

Zonificación geotécnica mediante estadísticos descriptivos para suelos de Costa Rica

Geotechnical zoning using descriptive statistical parameters for Costa Rica's soils

Rafael Baltodano-Goulding¹

Fecha de recepción: 3 de marzo, 2023
Fecha de aprobación: 23 de junio, 2023

Baltodano-Goulding, R. Zonificación geotécnica mediante estadísticos descriptivos para suelos de costa rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 1. Enero-Marzo, 2024. Pág. 172-201.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i1.6675>

¹ LabUnsat, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. Escuela de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rafael.baltodanogoulding@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-9607-2196>

Palabras clave

Datos estadísticos; método geoespacial; método geoestadístico; tipos de suelo; zonificación geotécnica.

Resumen

Con el objetivo de proveer información adicional para la realización de análisis y diseños geotécnico mediante un enfoque probabilístico cuando no se cuenta con una cantidad de datos que permita un procesamiento estadístico de los parámetros requeridos del suelo, se elaboró una zonificación geotécnica mediante estadísticos descriptivos para los suelos encontrados en Costa Rica, tomando en consideración el mapa geotécnico y las condiciones climáticas de Costa Rica. Para el ámbito geotécnico, se consideraron los mapas de zonificación geotécnica establecidos en el Código de Cimentaciones, mientras que en el meteorológico se tomaron en cuenta el Atlas Climatológico del Instituto Meteorológico Nacional. Como parte de los resultados se obtuvieron los valores promedio y la desviación estándar de diferentes tipos de suelos presentes en la zonificación efectuada en el país. La información geotécnica de los diferentes materiales se obtuvo de campañas geológicas y estudios geotécnicos privados. Estos datos son importantes porque al considerarlos, se logra disminuir la incertidumbre asociada a las características del suelo.

Keywords

Geospatial method; geostatistical method; geotechnical zoning; statistical data; types of soils.

Abstract

A geotechnical zoning was created using descriptive statistics for the soils found in Costa Rica, taking into consideration the geotechnical map and the climatic conditions of Costa Rica. This information can be used to provide additional information when geotechnical analyses and designs are to be performed through a probabilistic approach and an appropriate quantity of data is lacking to adequately allow for the statistical processing of soil parameters. Consideration of the Geotechnical Zoning included in the Costa Rica Foundation Code was taken. Additionally, Climatological Atlas of the National Meteorological Institute was also considered. As part of the results attained, the average values and the standard deviation of different types of soils were obtained. The geotechnical information on the different materials was obtained from geological surveys and private geotechnical studies. This data is important because when considering them, it is possible to reduce the uncertainty associated with the characteristics of the soil.

Introducción

La incertidumbre en los diseños ingenieriles debido a las propiedades geotécnicas está asociada al hecho que el suelo es un material cuyas características están sujetas a su origen de formación y a las condiciones climáticas espaciales y temporales [1]. La estimación adecuada de las propiedades geotécnicas del suelo ya que son los parámetros iniciales requeridos en cualquier análisis o diseño en un proyecto ingenieril [2][3]. La situación ideal para obtener estos datos es poder realizar una cantidad estadísticamente significativa de ensayos geotécnicos de campo y laboratorio para efectuar un análisis probabilístico de los resultados que permita cuantificar adecuadamente la incertidumbre asociada a los materiales presentes en el proyecto. Sin embargo, en algunos proyectos, como por ejemplo viviendas, no se cuenta con el presupuesto para poder realizar una investigación geotécnica que permita la

identificación completa y precisa de las condiciones de heterogeneidad del sitio, por lo que la representatividad de los muestreos realizados no siempre alcanza los niveles de confianza deseables [2][4].

Es común que en proyectos no sea posible realizar un estudio geotécnico detallado del terreno por aspectos económicos y plazos para ejecutar la obra. Por esta razón, al no contar con suficiente información para cuantificar adecuadamente la incertidumbre asociada a los parámetros necesarios para el análisis y diseño geotécnico en ocasiones es necesario recurrir a altos valores de factores de seguridad para poder garantizar niveles de riesgo y de desempeño aceptables. El factor de seguridad ha sido una base para el diseño determinístico de las estructuras. No obstante, haber obtenido un factor de seguridad mayor a 1, considerando los valores de las propiedades geotécnicas utilizados en el diseño, no garantiza que la estructura será estable por la variabilidad de las características del suelo, ya que mediante esta metodología no es posible conocer la confiabilidad del modelo utilizado [1][2].

Para poder realizar análisis y diseños probabilísticos se debe contar con una gran cantidad de datos que permita determinar los valores promedios y su correspondiente medida de dispersión, sin embargo, cuando no se cuenta con esta información se pueden obtener coeficientes de variación indicados en la literatura, que luego se pueden utilizar para realizar una simulación o aplicar algún otro método probabilístico. A pesar de que se cuenta con información de este tipo, por ejemplo, brindada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América[3], es posible establecer una base de datos estadísticos del suelo con información de Costa Rica, de esta forma en caso de contar con la posibilidad de obtener estadísticos generados del proyecto, se pueden suponer valores de los parámetros geotécnicos a partir de la información analizada con datos recopilados de otro proyectos realizado en la misma zona.

Como resultado de la investigación realizada se presentan los valores de promedio y desviación estándar de diferentes parámetros geotécnicos para los suelos hallados en Costa Rica. Para algunas provincias se tienen estos datos estadísticos para la cohesión no drenada, peso unitario total y grado saturación del suelo, mientras que otras cuentan con información adicional para el ángulo de fricción efectivo. Esta situación indica que hay suficiente información para realizar un análisis estadístico tanto para un diseño geotécnico a corto plazo (condición no drenada) como para largo plazo (condición drenada) para algunas regiones nacionales.

Metodología

Para poder obtener los datos de promedio y desviación estándar de diferentes propiedades geotécnicas de los suelos encontrados en Costa Rica, se llegaron a aplicar dos métodos. Uno de ellos consiste en un análisis geoespacial, donde se ubican las muestras de suelo recolectadas con sus coordenadas para poder agrupar sus resultados de los ensayos de laboratorio y, de esta forma, generar una clasificación de los datos por zonas en el territorio nacional. El otro método aplica un análisis geoestadístico, que en él se aplica un modelo geoespacial, pero también se predice la distribución de los resultados del ensayo de laboratorio en las zonas contempladas en el país [4][5][6][7]. Esta base de datos estadísticos se realizó en tres agrupaciones por provincias:

1. San José y Cartago con el método geoespacial [8];
2. Guanacaste, Puntarenas y Limón con el método geoestadístico [9];
3. Heredia y Alajuela con el método geoespacial [10].

En términos generales, las tres agrupaciones siguieron la misma metodología que consta de tres pasos: recolección; georreferenciación; y agrupación de los datos. No obstante, para cada grupo de provincias se realizaron diferentes procedimientos para realizar estos tres pasos. Los análisis hechos para estos grupos de provincias fueron realizados como parte del proyecto de investigación 321-B2-274 Diseño probabilístico de estructuras geotécnicas cuantificando la incertidumbre asociada a los cambios en el grado de saturación de los suelos en Costa Rica, el cual tiene aportes de cuatro diferentes proyectos de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. A continuación, se detalla el procedimiento seguido para obtener la base de datos estadísticos de suelo de cada una de estas agrupaciones realizadas.

Resultados

San José y Cartago

El procedimiento seguido y los resultados obtenidos sobre la base de datos estadísticos para las provincias de San José y Cartago estuvo a cargo de Valverde [8]. Primero, se realizó la recolección de datos provenientes de distintas fuentes, como las campañas geológicas hechas por la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica y estudios geotécnicos efectuados por dos empresas geotécnicas privadas. Sin embargo, los datos utilizados fueron los de los estudios geotécnicos hechos por las empresas privadas porque no se tenía una cantidad considerable de muestras para análisis estadístico con las campañas geológicas. Por esta razón, los valores de las campañas geológicas sirvieron como parámetro de comparación con los valores calculados en los estudios geotécnicos. Con respecto a los estudios geotécnicos considerados en la base de datos, se tomaron en cuenta aquellos que tuviesen información de los límites de consistencia del suelo, números de golpes del ensayo de penetración estándar (SPT) y contenido de humedad del suelo. Finalizado el proceso de selección de datos, la base para estas zonas cuenta 702 muestras de suelo.

Adicionalmente, se utilizaron aquellos estudios geotécnicos con resultados experimentales del peso unitario total (233 datos) para determinar la exactitud de la correlación utilizada en aquellas muestras de suelo que no contaban con este parámetro. Para calcular el peso unitario total (γ_T) del suelo, se usó la siguiente ecuación:

$$\gamma_T = \frac{G_s \gamma_w (1 + w)}{1 + e_c} \quad (1)$$

Donde G_s es la gravedad específica, γ_w el peso unitario del agua, w el contenido de humedad gravimétrico del suelo y e_c la relación de vacíos del material. Al contar en todos los casos con estos valores, fue necesario realizar una estimación utilizando la ecuación 2 y 3:

$$e_c = \frac{C_c}{0,317} + 0,22 \quad (2)$$

$$C_c = 0,0068(w_n + 2,8) \quad (3)$$

Donde C_c es el índice de compresión del suelo y w_n el contenido de humedad gravimétrica natural de la muestra. Con respecto a la gravedad específica del suelo, se usó un valor recomendado en el trabajo de Laporte & Saenz [11], el cual es de 2,69, independientemente de la clasificación de los materiales analizados.

Para obtener el valor de la cohesión no drenada, se utilizó la siguiente ecuación 4, la cual es de uso frecuente en el país [12]:

$$C = \frac{N_{SPT}}{2} \quad (4)$$

Donde C es la cohesión en ton/m² y N_{SPT} es el número de golpes de mazo en 30 cm de recorrido. Esta correlación puede llegar a dar valores muy altos de cohesión, por lo que no se tomó en cuenta para resultados de N_{SPT} mayores a 50 golpes a la hora del cálculo del promedio final. Asimismo, no se utilizaron metodologías de corrección de los valores de N_{SPT} ya que no es común su uso a nivel privado, además de que son dependientes del equipo utilizado.

Por último, el valor de saturación (% S) se obtuvo con la ecuación 5:

$$\%S = \frac{G_s w}{e_c} \quad (5)$$

Esta ecuación llega a dar un valor aproximado del valor real porque hay ocasiones en las que hay valores mayores al 100%, situación que es físicamente imposible porque no se puede tener un volumen de agua superior al volumen de vacíos, partiendo del supuesto de volumen constante, por lo que se supone que el peso volumétrico no cambia al variar el contenido de humedad. Luego, se georreferenciaron las perforaciones que se consideraron en la muestra para la base de datos. Para poder realizar este paso, algunas perforaciones contaban con las coordenadas exactas, mientras que la mayoría tenía el número de plano catastro, por lo que se usaron las coordenadas aproximadas de cada propiedad. Para aquellas perforaciones donde no se tenía ninguna de esta información, se utilizó la dirección de cada uno de los proyectos, y se aproximó su posición en el mapa para obtener las coordenadas. Después, las muestras de suelo fueron clasificadas por tipo de material, según la clasificación establecida por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), utilizando los resultados de los límites de consistencia del suelo. Con toda esta información, se logró introducir en un mapa del área de interés la ubicación de las muestras de suelo consideradas, considerando la clasificación geotécnica.

Para poder clasificar los datos utilizados por zona, se usó la zonificación geotécnica que se presenta en el Código de Cimentaciones de Costa Rica [13] (2002) realizada por Bogantes [14][15]. Entonces, se colocaron las coordenadas de las muestras de suelo en el mapa de zonificación geotécnica para poder separar las muestras en cada zona y, de esta manera, generar promedios y desviaciones estándar para cada parámetro geotécnico considerado, por tipo de suelo según SUCS. Algunas de las zonas establecidas en el mapa se fusionaron por la similitud en los materiales que describen.

Guanacaste, Puntarenas y Limón

Esta parte de la base de datos se trabajada por Bravo [9]. La metodología seguida para obtener los parámetros estadísticos de las propiedades geotécnicas de los suelos encontrados en las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón se inició con la recolección de los datos. En este caso, se utilizó información obtenida de proyectos de graduación, campañas geológicas de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica y estudios geotécnicos facilitados por instituciones y empresas públicas y privadas. Se llegó a revisar, en total, 508 muestreos de ensayos de penetración estándar (222 de Guanacaste, 193 de Puntarenas y 93 de Limón). De estudios geotécnicos efectuados por la empresa privada entre el 2003 y el 2005, se obtuvo 4559 datos del número de golpes del ensayo penetración estándar (N_{SPT}), 2346 del

contenido de humedad natural, 598 del peso específico total y 559 de cohesión inconfiada. Para este caso, sí se aplicó la ecuación de corrección de los golpes del ensayo de SPT para contrarrestar posibles alteraciones en estos resultados en vista de que todos los datos provienen de la misma fuente. Se utilizó la ecuación propuesta por Castillo [12], la cual es:

$$N_{SPT, \text{ normalizado}} = \frac{40N_{SPT}}{60} \quad (6)$$

Para obtener el grado de saturación del suelo, se utilizó la ecuación (5), y se utilizó datos del trabajo de Laporte y Sáenz [11] para tener un valor de gravedad específica de 2,69 y para establecer la siguiente ecuación para la relación de vacíos:

$$e_c = 0,0214w + 0,3517 \quad (7)$$

Como no se tenía una cantidad de datos suficientes de cohesión no drenada para suelos de grano fino, se obtuvo una correlación con los golpes de SPT, dando con la siguiente ecuación:

$$C_u = 3,206 \ln N_{SPT} \quad (8)$$

De igual manera, se buscó otra correlación para obtener el ángulo de fricción efectivo de los suelos de grano fino basada en los golpes de SPT, por lo que se utilizó de Bowles [16]:

$$\varphi' = 0,3N_{SPT} + 20 \quad (9)$$

Utilizando esta información se realizó una modelización geoestadística de los parámetros geotécnicos, confeccionada específicamente para cada tipo de suelo por provincia y subdividido para facilitar la investigación. Estas subdivisiones se definieron en función de la densidad de los datos, geología, hidrología y meteorología para que el análisis presentara uniformidad y, además, para obtener datos estadísticos homogéneos. En el aspecto geológico, se utilizó la zonificación geotécnica general establecida en el Código de Cimentaciones de Costa Rica [13], mientras que para el aspecto hidrológico y meteorológico, se emplearon las regiones climáticas definidas por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) [17] y la subzona es definida basándose en los meses de la época seca y lluviosa, precipitación anual y evapotranspiración anual de estas tres provincias.

Al definir las zonas de estudio, se describió estadísticamente los parámetros geotécnicos de cohesión no drenada, ángulo de fricción efectivo, contenido de humedad gravimétrico, peso unitario total y grado de saturación. Para poder definir el modelo estadístico de análisis fue utilizada la campana de Gauss para observar el comportamiento de los datos.

Heredia y Alajuela

Esta sección de la base de datos estuvo a cargo de Acuña [10]. En términos generales, se siguió mismo procedimiento realizado para las provincias de San José y Cartago. Los valores de las distintas propiedades del suelo fueron obtenidos de varios ensayos de penetración estándar SPT realizados en estas dos provincias, donde se obtiene información de N_{SPT} y contenido de humedad gravimétrico del suelo. Para los otros parámetros se utilizaron las ecuaciones (1) a la (5).

De igual manera, se utilizaron las coordenadas de las perforaciones para la ubicación de los puntos por medio de un programa de sistemas de información geográfica (SIG), considerando la zonificación geotécnica general y de la GAM hechas por Bogantes [14] [15]. Cuando no se

contaba con las coordenadas, pero sí con el número del plano catastrado, se estimaron las coordenadas aproximadas del lote donde se realizaron las perforaciones. Si no se tenía ninguna de esta información, se utilizó la herramienta de Google Earth® para ubicar la localización del terreno.

Adicional a la utilización de los mapas de zonificación geotécnica, se clasificaron los materiales encontrados según SUCS para tener una descripción más detallada. En caso de tener zonas con características similares se consideraron como un grupo.

Parámetros estadísticos del suelo en Costa Rica

Para la realización de la base de datos estadísticos del suelo en Costa Rica, se utilizaron tres agrupaciones, por lo que los resultados se presentarán de esa manera. Brizuela [18] estuvo a cargo de la recopilación de la base de datos estadísticos de todas las provincias de Costa Rica mediante el programa de sistema de información geográfica ArcGIS®, donde se generaron mapas con información de las diferentes propiedades geotécnicas requeridas para el diseño geotécnico de una estructura, como la cohesión no drenada, ángulo de fricción efectivo, peso específico total y grado de saturación.

En la figura 1 se puede visualizar el mapa con las zonas con las que se cuentan con datos estadísticos de cohesión no drenada, peso unitario total y grado de saturación en la Gran Área Metropolitana. Se aprecia que la gran mayoría de esta zona se cuenta con esta información, por lo que es posible utilizar esta información para realizar diseños y análisis geotécnicos mediante una metodología probabilística. Es importante mencionar que este mapa contempla la zonificación geotécnica de la GAM establecida por Bogantes [14] [15].

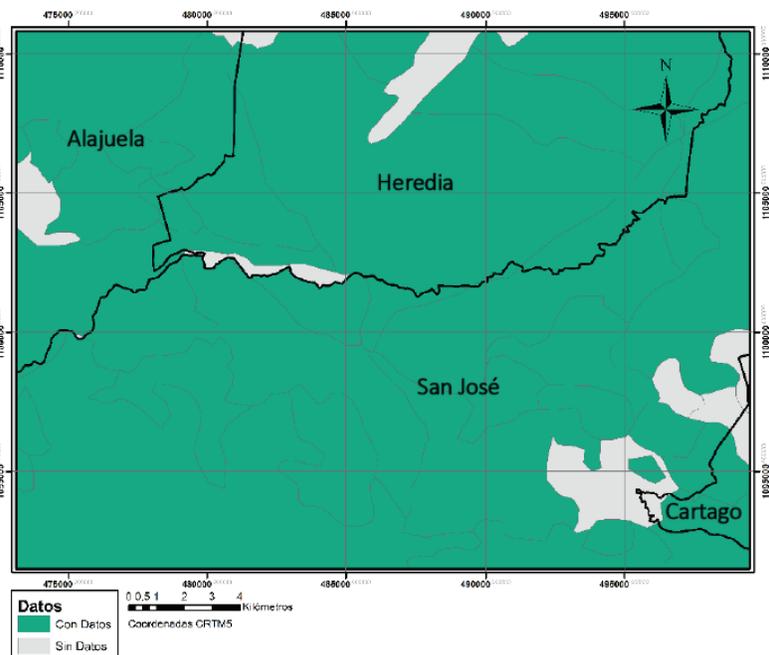


Figura 1. Zonas con datos de cohesión no drenada, peso unitario total y grado de saturación en la GAM. Fuente: [15]

La figura 2 muestra el mapa que incluye las áreas de Alajuela, Heredia, Cartago y San José que presenta información estadística de cohesión no drenada, peso unitario total y grado de saturación del suelo.

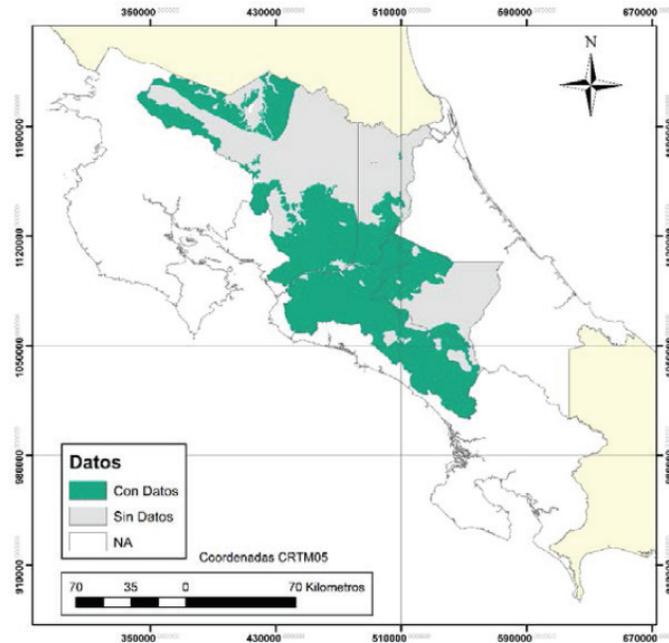


Figura 2. Zonas con datos de cohesión no drenada, peso unitario total y grado de saturación para las provincias de Alajuela, Cartago, Heredia y San José. Fuente: [18]

Para las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón, se presentan diferentes mapas para las propiedades geotécnicas porque no en todos los sitios se tiene toda la información requerida para un análisis estadístico. En la figura 3 se observan las zonas donde se encuentran datos de cohesión no drenada y peso unitario total, para todas las provincias. Debido a los tipos de suelos presentes en otras zonas el país hasta profundidades de 3 metros, se presentan los datos de ángulo de fricción efectivo en la provincia de Limón (figura 4) y grado de saturación del suelo en Guanacaste (figura 5).

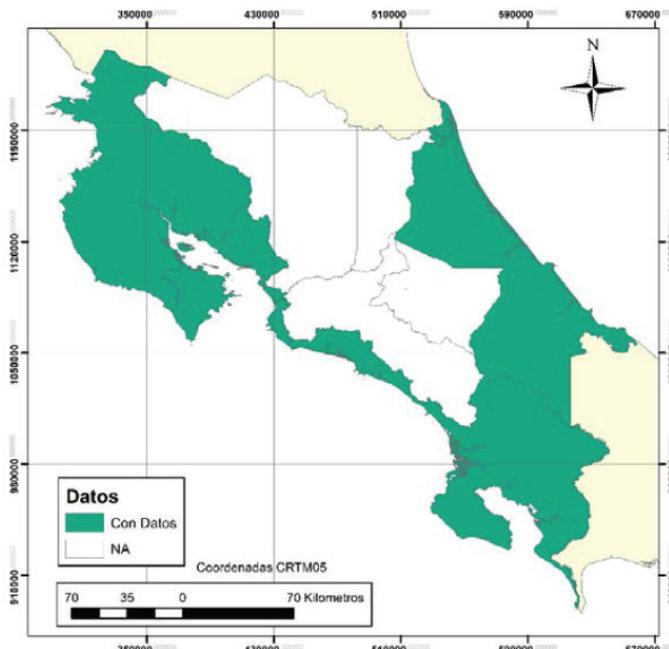


Figura 3. Zonas con datos de cohesión no drenada y peso unitario total para las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón. Fuente: [18]

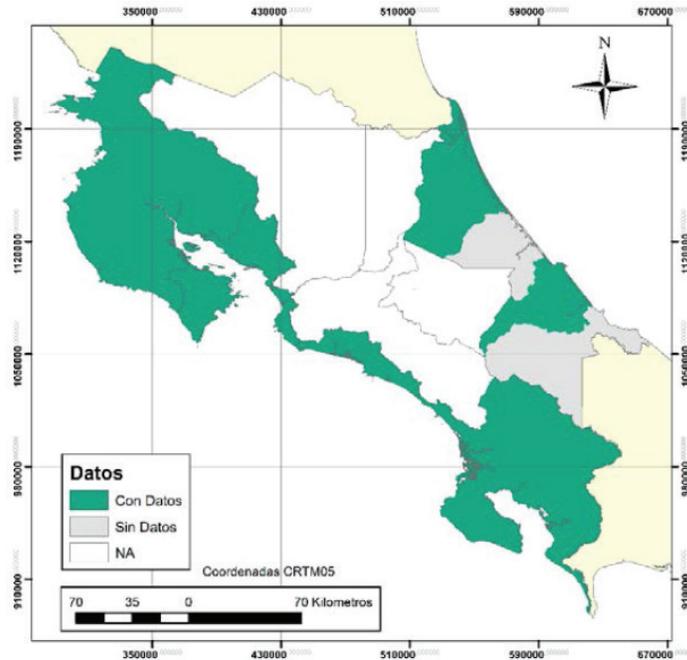


Figura 4. Zonas con datos de ángulo de fricción efectivo para las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón. Fuente: [18]

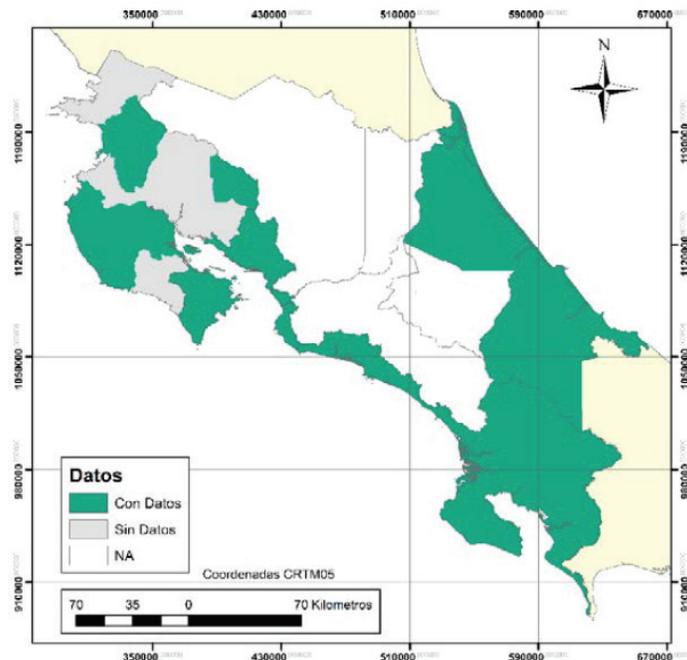


Figura 5. Zonas con datos de grado de saturación del suelo para las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón. Fuente: [18]

Con esta información es posible crear la base de datos del país para determinar las zonas con las que se cuenta con información de cohesión no drenada y peso unitario total (figura 6), ángulo de fricción efectivo (figura 7) y grado de saturación del suelo (figura 8).

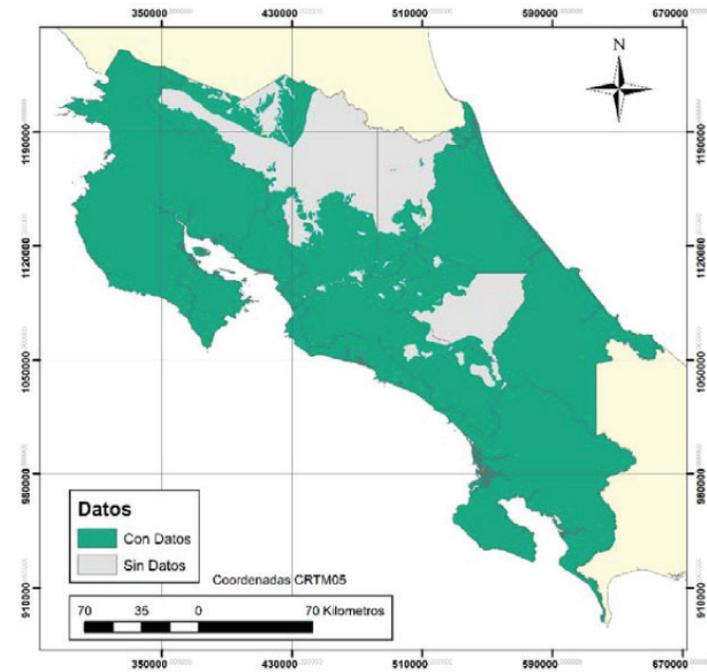


Figura 6. Zonas con datos de cohesión no drenada y peso unitario total para Costa Rica. Fuente: [18]

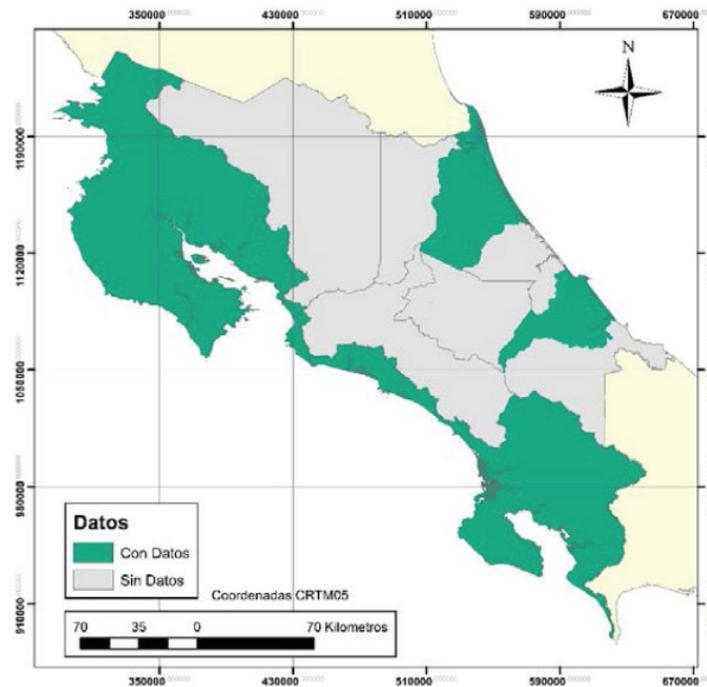


Figura 7. Zonas con datos de ángulo de fricción efectivo para Costa Rica. Fuente: [18]

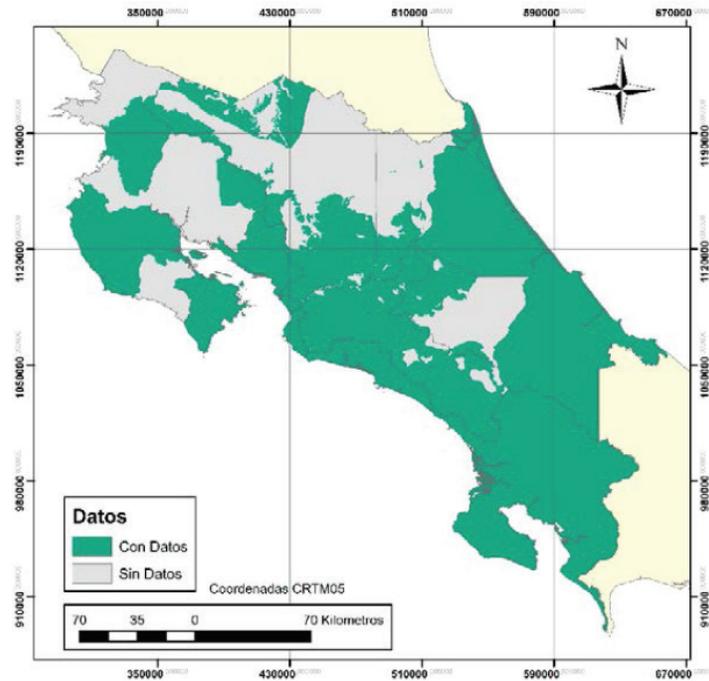


Figura 8. Zonas con datos de grado de saturación del suelo para Costa Rica. Fuente: [18]

La figura 9 establece las zonas en las que se pueden utilizar los estadísticos presentados en esta investigación para realizar un análisis o diseño probabilístico de una estructura geotécnica.

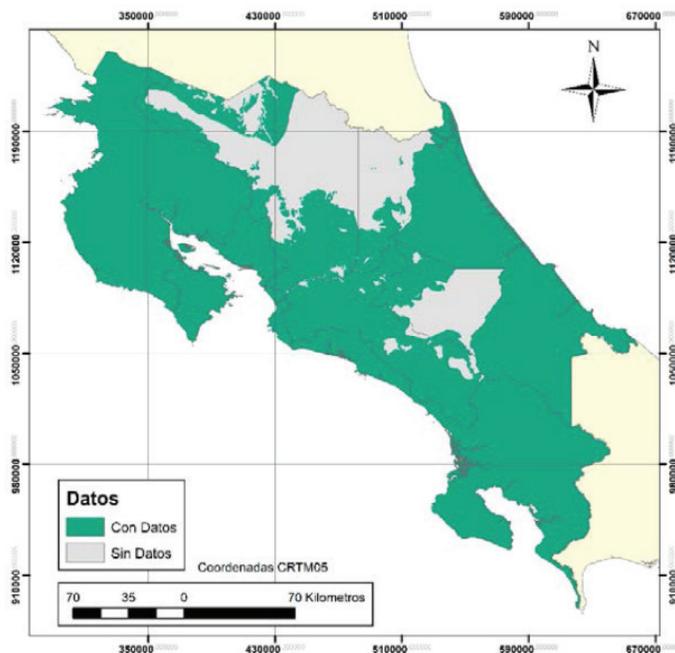


Figura 9. Zonas con datos estadísticos en Costa Rica [18]

A continuación, se presenta de manera más específica los resultados estadísticos obtenidos para cada una de las agrupaciones de las provincias.

San José y Cartago

En la figura 10 se presentan los puntos georreferenciados en las provincias de San José y Cartago, donde se aprecia que la gran mayoría de las perforaciones se encuentran en la Gran Área Metropolitana (GAM), mientras que hay algunos puntos en los cantones más lejanos. Los puntos corresponden a centros de población que es donde se realizan una mayor cantidad de estudios geotécnicos. Por consiguiente, existen grandes áreas boscosas y montañosas sin datos sobre sus propiedades geotécnicas.

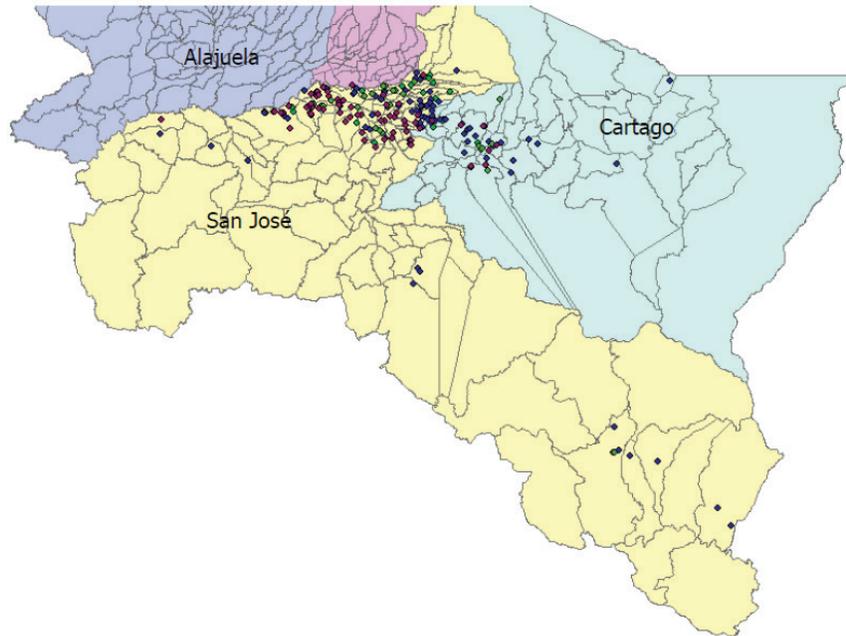


Figura 10. Ubicación de las muestras de suelo en las provincias de San José y Cartago. Fuente: [8]

En la Figura 11 se muestra un acercamiento de los puntos georreferenciados en la GAM para estas dos provincias, donde se puede observar que no hay una tendencia de ubicación según el tipo de suelos por medio de la clasificación por SUCS. Debido a la gran cantidad de puntos en este sector y para poder disminuir la incertidumbre en los datos, se realizó un análisis solo con los suelos dentro de los límites de la GAM.

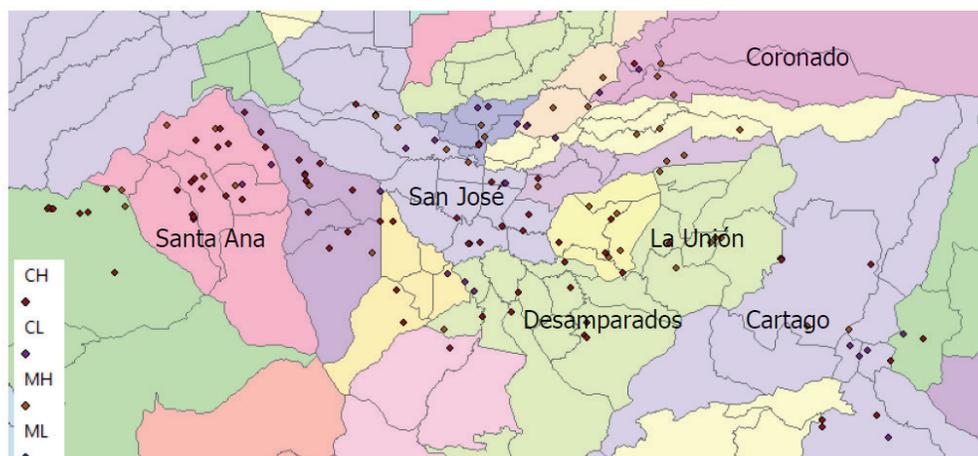


Figura 11. Puntos georreferenciados en la Gran Área Metropolitana para las provincias de San José y Cartago. Fuente: [8]

Al unir esta información con los puntos georreferenciados utilizados para las provincias de Heredia y Alajuela. Como la GAM, según la zonificación geotécnica del Código de Cimentaciones de Costa Rica [13], se alcanzó una mejor aproximación de valores estadísticos. La ubicación de los puntos georreferenciados se presenta en la figura 12. Se puede observar que el suelo tipo CH (arcilla de alta plasticidad) se llega a ubicar en el sector sur de la GAM, mientras que los suelos ML y MH (limo de baja y alta plasticidad, respectivamente) se presentan esparcidos en toda esta área. Algunas de las descripciones de las zonas geotécnicas determinadas en el mapa de la GAM presentan características similares, por lo que se llegaron a unir para un análisis más completo por ser materiales muy similares. Esto no llegó a realizarse para las zonas establecidas en el mapa general. La descripción de los diferentes materiales encontrados en este sector del país se encuentra en el cuadro 1. Se observa que, en términos generales, la gran mayoría consiste de suelo de grano fino, residuales y con potencial de expansión.

Teniendo esta zonificación en cuenta se prosiguió a obtener la densidad de los datos por área de la zona contemplada (cuadro 2). Algunos de los tipos de suelo según SUCS se unieron para tener una mayor densidad de datos en una zona de gran área y lograr de esta manera una cantidad significativa de datos. Se debe tomar en cuenta que no se combinaron arcillas y limos, y se evitó unir las arcillas de alta plasticidad y de baja plasticidad debido a que presentan grandes diferencias en su comportamiento.

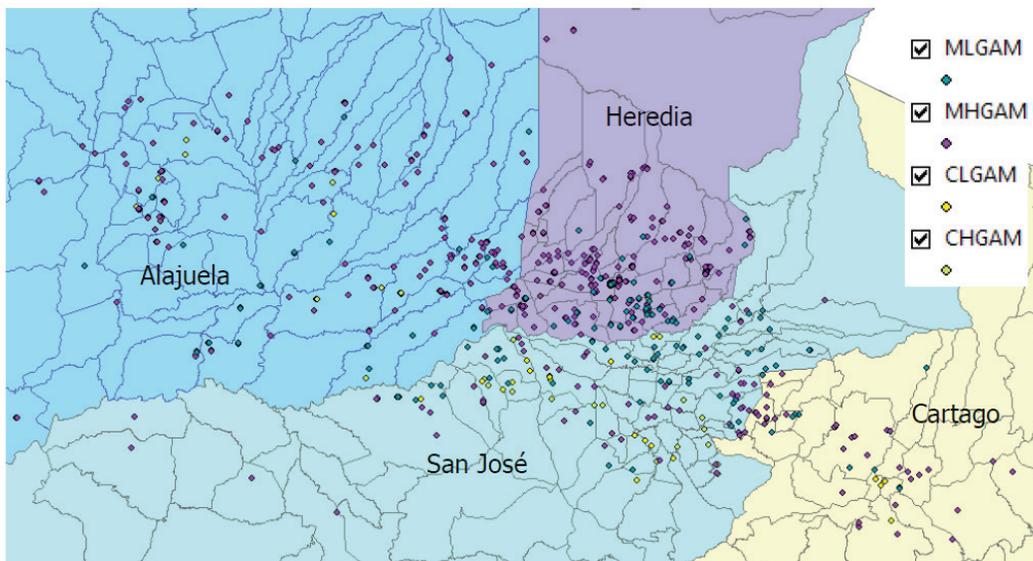


Figura 12. Puntos georreferenciados en la Gran Área Metropolitana. Fuente: [8].

Cuadro 1. Descripciones del suelo o en la zonificación de la GAM y del mapa San José del CCCR.

Tipo de mapa	Zonas	Descripción
Zonificación geotécnica de la GAM	2, 8, 20	Suelos blandos, geología de piroclastos
	3, 11, 22, 23	Suelos blandos
	4, 28, 29, 31	Arcilla gris y café, CH, alto potencial de expansión
	5	Arcilla gris, CH, alto potencial de expansión
	6, 30, 32, 33	Arcilla gris, CH alto potencial de expansión
	9, 21, 26	Condiciones favorables de cimentación
	12, 19	Limos colapsables y arcilla gris subsuperficial, alto potencial de expansión
	14, 15, 16	Suelos blandos y arcilla gris, MH y CH, alto potencial de expansión
	18	Arcilla gris, CH
	25	Colada de lava Los Ángeles
	27	Arcilla negra subsuperficial, subyacida por arcilla gris, muy alto potencial de expansión
Zonificación geotécnica general de Costa Rica	Am	Suelos residuales de color amarillento
	Lat	Suelos residuales rojizos
	V2	Suelos volcánicos con gran contenido de minerales amórficos
	V2w	Suelo volcánicos con gran contenido de minerales amórficos en zonas húmedas
	V3	Suelos residuales de origen volcánico
	V3w	Suelos residuales de origen volcánico en zonas húmedas

Fuente: [8].

Mediante el uso del programa de sistemas de información geográfica ArcGIS® para poder zonificar las variables calculadas y apreciar la ubicación de los puntos de perforación con las zonas geotécnicas establecidas en el Código de Cimentaciones de Costa Rica. La información de la densidad de datos para estas zonas geotécnicas se presenta en las Figura 13 y Figura 14. La primera, que representa el área de la zona V3 en la GAM, presenta una alta densidad, mientras que la otra (área de la zona 14, 15, 16) muestra una baja densidad de datos. Las zonas con bajas densidades de datos representan un análisis menos significativo por la baja cantidad de datos para obtener los parámetros geotécnicos.

Cuadro 2. Densidad de puntos por zona geotécnica.

Zonas	Tipo de suelo	Cantidad de datos	Área (km ²)	Densidad (datos/m ²)
2, 8, 20	CL+CH	23	45	0,516
	ML	42		0,942
	MH	31		0,695
3, 11, 22, 23	ML	23	38	0,605
	MH	75		1,974
4, 28, 29, 31	CH	27	35	0,771
	ML+MH	22		0,629
5	ML+MH	28	6	4,667
6, 30, 32, 33	CL	19	62	0,306
	CH	45		0,726
	ML+MH	37		0,597
9, 21, 26	CL	18	120	0,150
	CH	24		0,200
	ML	53		0,442
	MH	328		2,733
12, 19	ML+MH	42	10	4,386
14, 15, 16	ML+MH	126	46	2,724
25	MH	43	6	7,167
27	CL+CH	25	33	0,758
	ML+MH	40		1,212
Am	CL	21	3379	0,006
	CH	76		0,022
	ML+MH	108		0,032
Lat	CL+CH	61	12851	0,005
	ML	24		0,002
	MH	85		0,007
V2	ML+MH	63	162	0,389
V2w	ML+MH	77	1488	0,052
V3	CL	65	2166	0,030
	CH	83		0,038
	ML	127		0,059
	MH	733		0,338
V3w	ML+MH	34	3186	0,011

Fuente: [8].

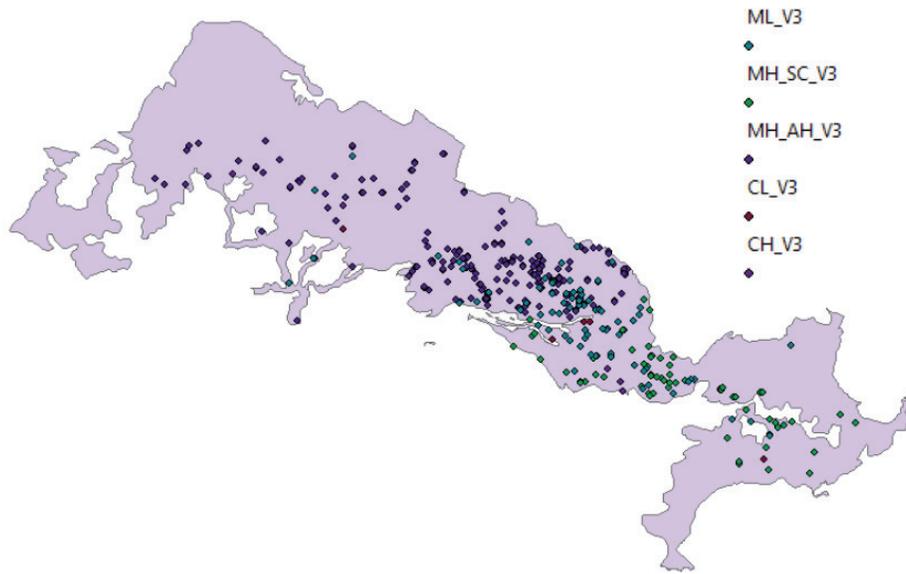


Figura 13. Puntos georreferenciados en la zona V3 en la GAM. Fuente: [8]

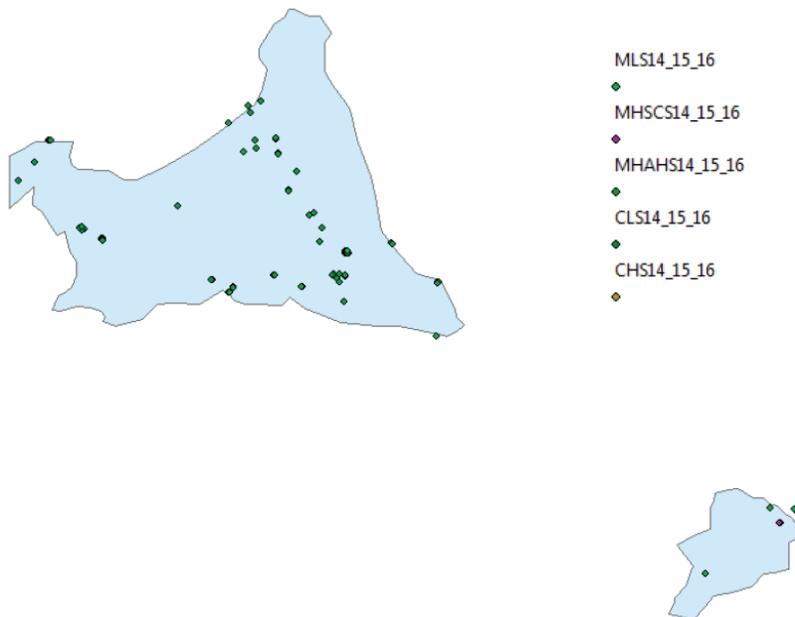


Figura 14. Puntos georreferenciados en la zona 14, 15, 16 en la GAM. Fuente: [8]

Una vez procesada la información se obtuvieron los valores promedio y la desviación estándar para las siguientes propiedades geotécnicas: contenido de humedad gravimétrico, límite líquido, índice de plasticidad, razón de vacíos, porosidad, saturación, peso unitario total, y cohesión no drenada del suelo. Los resultados de estos valores se presentan en la Tabla para la cohesión no drenada, el peso unitario total y el grado de saturación, y en la Tabla se muestran los valores para el contenido de humedad gravimétrico, límite líquido, índice de plasticidad, razón de vacíos y porosidad.

Cuadro 3. Valores de promedio y desviación estándar de la cohesión no drenada, peso unitario total y grado de saturación para las provincias de San José y Cartago.

Zona	Tipo de suelo	Cohesión (ton/m ²)		Peso unitario total (ton/m ³)		Saturación (%)	
		\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x
2, 8, 20	CL+CH	8,87	6,92	1,79	0,04	90,89	4,82
	ML	10,32	6,71	1,78	0,04	91,95	4,49
	MH	8,73	5,95	1,70	0,13	96,61	3,59
3, 11, 22, 23	ML	6,45	5,31	1,75	0,05	94,91	6,31
	MH	7,47	5,24	1,72	0,06	97,39	3,50
4, 28, 29, 31	CH	11,46	6,54	1,80	0,05	89,39	6,78
	ML+MH	11,34	6,50	1,78	0,06	90,99	6,74
5	ML+MH	9,50	6,10	1,79	0,07	90,46	7,22
6, 30, 32, 33	CL	10,82	7,26	1,85	0,06	82,26	8,82
	CH	8,49	6,55	1,78	0,06	92,11	8,36
	ML+MH	10,43	7,29	1,77	0,06	93,35	5,66
9, 21, 26	CL	11,4	7,41	1,83	0,04	88,23	6,47
	CH	10,60	7,03	1,77	0,05	95,51	4,37
	ML	8,25	4,62	1,77	0,04	93,36	4,18
	MH	9,22	5,96	1,73	0,07	96,87	3,91
12, 19	ML	5,96	6,05	1,75	0,05	95,68	5,08
	MH	8,84	6,70	1,75	0,05	95,17	4,86
14, 15, 16	ML+MH	7,73	5,87	1,73	0,07	96,29	4,62
25	MH	6,62	4,45	1,67	0,10	98,14	4,13
27	CL+CH	11,86	6,13	1,82	0,07	86,90	9,34
	ML+MH	8,47	5,27	1,77	0,06	92,50	6,40
Am	CL	7,89	4,88	1,79	0,08	89,92	10,48
	CH	10,14	6,46	1,78	0,07	91,17	7,60
	ML+MH	8,66	5,89	1,76	0,06	93,57	6,55
Lat	CL+CH	10,40	6,33	1,81	0,08	88,13	11,66
	ML	10,77	6,15	1,82	0,05	86,44	8,28
	MH	10,45	6,90	1,77	0,05	93,91	5,19
V2	ML+MH	4,80	3,58	1,65	0,11	98,83	3,45
V2w	MH	5,66	4,49	1,53	0,17	99,49	1,24
V3	CL	10,42	6,76	1,82	0,05	88,00	6,30
	CH	9,57	6,02	1,77	0,05	94,01	5,27
	ML	8,35	5,93	1,77	0,05	92,59	5,85
	MH	8,48	5,77	1,71	0,08	97,10	3,88
V3w	ML+MH	7,32	5,50	1,63	0,14	98,90	1,70

Fuente [8].

Cuadro 4. Valores de promedio y desviación estándar del contenido de humedad, límite líquido, índice de plasticidad, relación de vacíos y porosidad para las provincias de San José y Cartago.

Zona	Tipo de suelo	Contenido de humedad		Límite líquido		Índice de plasticidad		Razón de vacíos		Porosidad	
		\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x
2, 8, 20	CL	33,5	4,5	42,5	3,5	18,0	3,0	1,0	0,1	50,0	3,0
	CH	42,0	10,0	60,5	16,5	31,0	15,0	1,2	0,2	53,5	4,5
	ML	36,5	6,5	45,0	4,0	14,0	4,0	1,1	0,2	51,5	3,5
	MH	54,5	27,5	73,5	34,5	24,5	14,5	1,5	0,6	57,5	7,5
3, 11, 22, 23	CL	35,5	3,5	41,5	3,5	17,0	3,0	1,1	0,1	51,0	2,0
	CH	47,0	5,0	60,5	5,5	31,5	3,5	1,3	0,1	56,0	2,0
	ML	42,5	9,5	44,0	4,0	14,5	3,5	1,2	0,2	54,0	5,0
	MH	50,0	11,0	23,0	7,0	1,5	0,5	57,0	4,4	10,0	9,0
4, 28, 29, 31	CL	19,5	6,5	42,0	5,0	20,5	4,5	0,7	0,1	40,5	4,5
	CH	34,0	10,0	66,0	14,0	38,5	12,5	1,0	0,2	50,0	5,0
	ML	27,0	6,0	43,0	5,0	13,5	3,5	0,9	0,2	46,0	4,0
	MH	41,5	13,5	60,5	9,5	24,0	7,0	1,2	0,3	53,5	4,5
5	CH	34,5	12,5	67,5	13,5	38,5	11,5	1,0	0,3	49,5	6,5
	ML	34,0	12,0	42,0	6,0	11,5	3,5	1,1	0,3	49,5	5,5
	MH	40,0	16,0	60,5	9,5	25,0	6,0	1,2	0,4	52,5	5,5
6, 30, 32, 33	CL	26,5	8,5	41,5	5,5	18,5	4,5	0,9	0,2	45,5	5,5
	CH	39,0	11,0	72,0	17,0	44,0	15,0	1,2	0,3	52,0	6,0
	ML	35,0	16,0	43,0	5,0	16,0	4,0	1,1	0,4	49,5	6,5
	MH	41,5	10,5	64,5	12,5	28,0	10,0	1,2	0,2	53,5	4,5
9, 21, 26	CL	31,0	6,0	46,0	3,0	20,0	2,0	1,0	0,2	48,5	3,5
	CH	41,5	7,5	72,0	18,0	41,5	15,5	1,2	0,2	53,5	3,5
	ML	39,0	6,0	46,0	3,0	15,0	4,0	1,1	0,1	52,5	3,5
	MH	48,0	13,0	65,0	14,0	23,5	7,5	1,3	0,3	56,5	4,5
12, 19	CH	40,5	5,5	64,5	9,5	35,0	8,0	1,2	0,2	53,5	2,5
	ML	43,5	10,5	40,0	6,0	11,0	4,0	1,2	0,2	54,5	4,5
	MH	44,0	10,0	63,0	8,0	23,5	6,5	1,2	0,2	54,5	4,5
14, 15, 16	CH	38,5	9,5	64,0	7,0	35,0	6,0	1,1	0,2	52,0	5,0
	ML	37,0	9,0	44,0	5,0	15,0	4,0	1,1	0,2	51,0	5,0
	MH	48,5	11,5	66,0	10,0	25,5	7,5	1,4	0,3	56,5	4,5
18	CH	35,0	6,0	66,0	13,0	37,5	12,5	1,0	0,1	50,5	2,5
25	MH	59,5	18,5	77,0	17,0	20,5	8,5	1,6	0,4	60,0	6,0
27	CL	26,0	6,0	42,5	4,5	19,5	3,5	0,9	0,2	45,0	4,0
	CH	36,0	12,0	68,0	18,0	39,0	15,0	1,1	0,3	50,5	6,5
	ML	34,0	12,0	46,0	5,0	14,5	4,5	1,0	0,3	49,5	5,5
	MH	44,0	11,0	65,0	10,0	25,0	6,0	1,3	0,3	54,5	4,5
Am	CL	25,5	9,5	42,5	5,5	20,5	4,5	0,8	0,2	44,5	5,5
	CH	37,5	11,5	71,0	17,0	43,0	15,0	1,1	0,3	51,5	5,5
	ML	33,5	10,5	43,5	5,5	13,0	5,0	1,0	0,2	49,5	5,5
	MH	44,5	10,5	67,5	13,5	28,0	10,0	1,3	0,3	54,5	4,5

Zona	Tipo de suelo	Contenido de humedad		Límite líquido		Índice de plasticidad		Razón de vacíos		Porosidad	
		\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x
Lat	CL	23,0	9,0	41,5	5,5	18,5	4,5	0,8	0,2	43,0	6,0
	CH	38,5	12,5	72,0	16,0	43,0	14,0	1,1	0,3	52,0	6,0
	ML	31,0	9,0	43,0	5,0	12,5	3,5	0,9	0,2	48,0	5,0
	MH	40,5	10,5	67,0	11,0	26,5	8,5	1,2	0,3	53,5	4,5
V2	ML	47,5	9,5	40,5	4,5	10,0	4,0	1,3	0,2	56,0	4,0
	MH	83,5	20,5	79,5	20,5	19,5	7,5	2,1	0,5	67,0	5,0
V2w	MH	103,5	48,5	126,5	46,5	41,0	20,0	2,5	1,0	69,0	9,0
V3	CL	31,5	7,5	43,0	5,0	19,0	4,0	1,0	0,2	48,5	4,5
	CH	40,0	9,0	67,5	14,5	39,0	12,0	1,1	0,2	53,0	4,0
	ML	38,0	8,0	44,5	4,5	14,0	4,0	1,1	0,2	52,0	4,0
	MH	50,5	15,5	66,5	13,5	23,0	7,0	1,4	0,4	57,0	5,0
V3w	MH	70,0	29,0	89,0	28,0	27,5	11,5	1,8	0,6	62,5	7,5

Fuente [8].

Guanacaste, Puntarenas y Limón

Para estas provincias se realizó una zonificación preliminar de las tres provincias, considerando los cambios en las propiedades físicas del suelo por su ubicación, condiciones climáticas y geología. Para las condiciones climáticas, se utilizaron los mapas de precipitación promedio anual y evapotranspiración promedio anual establecidos por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) [17], como se presenta en la Figura 15 (Pacífico Norte), Figura 16 (Pacífico Central), Figura. 17 (Pacífico Sur) y Figura 18 (Vertiente del Caribe).

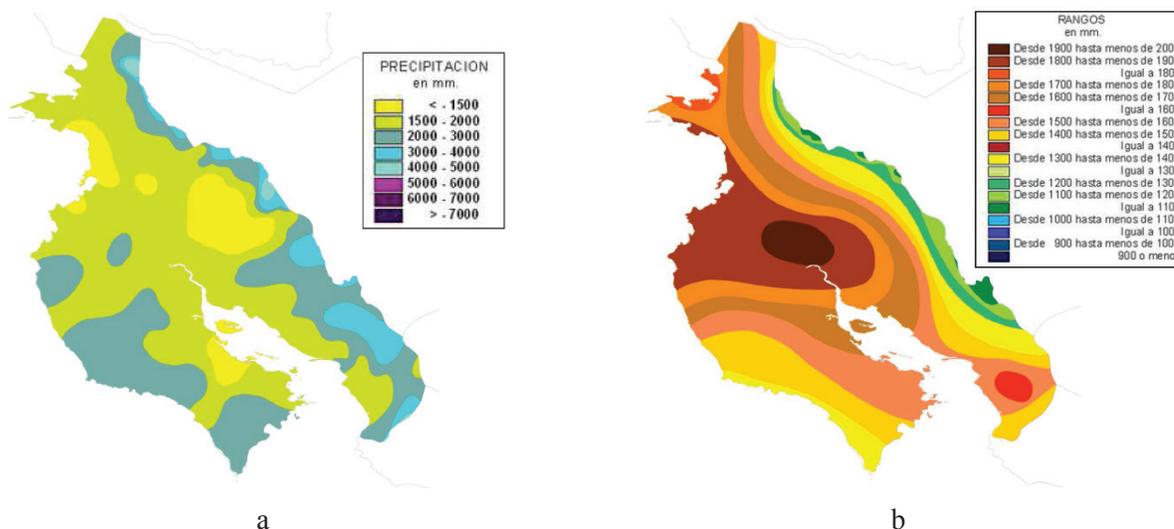


Figura 15. Mapas de precipitación (a) y evapotranspiración (b) anuales de la región Pacífico Norte. Fuente: [18]

Con respecto a la geología de la zona, se usó el mapa de zonificación geotécnica que se presenta en el Código de Cimentaciones de Costa Rica [13]. Es importante mencionar que, dependiendo de los resultados obtenidos estadísticamente, puede ser valorada la posibilidad de que estas zonas pudieran no coincidir luego de la revisión de datos. Se establecieron las siguientes zonas preliminarmente, mostradas en el cuadro 5.

Cuadro 5. Descripción de la zonificación según aspectos geológicos e hidrológicos de las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón.

Provincia	Zona	Descripción
Guanacaste	Liberia - Papagayo	Presenta formación rocosa de poca profundidad, baja precipitación y alta evapotranspiración (1500 mm – 2000 mm). Abarca las zonas de Liberia, la Guardia y Papagayo.
	Santa Cruz	Predominan los suelos residuales y puede haber suelos expansivos, tiene valores extremos de evapotranspiración y baja precipitación. Abarca las zonas de Filadelfia, Tamarindo, Playa Flamingo y Santa Cruz.
	Nicoya – Tilarán	Presenta los valores de precipitación anual más altos de la zona (2000 mm – 3000 mm) y el de menor evapotranspiración. Abarca las zonas de Tilarán y Nicoya.
Puntarenas	Pacífico Norte	Normalmente tiene precipitaciones entre 2000 mm y 3000 mm, su evapotranspiración es la más elevada (1400 mm – 1700 mm), y predomina suelos residuales.
	Pacífico Central	Su precipitación anual se encuentra entre 3000 mm y 5000 mm, su evapotranspiración desde 900 mm hasta 1400 mm, y presenta suelos aluviales.
	Pacífico Sur	Presenta la misma precipitación que la zona Pacífico Central, pero cuenta con menos evapotranspiración anual que esta misma zona, y predominan los suelos residuales.
Limón	Moín – Limón Centro	Presenta precipitación anual mayor a 2500 mm en las zonas más secas, su evapotranspiración no supera los 1200 mm anuales, y cuenta con suelos residuales.
	Guácimo – Matina	Tiene las mismas condiciones de precipitación y evapotranspiración que la zona Moín – Limón Centro, pero presenta suelos aluviales.

Fuente: [9]

Una vez definida la zonificación, se procesaron las propiedades geotécnicas para obtener los parámetros estadísticos. Primero, se trabajó el grado de saturación, en el cuadro 6 se presentan los resultados obtenidos. La provincia de Limón presenta los mayores valores de grado de saturación del suelo, lo cual es consistente con los patrones de mayor precipitación anual y menor evapotranspiración de las tres áreas geográficas analizadas. Por otro lado, el valor promedio del grado de saturación que se presenta en la zona Liberia – Papagayo donde hay muy poca precipitación anual y alta evapotranspiración, presenta los valores más bajos.

Cuadro 6. Valores de promedio y desviación estándar del grado de saturación.

Provincia	Zona	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
Guanacaste	Liberia – Papagayo	69,07	13,15
	Santa Cruz	78,08	13,82
	Nicoya – Tilarán	90,52	8,28
Puntarenas	Pacífico Norte	83,49	13,47
	Pacífico Central	86,34	10,06
	Pacífico Sur	86,92	11,08
Limón	General	95,99	7,52
	Moín – Limón Centro	93,91	7,43
	Guácimo – Matina	98,94	6,63

Fuente: [9].

Para los parámetros estadísticos de la cohesión no drenada y del peso unitario total de estas zonas, se dividió en los tipos de suelos encontrados en la zona por medio de pruebas de hipótesis de comparación de promedios, por lo que hay zonas en las que se pudieron clasificar el suelo específicamente y en otras se obtuvo un resultado más general. Los valores analizados se presentan en el cuadro 7.

Cuadro 7. Valores de promedio y desviación estándar de la cohesión no drenada y peso unitario total para las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón.

Provincia	Tipo de suelo	Zona	Cohesión (ton/m ²)		Peso unitario total (ton/m ³)	
			\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x
Guanacaste	Limo	Liberia – Papagayo	6,31	3,94	1,73	0,05
		Nicoya – Tilarán			1,68	0,03
	Limo arenoso	Liberia – Papagayo	8,14	3,19	1,73	0,04
		Santa Cruz			1,78	0,03
		Nicoya – Tilarán			1,75	0,05
	Limo arenoso arcilloso	7,08	5,44	1,84	0,21	
	Limo arcilloso	4,41	3,27	1,75	0,05	
	Limo arcilloso arenoso	6,61	3,86	1,78	0,02	
	Arcilla	7,74	4,48	1,78	0,02	
	Arcilla arenosa			1,78	0,04	
Arcilla limosa	1,69			0,03		
Puntarenas	Limo	6,38	3,94	1,77	0,03	
	Arcilla	6,38	4,98	1,76	0,05	
Limón	Limo	Moín – Limón Centro	3,93	2,48	1,63	0,07
		Guácimo – Matina			1,76	0,04
	Arcilla	6,30	3,81	1,77	0,04	
	Restos de arcilla			1,74	0,11	

Fuente: [9].

Por último, como los resultados de ángulo de fricción efectivo en la zona de Guanacaste y Puntarenas llegan a ser muy similares, se unificaron estas dos provincias, y se subdividieron en Pacífico Norte, Central y Sur. Los resultados se muestran en el cuadro 8 , y se puede decir que, aunque los valores promedios son muy similares entre sí, las desviaciones estándar llegan a variar considerablemente.

Cuadro 8. Valores promedio y desviación estándar del ángulo de fricción efectivo para las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón.

Provincia	Zona	Promedio (°)	Desviación estándar (°)
Guanacaste y Puntarenas	Pacífico Norte	25,40	4,02
	Pacífico Central	27,49	5,15
	Pacífico Sur	25,64	6,68
Limón	Moín – Limón Centro	26,24	3,31
	Guácimo - Matina	24,62	4,61

Fuente: [9]

Heredia y Alajuela

De igual manera que para las provincias de San José y Cartago, se aplicó el método geoespacial para crear una base de datos, utilizando la zonificación geotécnica de la GAM y General que se encuentra en el Código de Cimentaciones de Costa Rica y que fue establecida por Bogantes [14] [15]. La Figura 19 muestra un mapa con los puntos georreferenciados en las provincias de Heredia, Alajuela, San José y Cartago. Se aprecia que se da una concentración considerable de las perforaciones en la Gran Área Metropolitana (GAM), mientras que hay puntos segregados en los cantones norteños.

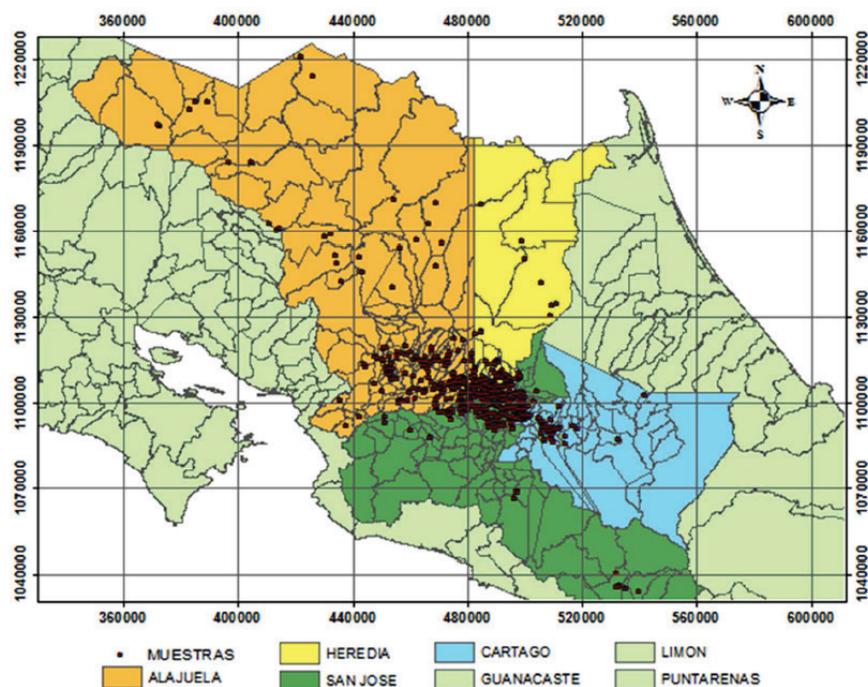


Figura 19. Ubicación de las muestras de suelo en las provincias de Heredia, Alajuela, San José y Cartago. Fuente: [18]

Igual al caso de San José y Cartago, se redujo la zona de interés considerando solo los datos de la GAM ya que los demás son pocos y se encuentran esparcidos. Además, se descartaron los puntos que no contaban con información de su ubicación, por lo que al final se utilizaron 1567 datos en el análisis. La georreferenciación de los puntos se observa en la figura 20.

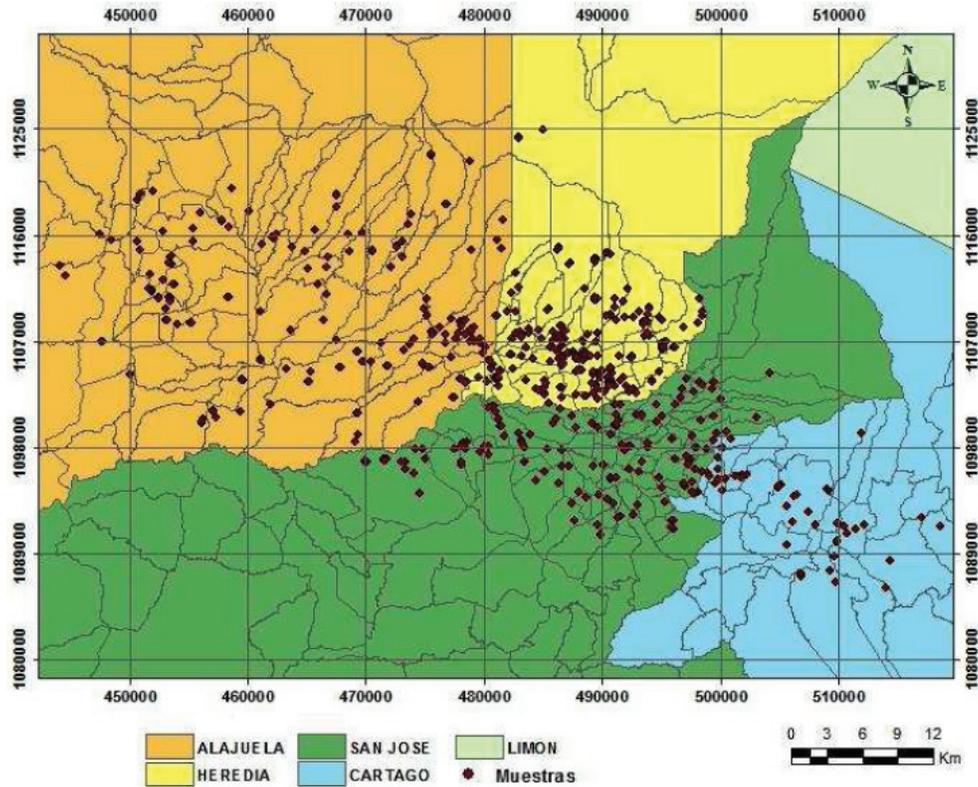


Figura 20. Distribución de las muestras en la Gran Área Metropolitana. Fuente: [18]

Adicionalmente, se agruparon zonas con características geotécnicas similares que contaban con pocos puntos para poder realizar un análisis estadístico. Esta agrupación de zonas se basó en el origen geológico, consistencia del suelo y problemas asociados al mismo por el comportamiento mecánico. Las descripciones de las zonas consideradas se muestran en el cuadro 9. En la Figura 21 se visualiza un mapa de las zonas determinadas para la base de datos en la GAM, tomando en cuenta los datos obtenidos para las provincias de Heredia y Alajuela. En general, predomina el grupo B, G y la zona 5.

Cuadro 9. Descripciones del suelo en la zonificación de la GAM y de la hoja San José y San Carlos del CCCR.

Tipo de mapa	Grupo	Zonas	Descripción
Zonificación geotécnica de la GAM	A	4, 28, 29,31	Suelos transportados derivados de abanicos aluviales, de 10 m a 15 m de espesor, de consistencia intermedia. Se clasifica tipo MH, pero se pueden encontrar estratos CH. Para estructuras pesadas puede haber asentamientos por la alta plasticidad en el suelo.
	B	9,21, 26	Suelos generados por la meteorización de lavas o ignimbrita, con espesores mayores a 10 m, de consistencia intermedia. Se encuentra principalmente suelos tipo MH, y se debe verificar los asentamientos para estructuras pesadas.
	C	14, 15, 16	Suelos blandos tipo MH y CH generados por la alteración de lavas, de consistencia blanda en capas superiores. Puede haber asentamientos por la alta plasticidad en el suelo. Puede haber problemas de filtraciones por la presencia de nivel freático superficial
	D	1, 7, 11, 13, 17, 20	Suelos transportados derivados de depósitos piroclásticos, son profundos, principalmente MH, ML o CL, de consistencia blanda, propensos al colapso, con baja capacidad soportante y problemas de filtración por un nivel freático superficial.
	E	2, 3, 8	Suelos blandos transportados de origen piroclásticos, principalmente tipo MH, con espesores entre 10 m y 15 m, con problemas de cimentación por baja capacidad soportante y asentamientos.
	F	12, 19	Suelos transportados de origen piroclástico, se encuentran limos y arcillas subsuperficiales, con alto potencial de expansión, con problemas de suelos colapsables (limos), pero con buena capacidad soportante que mejora al reducir el espesor del suelo.
	G	6, 30, 32, 33	Arcillas, con alto potencial de expansión, de espesor variable, de consistencia intermedia, adecuados para efectos de cimentación.
	5		Suelos de origen residual por meteorización de rocas ígneas y sedimentarias, tipo MH o ML, con espesores menores a 5 m, con condiciones de cimentación favorable por ser suelos de consistencia dura.
	22		Suelos transportados de origen piroclástico, con espesor variable, tipo MH y CH, con problemas de baja capacidad soportante y asentamientos.
	25		Suelos residuales generados por la meteorización de la colada de lava Los Ángeles, roca muy cerca de la superficie, principalmente tipo MH, con buena capacidad soportante.
	27		Suelos residuales derivados de ignimbrita, poco espesor, de consistencia sura, con problemas graves de expansión por arcillas superficiales, poco permeables.
Zonificación geotécnica general de Costa Rica	Am		Suelos residuales de color amarillento
	Lat		Suelos residuales rojizos
	V2		Suelos volcánicos con gran contenido de minerales amórficos
	V2w		Suelo volcánicos con gran contenido de minerales amórficos en zonas húmedas
	V3		Suelos residuales de origen volcánico
	V3w		Suelos residuales de origen volcánico en zonas húmedas

Fuente: [13].

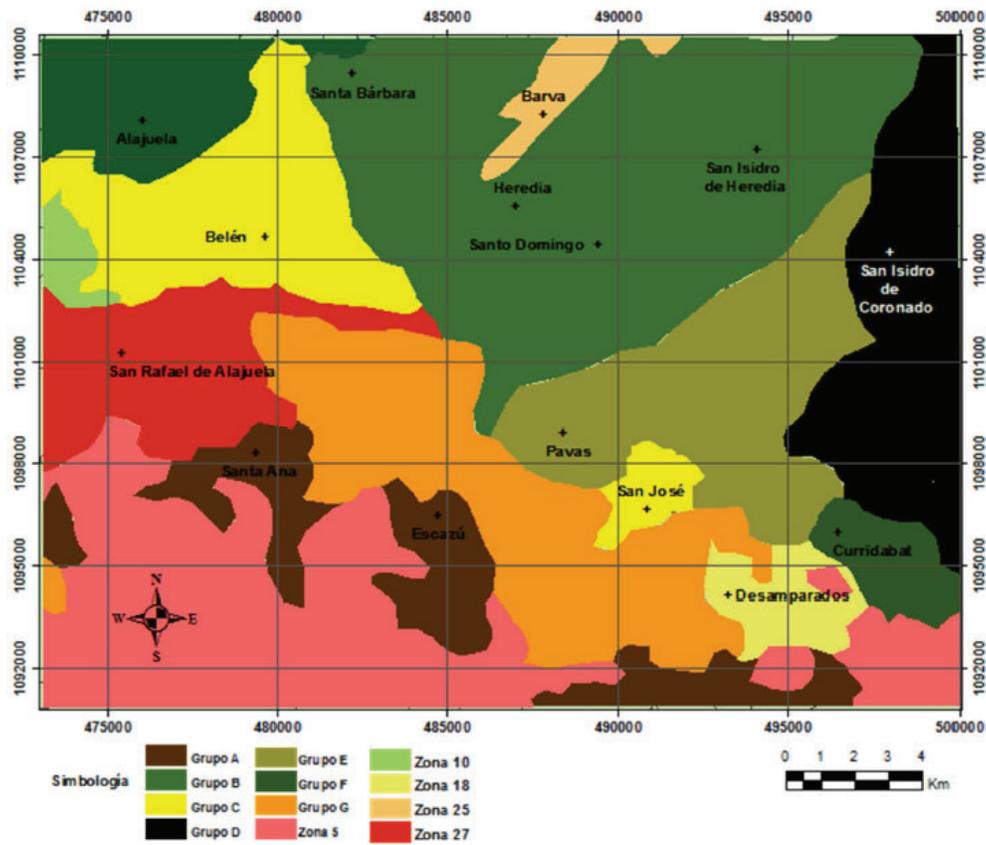


Figura 21. Mapa de las zonas de estudio determinadas para las GAM. Fuente: [18]

Una vez analizados los datos, se obtuvieron los promedios y las desviaciones estándar para la cohesión no drenada, peso unitario total y grado de saturación de los suelos encontrados en las provincias de Heredia y Alajuela (cuadro 10). Asimismo, se obtuvo esta información para el contenido de humedad, límite líquido, límite plástico, relación de vacíos y porosidad del suelo, la cual se muestra en el cuadro 11.

Cuadro 10. Valores de promedio y desviación estándar de la cohesión no drenada, peso unitario total y grado de saturación para las provincias de Heredia y Alajuela.

Grupo/Zona	Tipo de suelo	Cohesión (ton/m ²)		Peso unitario total (ton/m ³)		Saturación (%)	
		\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x
A	CL	11,8	5,4	1,90	0,05	73,4	10,4
	CH	11,5	6,5	1,80	0,05	89,2	6,4
	MH	10,5	6,1	1,76	0,05	93,9	3,7
B	MH	9,0	5,7	1,73	0,07	96,5	3,5
	ML	8,3	4,6	1,77	0,04	93,4	4,2
	CH	10,6	7,0	1,77	0,05	95,5	4,4
	CL	10,6	6,8	1,83	0,04	88,3	6,45
C	MH	7,1	4,5	1,72	0,07	96,8	3,25
	ML	5,4	3,9	1,78	0,05	91,4	7,3
	CH	13,0	6,5	1,79	0,06	93,1	6,95
D	MH	8,7	6,3	1,68	0,06	97,9	2,1
	ML	4,8	2,9	1,73	0,04	96,9	3,15
E	MH	10,3	6,3	1,75	0,04	95,7	4,1
	ML	9,2	6,2	1,78	0,04	92,2	4,6
	CL	8,5	7	1,79	0,03	90,2	4,1
F	ML	6,8	5,3	1,75	0,05	95,1	4,3
	MH	8,8	5,9	1,75	0,05	95,2	4,9
G	CL	10,8	7,3	1,85	0,05	82,3	8,8
	CH	8,5	6,5	1,78	0,07	91,9	8,1
	MH	8,4	5,3	1,76	0,05	94,2	4,8
5	CH	8,6	5,0	1,80	0,06	88,5	8,2
	ML	8,4	4,8	1,81	0,07	88,7	8,6
	MH	9,0	5,6	1,77	0,07	92,3	5,2
22	MH	7,9	4,6	1,73	0,06	97,2	2,8
	CH	8,5	6,5	1,78	0,06	98,0	2,0
	CL	10,8	7,3	1,85	0,06	92,0	2,5
25	MH	6,6	4,5	1,67	0,10	97,0	3,0
27	MH	8,3	4,5	1,75	0,06	95,3	3,6
	ML	9,4	6,3	1,80	0,06	88,7	7,4
	CH	13,3	6,7	1,80	0,07	90,3	9,65
	CL	9,8	4,8	1,85	0,04	82,2	6,75
Am	MH	8,2	5,2	1,75	0,06	95,5	4,4
	CL	9,4	6,7	1,81	0,07	88,2	8,4
	CH	9,9	6,3	1,78	0,07	91,1	7,6
	CL	9,7	5,5	1,86	0,06	90,2	10,0
Lat	MH	9,3	5,7	1,77	0,05	93,9	5,2
	ML	10,2	5,5	1,82	0,05	86,4	8,3
	CH	9,6	5,6	1,78	0,07	91,7	8,6
	CL	11,8	7,7	1,88	0,07	77,0	12,7
V2	MH	5,4	3,2	1,58	0,10	99,7	0,35
	ML	4	2,5	1,73	0,04	96,4	3,65
V2w	MH	5,6	4,5	1,52	0,17	99,2	0,80
V3	MH	8,6	5,7	1,71	0,08	96,6	3,4
	ML	8,1	5,8	1,77	0,05	92,6	5,8
	CH	9,4	6,0	1,77	0,05	93,9	5,2
	CL	10,2	6,6	1,82	0,05	88,0	6,3
V3w	MH	7,3	5,5	1,63	0,14	95,6	4,4

Cuadro 11. Valores de promedio y desviación estándar del contenido de humedad, límite líquido, límite plástico, relación de vacíos y porosidad para las provincias de Heredia y Alajuela.

Zona	Tipo de suelo	Contenido de humedad		Límite líquido		Límite plástico		Razón de vacíos		Porosidad	
		\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x
A	CL	19,6	6,1	42,3	4,9	22,1	2,4	0,7	0,1	40,8	4,6
	CH	34,2	10,1	65,8	14,3	27,6	3,6	1,0	0,2	49,8	4,9
	MH	41,9	13,6	60,9	9,5	36,6	6,5	1,2	0,3	53,5	4,7
B	CL	31,1	6,4	45,8	3,1	25,9	1,3	0,9	0,1	48,4	3,9
	CH	41,5	7,7	72,2	18,2	30,5	4,3	1,2	0,2	53,7	3,6
	ML	38,9	6,2	46,4	3,0	31,6	3,3	1,1	0,1	52,5	3,1
C	MH	47,9	13,1	64,9	14,4	41,3	10,8	1,3	0,3	56,1	4,6
	CH	38,3	9,4	64,3	7,7	29,2	2,9	1,1	0,2	52,0	4,9
	ML	37,0	9,3	44,4	5,0	29,5	1,9	1,1	0,2	51,3	4,9
D	MH	48,3	11,4	66,2	9,7	41,0	7,5	1,3	0,2	56,4	4,4
	ML	46,6	8,3	41,4	4,2	31,2	3,9	1,3	0,2	55,9	3,4
	MH	60,9	17,9	66,0	11,1	45,9	12,5	1,6	0,4	60,6	5,6
E	CL	34,0	5,0	42,3	3,4	24,6	1,4	1,0	0,1	50,1	2,8
	ML	37,2	6,6	44,9	3,8	30,7	3,6	1,1	0,1	51,7	3,4
	MH	44,0	8,7	57,1	4,7	37,4	5,0	1,2	0,2	54,7	3,8
F	ML	43,6	10,2	40,2	6,0	28,9	2,9	1,2	0,2	54,5	4,4
	MH	43,8	10,3	62,7	8,0	39,1	8,2	1,2	0,2	54,5	4,5
G	CL	26,6	8,8	41,8	5,4	23,0	1,8	0,9	0,2	45,5	5,3
	CH	38,8	11,2	72,2	17,0	28,2	3,3	1,1	0,2	52,1	5,8
	MH	41,5	10,0	64,8	12,4	36,9	6,9	1,2	0,2	53,5	4,3
5	CH	34,4	12,8	67,3	13,2	28,9	4,2	1,0	0,3	49,7	6,2
	ML	34,0	12,1	41,9	6,3	30,3	4,4	1,0	0,3	49,6	6,0
	MH	40,4	16,1	60,6	9,2	35,8	6,9	1,1	0,3	52,6	5,9
22	MH	49,5	10,6	70,4	14,5	46,8	10,2	1,3	0,2	56,9	4,1
25	MH	59,5	18,7	76,9	17,2	56,0	17,6	1,6	0,4	60,0	6,3
27	CL	25,7	6,2	42,4	4,5	23,0	2,4	0,8	0,1	45,1	3,9
	CH	36,1	12,1	68,2	17,8	29,5	3,7	1,1	0,3	50,6	6,5
	ML	33,8	11,9	46,0	4,8	31,5	4,1	1,0	0,3	49,5	5,5
	MH	43,6	11,0	65,0	9,7	39,9	10,0	1,2	0,2	54,5	4,3
Am	CL	25,1	9,5	42,7	5,7	22,4	2,2	0,8	0,2	44,4	5,7
	CH	37,5	11,6	71,3	17,1	28,7	4,2	1,1	0,3	51,3	5,7
	ML	33,3	10,5	43,2	5,3	30,4	3,4	1,0	0,2	49,2	5,6
	MH	44,5	10,9	67,8	13,6	39,7	7,4	1,2	0,2	54,8	4,5
Lat	CL	22,8	9,2	41,5	5,4	22,7	5,4	0,8	0,2	42,8	6,2
	CH	38,4	12,2	71,7	15,9	28,8	3,7	1,1	0,3	51,7	6,1
	ML	30,7	8,8	42,9	5,4	30,5	4,2	0,9	0,2	48,0	5,1
	MH	40,8	10,4	67,0	11,3	40,7	7,9	1,2	0,2	53,2	4,5
V2	ML	47,3	9,4	40,6	4,7	30,6	3,8	1,3	0,2	56,1	4,0
	MH	83,1	20,6	79,8	20,4	60,0	18,6	2,1	0,4	66,7	5,0
V2w	MH	103,9	48,5	125,9	46,2	85,2	35,0	2,5	1,0	68,9	9,2
V3	CL	31,7	7,6	43,1	4,7	23,8	2,7	1,0	0,2	28,2	24,7
	CH	40,1	8,9	67,4	14,1	28,4	4,6	1,1	0,2	52,9	4,2
	ML	38,2	8,1	44,8	4,3	30,6	4,3	1,1	0,2	52,1	4,1
	MH	50,9	15,6	66,6	13,6	43,5	12,1	1,4	0,3	57,1	5,3
V3w	MH	68,7	28,9	86,7	29,3	60,3	23,6	1,8	0,7	62,1	7,3

Conclusiones

La posibilidad de contar con estadísticos para la cohesión no drenada, el ángulo de fricción efectivo, el peso unitario total y el grado de saturación, posibilita la utilización de análisis y diseños probabilísticos para estructuras geotécnicas cuando no se cuenta con suficiente cantidad de datos. La utilización de un enfoque probabilístico permite cuantificar de mejor forma la incertidumbre asociada a los materiales geotécnicos.

Para obtener la base de datos estadísticos de los suelos en Costa Rica, se aplicaron dos métodos de análisis que se denominaron como geoespacial y geoestadístico para poder diferenciar los diferentes enfoques utilizados, aunque está claro que ambos toman en cuenta criterios geoespaciales y geoestadísticos. Se concluyó que ambos métodos son exitosos en la obtención de los resultados a partir de los datos analizados. Sin embargo, llega a ser más específico el denominado método geoespacial porque en este análisis se tomó en cuenta la zonificación geotécnica establecida en el Código de Cimentaciones de Costa Rica. En cambio, para el método llamado en este trabajo geoestadístico, se obtuvieron zonas más generalizadas con los mapas climatológicos del Instituto Meteorológico Nacional, por lo que se puede generalizar el comportamiento y las propiedades del suelo en las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón.

Adicionalmente, se obtuvo información para más propiedades geotécnicas en las provincias de San José, Cartago, Heredia y Alajuela, tales como: contenido de humedad, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, razón de vacíos y porosidad. Con estos datos se puede llegar a comparar los resultados de los ensayos de laboratorio realizados para algún proyecto ubicado en estos lugares. Además, para las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón se obtuvieron los parámetros estadísticos para el ángulo de fricción efectivo para las zonas donde se encuentra suelo granular.

Es necesario notar que para las provincias de San José, Cartago, Heredia y Alajuela el análisis efectuado consideró solo los puntos recolectados de la GAM, por lo que puede haber áreas, donde es posible que los estadísticos presentados no representen adecuadamente las condiciones in situ.

Si bien es cierto se recomienda utilizar los valores de desviación estándar presentados para poder realizar análisis y diseños probabilísticos donde el profesional especialista así lo considere, no es aconsejable sustituir una adecuada investigación geotécnica por los valores promedio acá presentados. Los valores promedios deben limitarse a brindar información complementaria que el especialista en ingeniería geotécnica puede valorar en sus análisis.

Agradecimientos

Este trabajo no se habría podido realizar en su totalidad sin la colaboración de los ingenieros Kenneth Arce, Alejandro Bravo y Erick Valverde desarrollando diferentes secciones del proyecto. También de gran importancia fue la compilación de información realizada por la ingeniera Silvia Brizuela. Es especialmente relevante la asesoría técnica brindada durante la fase de análisis de datos por los especialistas el Doctor Rafael Arce de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica, y la Máster Andrea Collado Chaves especialista en estadística y profesora de la Escuela de Economía de la Universidad de Costa Rica. No menos importante es la colaboración de los asistentes del Laboratorio de Medios No Saturados (LabUnsat) de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.

Referencias

- [1] L. Abramson, T. Lee y G. Boyce, *Slope Stability and stabilization methods*, 2da ed, New York: John Wiley and Sons, 2001.
- [2] G. Mostyn y K. Li, "Probabilistic slope analysis-State-of-play", *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*. Taylor and Francis, 1993.
- [3] J. Briaud, *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils*, 2da ed, New York: John Wiley and Sons, 2023.
- [4] M. Dianty, A. Yahaya y F. Ahmad, "Probability Distribution of Engineering Properties of Soil at Telecommunication Sites in Indonesia". *International Journal of Scientific Research in Knowledge*. 2(3), pp.143-150, 2014.
- [5] US Army Corps of Engineers, *Engineering and Design: Slope Stability*, Washington D.C., EM 1110-2-1902, 2003.
- [6] Y. Wang, T. Zhao y Z. Cao, "Site-specific probability distribution of geotechnical properties". *Computer and Geotechnics*, Volumen 70, pp. 159-168, 2015.
- [7] M. Nazarzadeh y S. Sarbishee-ee, "Effect of Uncertainty of Soil Influence on Shallow Foundations". *Open Journal of Geology*. Vol. 7, No. 5, 2017.
- [8] E. Valverde, "Proyecto de graduación. Diseño probabilístico de cimentaciones profundas cuantificando la incertidumbre asociada al grado de saturación en San José y Cartago," San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2012.
- [9] A. Bravo, "Proyecto de graduación. Diseño probabilístico de cimentaciones superficiales cuantificando la incertidumbre asociada a los cambios en el grado de saturación de los suelos de Guanacaste, Puntarenas y Limón". San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2013.
- [10] K. Acuña Chaves, "Proyecto de graduación. Análisis probabilístico de estabilidad de taludes cuantificando la incertidumbre asociada a los cambios en el grado de saturación del suelo, aplicado a suelos de Alajuela y Heredia". San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2012.
- [11] G. Laporte y S. Sáenz, "Métodos aproximados de cálculo por consolidación de limos compresibles aplicables a Costa Rica". III Seminario Nacional de Geotecnia. San José, 1985.
- [12] D. Castillo, "Proyecto de graduación. Normalización del ensayo SPT en Costa Rica". San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 1994.
- [13] Asociación Costarricense de Geotecnia, *Código de Cimentaciones de Costa Rica*, Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2009
- [14] G. Bogantes, "Proyecto de graduación. Propuesta de zonificación geotécnica para el área metropolitana". San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 1999.
- [15] G. Bogantes, "Zonificación Geotécnica General de Costa Rica considerando elementos edáficos y climáticos". VIII Seminario Nacional de Geotecnia y III Encuentro Centroamericano de Geotecnistas, 2002, pp. 159-181.
- [16] J. Bowles, *Foundations Analysis and Design*, 5^{ta} ed, Illinois: McGraw - Hill International Editions, 1997.
- [17] Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN), *Atlas Climatológico de Costa Rica [Versión digital]*. San José, Costa Rica, 2009.
- [18] S. Brizuela, "Proyecto de graduación. Diseño de un programa computacional para el análisis probabilístico de cimentaciones superficiales y muros de retención". San José: Universidad de Costa Rica, 2016.