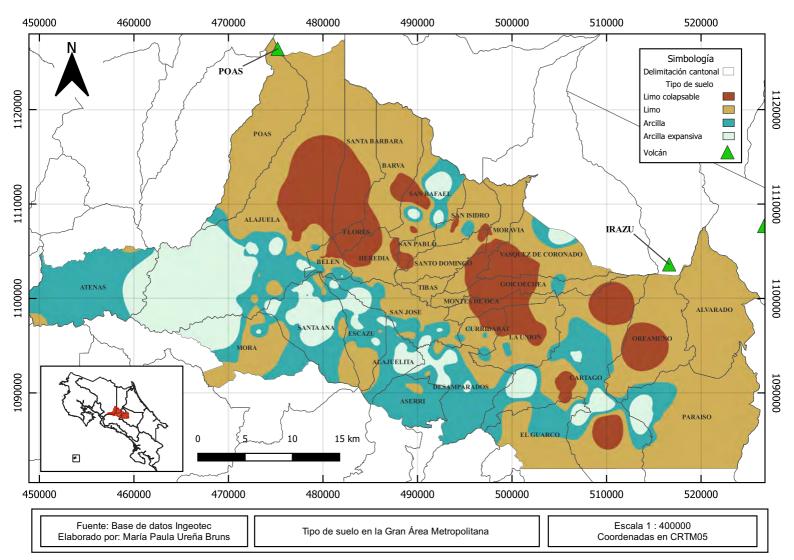












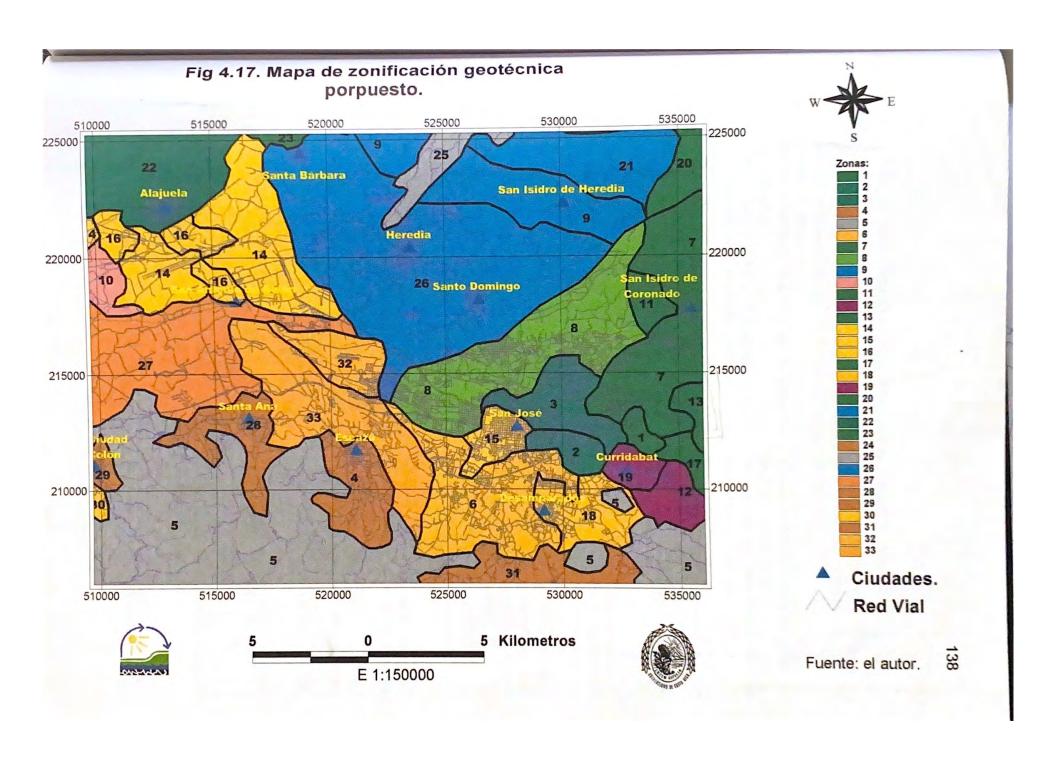


Tabla 4.9. Descripción de las áreas delimitadas en la zonificación propuesta.

ONA	DESCRIPCION DESCRIPCION	Cuitaria da dalimitación:
1	Zona 1: Presencia de limos colapsables. Geología de depósitos piroclásticos. Nivel freático a menos de 5m en invierno.	Criterios de delimitación: Nivel freático (menos de 5m en invierno)
2	Zona 2: Suelos blandos. Geología de depósitos piroclásticos	Quedó delimitada entre las zonas de arcillas y las de limos.
3	Zona 3: Suelos blandos. Geología de depósitos piroclásticos. Nivel freático a menos de 10m en época lluviosa.	Se delimitó por profundidad del nive freático (menor de 10m)
4	Zona 4: Presencia de arcilla café CH de un alto potencial de expansión.	Geología, abanicos aluviales del Su de San José.
5	Zona 5: Presencia de arcilla gris CH de muy alto potencial de expansión. Sustrato rocoso superficial (a menos de 5m de la superficie).	Coolegies unriedes del sur de Sar
6	Zona 6: Presencia de arcilla gris CH de muy alto potencial de expansión.	Presencia del mismo tipo de arcilla er toda la zona. Ver mapa de arcillas para los criterios de delimitación particulares.
7	Zona 7: Presencia de limos colapsables. Geología de depósitos piroclásticos. Nivel freático a menos de 10m en invierno.	Se utilizó el mapa hidrogeológico (zona de aluviones permeables), y e de nivel freático (profundidad menor que 10m durante todo el año).
8	Zona 8: Suelos blandos. Geología de piroclastos.	Geológico: depósitos piroclásticos.
9	Zona 9: Condiciones favorables de cimentación.	Por taxonomía de suelos.
10	Zona 10: Presencia de arcilla rojiza CH de alto potencial de expansión.	Por taxonomía de suelos.
11	Zona 11: Suelos blandos. Geología de depósitos piroclásticos. Nivel freático a menos de 10m en época lluviosa.	Se utilizaron los mapas de nive freático (menor de 10m) y el mapa hidrogeológico.
12	Zona 12: Presencia de limos colapsables y arcilla gris subsuperficial, de alto potencial de expansión. Geología de depósitos piroclásticos.	Espesor de suelo menor a 10m Coincide con la zona 37 del mapa de arcillas expansivas.
13	Zona 13:. Presencia de limos colapsables. Geología de depósitos piroclásticos. Nivel freático a menos de 5m en invierno.	
14	Zona 14: Presencia de suelos blandos de alta plasticidad, principalmente arcilla café CH de alto potencial de expansión y limos MH muy plásticos.	Por taxonomía de suelos.
15	Zona 15: Presencia de suelos blandos y de archia gris CH de un muy alto potencial de expansión. El nivel freático se ubica a menos de 10m durante todo el año.	de 10m todo el año.
16	Zona 16: Presencia de arcilla gris CH con un	Ubicación del nivel freático a meno

	notencial de expansión M	
	potencial de expansión Muy alto. Nivel freático a menos de 15m en época lluviosa.	de 15m en época lluviosa.
17	Zona 6: Presencia de limos colapsables. Geología de depósitos piroclásticos. Nivel freático a menos de 10m en invierno	Quedó delimitado al definir las áreas adyacentes.
18	Zona 23: Presencia de arcilla gris CH con un potencial de expansión muy alto. El nivel freático se ubica a menos de 10m todo el año	Ubicación del nivel freático a menos de 10m en época seca.
19	Zona 19. Presencia de arcilla gris, potencial de expansión muy alto. Presencia de limos colapsables. Nivel freático a menos de 10 m en invierno.	Geología de piroclastos y nivel freático a menos de 10m en invierno.
20	Zona 20: Suelos blandos. Geología de depósito piroclástico.	Geológico y una pequeña área por taxonomía.
21	Zona 21: Condiciones favorables de cimentación.	Delimitado por taxonomía.
22	plasticidad, principalmente arcilla café CH de alto potencial de expansión y limos MH muy plásticos. Geología de piroclastos.	Geológico: depósitos piroclásticos.
23	Zona 23: Suelos blandos. Geología lávica, Fm. Barva.	Taxonómico.
25	Zona 25: Colada de lava Los Angeles, roca muy cerca de la superficie del terreno. Pueden presentarse dificultades al realizar movimientos de tierra.	Geológico.
26	Zona 26: Condiciones de cimentación favorables.	Por taxonomía de suelos.
27	Zona 27: Presencia de arcilla negra superficial, subyacida por arcilla gris ambas de muy alto potencial de expansión CH.	Por taxonomía de suelos
28	Zona 28: Presencia de arcilla gris y café CH, de alto potencial de expansión.	Geología de abanico aluvial.
29	Zona 29: Presencia de arcilla gris y café CH, de alto potencial de expansión.	Geología de abanico aluvial.
30	Zona 30: Presencia de arcilla gris con un potencial de expansión muy alto.	Geología de ignimbritas.
31	Zona 31: Presencia de arcilla gris y café CH, de alto potencial de expansión.	Geología de abanico aluvial.
		Fuente: el autor

Fuente: el autor.