



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrados
Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica

**ESTUDIO GEOTÉCNICO PRELIMINAR PARA LA UBICACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS
EN EL MUNICIPIO DE SAN JUAN OSTUNCALCO, QUETZALTENANGO**

Inga. Dulce Nineth Rivera Escobar

Asesorado por el Dr. Ing. Dagoberto Alfredo Bautista Juárez

Guatemala, julio de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO GEOTÉCNICO PRELIMINAR PARA LA UBICACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS
EN EL MUNICIPIO DE SAN JUAN OSTUNCALCO, QUETZALTENANGO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

INGA. DULCE NINETH RIVERA ESCOBAR

ASESORADO POR EL DR. ING. DAGOBERTO BAUTISTA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA

GUATEMALA, JULIO 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO a.i.	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Sergio Antonio Castellanos López
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTUDIO GEOTÉCNICO PRELIMINAR PARA LA UBICACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS EN EL MUNICIPIO DE SAN JUAN OSTUNCALCO, QUETZALTENANGO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 29 de octubre de 2016.


Inga. Dulce Nineth Rivera Escobar


Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.574.2023

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO GEOTÉCNICO PRELIMINAR PARA LA UBICACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS EN EL MUNICIPIO DE SAN JUAN OSTUNCALCO, QUETZALTENANGO**, presentado por: **Inga. Dulce Nineth Rivera Escobar**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Ingeniería geotécnica después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.



Guatemala, julio de 2023

AACE/gaoc



Guatemala, julio de 2023

LNG.EEP.OI.574.2023

En mi calidad de Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“ESTUDIO GEOTÉCNICO PRELIMINAR PARA LA UBICACIÓN DE RELLENOS
SANITARIOS EN EL MUNICIPIO DE SAN JUAN OSTUNCALCO,
QUETZALTENANGO”**

presentado por **Inga. Dulce Ninth Rivera Escobar** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Ingeniería geotécnica** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala 11 de marzo 2023

M.A. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

M.A. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL** titulado: **“ESTUDIO GEOTÉCNICO PRELIMINAR PARA LA UBICACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS EN EL MUNICIPIO DE SAN JUAN OSTUNCALCO, QUETZALTENANGO”** de la estudiante **Dulce Nineth Rivera Escobar** quien se identifica con número de carné **201590039** del programa de **Maestría en Geotécnica**.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

MSc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador
Maestría en Estructuras
Escuela de Estudios de Postgrado

QUETZALTENANGO, 26 DE NOVIEMBRE DE 2019

Mtro. Armando Fuentes Roca
Coordinador Académico área de Infraestructura
Escuela de Estudios de Postgrado

Le saludo respetuosamente deseando tenga éxito en sus actividades diarias.

Por este Medio informo a usted, que he revisado y aprobado el trabajo de graduación titulado **"Estudio Geotécnico preliminar para la Ubicación de Rellenos sanitarios en el Municipio de San Juan Ostuncalco, Quetzaltenango"** de la estudiante Dulce Nineth Rivera Escobar, del programa de Maestría en Ingeniería Geotécnica identificada con numero de carné 2001590039.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

"Id y enseñad a todos"



Dr. Ing. Dagoberto Alfredo Bautista
Asesor de Tesis

Dr. Ing. Dagoberto Alfredo Bautista
COLEGIADO 1.386
ESPECIALIDAD HIDROLOGIA,
HIDROGEOLOGIA, GEOTECNIA
Y GEOFISICA

ACTO QUE DEDICO A:

Mi madre	Belbeth Nineth Escobar Cifuentes, que me ha apoyado en este proceso y me ha servido de guía.
Mi padre	Bernave Rivera Santos, por su apoyo y ayuda
Mi hermana	Belbeth Beatriz Rivera Escobar, quien me acompañó durante todo momento.
Mi hermano	Daniel Fernando Rivera Escobar, por su apoyo y ayuda.
Mi hija	Vania Lucia Girón Rivera, por ser mi inspiración para seguir adelante.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XVII
OBJETIVOS	XIX
HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	XXI
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV

1.	MARCO REFERENCIAL	1
1.1.	Ubicación San Juan Ostuncalco	1
1.2.	Colindancias	3
1.3.	Clima	4
1.3.1.	Lluvia	4
1.4.	Vegetación	6
1.4.1.	Áreas protegidas	7
1.5.	Agua subterránea	8
1.5.1.	Acuífero de Quetzaltenango	8
1.5.1.1.	Unidades hidrogeológicas	11
1.5.1.2.	Niveles de aguas subterráneas	12
1.6.	Información geotécnica del terreno	15
1.6.1.	Geología regional	15
1.6.2.	Sismología regional	16
1.6.2.1.	Marco tectónico para Guatemala	16

1.6.3.	Geología local	17
1.6.3.1.	Geomorfología.....	18
1.6.3.2.	Región fisiográfica	18
1.6.3.3.	Montañas volcánicas altas de occidente	21
1.6.3.4.	Planicies onduladas.....	22
1.6.3.5.	Valle Tectónico de Salamá	22
1.7.	Hidrología.....	24
1.8.	Estado actual de rellenos sanitarios en el área del sur occidente de Guatemala	27
1.9.	Proyectos de ubicación de rellenos sanitarios actuales	28
1.10.	Adaptación al cambio climático y gestión de riesgos del municipio de San Juan Ostuncalco	28
1.11.	Rellenos sanitarios anteriores en San Juan Ostuncalco	30
1.12.	Proyectos ubicados mediante el método analítico jerárquico y selección multicriterio	31
2.	MARCO TEÓRICO	35
2.1.	Estudio geotécnico	35
2.2.	Tipos de estudios geotécnicos	36
2.2.1.	Reconocimiento preliminar o visita al sitio.....	36
2.2.2.	Estudio geotécnico definitivo	37
2.3.	Clasificación de estudios geotécnicos según la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.....	38
2.3.1.	Estudio de reconocimiento	40
2.3.2.	Actividades recomendadas para estudios de reconocimiento AGIES NSE 2.1-10.....	41
2.3.2.1.	Actividades de gabinete	41
2.3.2.2.	Actividades de campo	42

2.4.	Información geotécnica del sitio.....	42
2.4.1.	Geología regional	42
2.4.2.	Geología local	43
2.4.3.	Geomorfología	43
2.4.4.	Estratigrafía	43
2.4.5.	Información hidrológica e hidrogeológica	44
2.4.6.	Recopilación de datos de mecánica de suelos históricos.....	44
2.5.	Normativa aplicable a la implementación de rellenos sanitarios en la República de Guatemala	44
2.5.1.	Código municipal	45
2.5.2.	Plan de ordenamiento territorial.....	46
2.5.3.	Código de Salud Decreto 90-97.....	46
2.5.4.	Reglamento de evaluación, control y seguimiento ambiental	47
2.6.	Relleno sanitario	48
2.6.1.	Elementos básicos de un relleno sanitario.....	49
2.6.2.	Tipos de rellenos sanitarios	49
2.6.2.1.	Rellenos manuales	49
2.6.2.2.	Rellenos mecanizados.....	49
2.6.2.3.	Rellenos semimecanizados	50
2.6.3.	Métodos de construcción rellenos sanitarios	50
2.6.3.1.	Método de trinchera	51
2.6.3.2.	Método de área.....	52
2.6.3.3.	Método combinado	53
2.6.4.	Diagrama de un relleno sanitario	54
2.7.	Principales fallas en rellenos sanitarios	54
2.7.1.	Fallas en los sistemas de impermeabilización	55
2.7.1.1.	Uso de barrera de arcilla.....	55

2.7.1.2.	Uso de geomembrana	55
2.7.2.	Fallas en los sistemas de drenaje de lixiviados.....	55
2.7.3.	Erosión en las capas que componen el relleno	56
2.7.4.	Fallas de estabilidad en taludes	56
2.7.5.	Hundimientos o asentamientos	56
2.8.	Método de selección multicriterio	57
2.8.1.	Método analítico jerárquico	57
2.9.	Sistemas de información geográfica aplicados a ubicación de rellenos sanitarios	62
3.	MARCO METODOLÓGICO	63
3.1.	Metodología para el levantamiento de mapas para la selección de ubicación	63
3.1.1.	Levantamiento áreas protegidas	64
3.1.2.	Levantamiento de zonas de riesgo a inundación y deslizamientos	68
3.1.3.	Levantamiento de centros poblados.....	68
3.1.4.	Levantamiento de zanjones y acuíferos	69
3.1.5.	Levantamiento de pendientes y modelo de elevación digital.....	69
3.2.	Metodología para la selección de criterios y aplicación del método analítico jerárquico	70
3.3.	Ensayos de laboratorio y campo en el sitio seleccionado	70
3.3.1.	Clasificación del suelo.....	71
3.3.1.1.	Análisis granulométrico (ASTM D6913- 04)	74
3.3.1.2.	Límites de Atterberg	74
3.3.2.	Ensayo de gravedad específica (ASTM D854-02) ..	75
3.3.3.	Ensayo de corte directo (ASTM D 3080-98)	76

3.3.4.	Ensayo de penetración estándar (SPT) (ASTM D1586).....	76
3.4.	Metodología de análisis de los datos obtenidos	78
3.4.1.	Análisis de estabilidad de taludes	78
3.4.2.	Asentamientos en rellenos sanitarios	78
4.	RESULTADOS	81
4.1.	Resultados del monitoreo de residuos sólidos municipales realizada por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales	81
4.1.1.	Estado actual de la disposición de residuos sólidos en San Juan Ostuncalco.....	82
4.2.	Resultados de la magnitud del proyecto	83
4.2.1.	Sistema constructivo y clasificación.....	83
4.3.	Aplicación del método multicriterio analítico jerárquico	87
4.3.1.	Selección de criterios.....	88
4.3.2.	Normalización de la matriz de comparaciones pareada y valor de cada criterio.....	91
4.3.3.	Selección de alternativas	94
4.3.4.	Selección de alternativas	95
4.3.5.	Selección de alternativas	100
4.3.6.	Resultados de la aplicación del proceso analítico jerárquico	101
4.4.	Reconocimiento preliminar de la alternativa seleccionada	104
4.4.1.	Resultados de los ensayos de penetración estándar.....	107
4.4.2.	Resultados del muestreo de suelos y pruebas de laboratorio.....	110
4.4.2.1.	Análisis granulométrico.....	110

4.4.2.2.	Límites de Atterberg y contenido de humedad natural.....	114
4.4.2.3.	Ensayo de gravedad específica.....	117
4.4.3.	Ensayo de corte directo.....	117
4.4.4.	Análisis de estabilidad de talud	120
4.4.5.	Cálculo de asentamiento estimado del relleno sanitario.....	122
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	123
5.1.	Análisis de los resultados del estudio geotécnico de la ubicación seleccionada	132
5.2.	Elementos geotécnicos a evaluar en rellenos sanitarios para el municipio de San Juan Ostuncalco	134
5.3.	Actividades recomendadas para el estudio geotécnico	136
5.3.1.	Análisis de funcionamiento y cierre del relleno.....	137
	CONCLUSIONES.....	139
	RECOMENDACIONES.....	141
	REFERENCIAS	143
	APÉNDICES.....	149
	ANEXOS.....	153

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Perímetro municipio de San Juan Ostuncalco	2
Figura 2.	Mapa de Colindancias del Municipio de San Juan Ostuncalco.....	3
Figura 3.	Mapa de probabilidad de sequías San Juan Ostuncalco	5
Figura 4.	Mapa de zonas de vida.....	7
Figura 5.	Unidades hidrogeológicas del acuífero de Quetzaltenango.....	13
Figura 6.	Perfil hidrogeológico del acuífero de Quetzaltenango.....	14
Figura 7.	Red de flujo de aguas subterráneas del acuífero de Quetzaltenango.....	14
Figura 8.	Geodinámico de Centroamérica	17
Figura 9.	Mapa de fisiografía de Guatemala	19
Figura 10.	Subregión fisiográfica	20
Figura 11.	Mapa de Gran Paisaje	21
Figura 12.	Clasificación geológica	23
Figura 13.	Ubicación de cuencas en San Juan Ostuncalco	24
Figura 14.	Cuenca del río Naranjo	25
Figura 15.	Subcuencas en el Municipio de San Juan Ostuncalco.....	26
Figura 16.	Proceso de análisis geotécnicos.....	37
Figura 17.	Categorías de estudios geotécnicos NSE 2.1-10	38
Figura 18.	Diagrama método trinchera	51
Figura 19.	Diagrama método de área	52
Figura 20.	Diagrama método combinado.....	53
Figura 21.	Diagrama básico de un relleno sanitario.....	54
Figura 22.	Proceso Analítico Jerárquico primera etapa	58

Figura 23.	Toma de muestra inalterada.....	71
Figura 24.	Sistema unificado de clasificación de suelo.....	73
Figura 25.	Gráfica de plasticidad	75
Figura 26.	Ensayo de penetración estándar.....	77
Figura 27.	Ficha de seguimiento de residuos sólidos municipio de San Juan Ostuncalco.....	82
Figura 28.	Clasificación de desechos sólidos	84
Figura 29.	Diagrama final de criterios y alternativas	100
Figura 30.	Ubicación seleccionada	106
Figura 31.	Ubicaciones de los ensayos y puntos de muestra.....	107
Figura 32.	Gráfica granulométrica sondeo 1.....	111
Figura 33.	Gráfica granulométrica sondeo 2.....	112
Figura 34.	Gráfica granulométrica sondeo 3.....	113
Figura 35.	Gráfica granulométrica (corte directo)	114
Figura 36.	Resultados ensayo de corte directo	118
Figura 37.	Gráfica corte directo y resumen de resultados	119
Figura 38.	Resultado análisis de estabilidad de talud perfil	120
Figura 39.	Resultado análisis de estabilidad de talud.....	121
Figura 40.	Diagrama de flujo del proceso de selección para rellenos sanitarios	126
Figura 41.	Actividades críticas del proceso de selección.....	128
Figura 42.	Localización de alternativa seleccionada	130
Figura 43.	Fotografías aéreas del área seleccionada.....	131
Figura 44.	Mecanismo de ruptura en ignimbritas de textura gruesa	133

TABLAS

Tabla 1.	Áreas protegidas de San Juan Ostuncalco	8
Tabla 2.	Objetos focales con sus efectos	29

Tabla 3.	Escalas de prioridad de influencia	60
Tabla 4.	Matriz de comparaciones pareadas	60
Tabla 5.	Áreas protegidas coordenadas UTM, Bosque el Tizate	64
Tabla 6.	Áreas protegidas coordenadas UTM, Bosque Espino Roble Grande.....	65
Tabla 7.	Áreas protegidas de coordenadas UTM, Bosque Mirasol	66
Tabla 8.	Áreas protegidas de coordenadas UTM, Bosque Caracol	67
Tabla 9.	Resultados disposición actual.....	81
Tabla 10.	Producción de desechos sólidos.....	84
Tabla 11.	Proyección de residuos sólidos.....	85
Tabla 12.	Proyección de área para residuos sólidos producidos	86
Tabla 13.	Símbolos de los criterios.....	88
Tabla 14.	Evaluación de criterios método analítico jerárquico	89
Tabla 15.	Matriz de comparación pareada.....	89
Tabla 16.	Matriz de comparación pareada normalizada	91
Tabla 17.	Cálculo del valor de cada criterio	92
Tabla 18.	Cálculo de consistencia de la matriz.....	93
Tabla 19.	Alternativas para ubicación de rellenos sanitarios	95
Tabla 20.	Comparación de alternativas por pares, pendientes máximas	96
Tabla 21.	Comparación de alternativas por pares, centros poblados	96
Tabla 22.	Comparación de alternativas por pares, corrientes y acuíferos	97
Tabla 23.	Comparación de alternativas por pares, deslizamientos.....	97
Tabla 24.	Comparación de alternativas por pares, áreas de inundación	98
Tabla 25.	Comparación de alternativas por pares, área mínima	98
Tabla 26.	Comparación de alternativas por pares, áreas protegidas.....	99
Tabla 27.	Comparación de alternativas por pares, vías de acceso	99
Tabla 28.	Cálculo del valor de las alternativas.....	101
Tabla 29.	Criterios evaluados	102
Tabla 30.	Valores finales de cada criterio	103

Tabla 31.	Valores finales de cada Alternativa	104
Tabla 32.	Resultado de visita al sitio o reconocimiento preliminar	104
Tabla 33.	Resultados del sondeo de penetración estándar 1.....	108
Tabla 34.	Resultados del sondeo de penetración estándar 2.....	108
Tabla 35.	Resultados del sondeo de penetración estándar 3.....	109
Tabla 36.	Resultados del sondeo de penetración estándar 4.....	109
Tabla 37.	Resultado análisis granulométrico sondeo 1	110
Tabla 38.	Resultado análisis granulométrico sondeo 2	111
Tabla 39.	Resultado análisis granulométrico sondeo 3	112
Tabla 40.	Resultado análisis granulométrico corte directo	113
Tabla 41.	Resultado límites de Atterberg sondeo 1.....	115
Tabla 42.	Resultado límites de Atterberg sondeo 2.....	115
Tabla 43.	Resultado límites de Atterberg sondeo 3.....	116
Tabla 44.	Resultado límites de Atterberg (corte directo)	116
Tabla 45.	Resultado gravedad específica ASTM D854-02.....	117
Tabla 46.	Metodología del proceso de selección	125
Tabla 47.	Cuadro comparativo de alternativas	129

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
RI	Consistencia aleatoria
D	Criterio de amenaza por deslizamiento
I	Criterio de amenaza por inundación
Am	Criterio de área mínima
Cp	Criterio de cercanía de centros poblados
Cr	Criterio de cercanía de corrientes superficiales y acuíferos
Ap	Criterio de distancia de áreas protegidas
Va	Criterio de distancia de vías de acceso
Pm	Criterio de pendientes máximas
CI	Índice de consistencia
Km²	Kilómetros cuadrados
Mm	Milímetros
N	Número de criterios evaluados
CR	Razón de consistencia

GLOSARIO

Andesítica	Roca ígnea volcánica de composición intermedia.
Asentamiento	Deformación vertical de una superficie por la aplicación de cargas.
Botadero a cielo abierto	Lugar destinado para disposición final de la basura, generalmente se realiza sin criterios técnicos.
Botadero clandestino	Botadero establecido de forma ilegal que no cuenta con un diseño integral que considere las características ambientales y geotécnicas.
CATHALAC	Es una organización Internacional fundada en 1992, con sede en la República de Panamá, cuya misión es promover el desarrollo sostenible por medio de la educación, la investigación aplicada y la transferencia de tecnología en materia de gestión de cuencas hidrográficas, cambio climático, análisis y modelación ambiental y gestión de riesgos.
Ignimbrita	Roca ígnea y depósito volcánico que consiste en toba dura compuesta de fragmentos de roca y fenocristales en una matriz de fragmentos vítreos.

Lixiviado	Líquido resultante de la percolación de un fluido a través de un sólido.
Lutitas	Roca sedimentaria clásica de grano muy fino, integrada por detritos clásticos constituidos por partículas de los tamaños de la arcilla y del limo.
Relleno sanitario	Lugar destinado para disposición final de la basura en el cual se toman medidas para reducir los efectos de un botadero a cielo abierto.
Riolita	Roca ígnea extrusiva, volcánica félsica, de color gris a rojizo con una textura de granos finos.

RESUMEN

La investigación se enfocó en determinar la metodología para realizar un proceso de selección de ubicaciones para rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco utilizando el método multicriterio analítico jerárquico, realizando un reconocimiento preliminar para determinar el tipo estudio geotécnico en el área seleccionada, definiendo a partir del mismo los análisis geotécnicos específicos que deben realizarse para su implementación y definiendo los elementos geotécnicos que deben evaluarse en este tipo de proyecto.

Se realizó inicialmente una recolección de datos para el municipio de San Juan Ostuncalco, siendo el enfoque principal el establecer los criterios a evaluar para la implementación de rellenos sanitarios, los datos utilizados fueron principalmente estudios de fuentes institucionales y visitas de campo al municipio, y a partir de la información recopilada, se realizó la digitalización de la información conformando mapas georreferenciados de los principales criterios poblacionales y geotécnicos.

Para seleccionar una ubicación se tomaron en cuenta múltiples criterios, se seleccionó el proceso analítico jerárquico, debido a la posibilidad de ponderar y evitar los sesgos durante el proceso de selección. A partir de los datos obtenidos y la información geográfica, se ponderaron cada uno de los criterios, se realizó las comparaciones por parejas siguiendo el proceso analítico jerárquico, confrontando tres alternativas resultantes del mapeo realizado, finalizando con la selección de la alternativa que cumple mejor con cada uno de los criterios.

A partir del proceso analítico jerárquico y los procesos preliminares se pudo definir una metodología para seleccionar sitios para rellenos sanitarios y considerando la flexibilidad del proceso analítico jerárquico, se estableció que pueden evaluarse otros criterios sobre un área establecida.

Para el caso del municipio de San Juan Ostuncalco, se evaluaron ocho criterios, estableciendo tres alternativas de ubicación para rellenos sanitarios, se evaluó la consistencia de los criterios teniendo una razón de consistencia de 0.068, por lo que según el proceso analítico jerárquico se considera que la matriz no presenta sesgos o inclinaciones en las decisiones.

Los valores obtenidos de cada alternativa indica que la alternativa 1, con el 41.58 % es la alternativa que cumple porcentualmente de mejor manera con los 8 criterios planteados, seguida de la alternativa 3 con un 34.39 % y por último la 2 alternativa 24.03 %.

Al seleccionar la ubicación que cumple con mejor con los criterios establecidos se realizó la visita al sitio o reconocimiento preliminar, en donde verificaron las condiciones generales para determinar el tipo de estudio a realizar, en el análisis geotécnico se evaluaron las características fisicomecánicas del suelo, estableciendo que el sitio cumple con los parámetros de valor soporte, factor de seguridad para la estabilidad del talud adyacente mayor al requerido por la normativa pertinente, y se determinó el estudio geotécnico especial tipo II como estudio geotécnico definitivo, sin embargo por los elementos presentes en el sitio de estudio, basándose en la Norma de Seguridad Estructural NSE 2.1, se recategorizó a un estudio geotécnico especial tipo IV, recomendando incluir la verificación del potencial de licuefacción y la evaluación de la incidencia en los procesos de meteorización en el talud adyacente.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el municipio de San Juan Ostuncalco, los rellenos sanitarios se ubican por la disponibilidad de sitios gestionados por los gobiernos municipales y no por la elaboración de un estudio integral del área, en muchos casos esto puede ser contraproducente, debido a que la ubicación del terreno es determinante para su correcto diseño y funcionamiento, es prioritario el análisis de los elementos que tienen incidencia en la factibilidad de este tipo de proyecto, siendo el análisis geotécnico uno de los primordiales para la factibilidad de su selección.

Dentro de la clasificación de los tipos de estudios geotécnicos, se encuentra la visita al sitio o reconocimiento preliminar, estando establecido como un análisis general de un área previo a un análisis específico; Sin embargo, no están definidas en su totalidad las ventajas de la realización de un reconocimiento preliminar para este tipo de proyecto, su incidencia en la clasificación del estudio geotécnico definitivo y su compatibilidad con los procesos de selección de sitios para rellenos sanitarios lo que da origen a la pregunta principal del presente estudio:

- ¿Cuál es la metodología para determinar la ubicación de rellenos sanitarios y qué criterios deben evaluarse en un estudio geotécnico para este tipo de proyecto?

Para la resolución del anterior cuestionamiento es necesario responder a las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Qué criterios deben ser evaluados en la selección de ubicaciones para rellenos sanitarios, en el Municipio de San Juan Ostuncalco?
- ¿Qué método de selección es el adecuado para el estudio que se está realizando según las características específicas de la zona?
- ¿Existen en San Juan Ostuncalco áreas adecuadas para la implementación de rellenos sanitarios?
- ¿En el análisis geotécnico para un relleno sanitario cuales son los elementos geotécnicos que deben evaluarse?

OBJETIVOS

General

Determinar una metodología para la selección de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco, y establecer los elementos geotécnicos que deben evaluarse en la elaboración de un estudio geotécnico para la alternativa seleccionada.

Específicos

1. Definir los criterios que deben tomarse en cuenta para la selección de ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco, Quetzaltenango.
2. Definir un método de selección de sitio, que tome en cuenta los criterios seleccionados del área y que sea adecuado al municipio en estudio.
3. Realizar un reconocimiento preliminar en la ubicación seleccionada y establecer la clasificación y requerimientos que deben realizarse en el estudio geotécnico definitivo.

HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

Al aplicar el método de selección multicriterio en el municipio de San Juan Ostuncalco, se tendrá un panorama claro de los elementos geológicos presentes en el área de estudio, por ende, podrán determinarse también las zonas en las que la ubicación del relleno, representen un riesgo menor y un mayor aprovechamiento del sistema, facilitando de esta forma el proceso de selección de sitios para la implementación de este tipo de proyecto.

Se obtendrán las recomendaciones específicas para el estudio geotécnico definitivo a partir de la visita o reconocimiento preliminar, principalmente las relacionadas con los estudios y análisis de laboratorio que deben realizarse. Con el uso de los métodos estadísticos y los sistemas de información geográfica se tendrá una mayor capacidad del uso de información, esto aunado a la aplicación de un método de selección multicriterio facilitará la determinación de áreas idóneas para la implementación de rellenos sanitarios para el municipio de San Juan Ostuncalco.

Del proceso analítico jerárquico se obtendrá la ubicación óptima entre las opciones seleccionadas según los criterios establecidos, siendo prioritaria la metodología y aplicación del proceso analítico jerárquico, debido a que en el proceso se pueden incluir otros criterios durante el análisis del anteproyecto.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

- **Área de estudio**

Se definió el área de estudio para la localización de rellenos sanitarios, el municipio de San Juan Ostuncalco, utilizando los límites oficiales del Instituto Geográfico Nacional (IGN), comprende las áreas urbana y rural del municipio.

- **Tipo de investigación**

Se estableció la investigación como cuantitativa, debido a la asignación de valores numéricos a los criterios de evaluación, y la realización de comparaciones de relación entre las variables planteadas. Según el objeto de estudio se estableció la investigación como analítica por la comparación entre variables, sin embargo, en el avance de la investigación se evidenció que el alcance de la misma es explicativo ya que al realizar la selección por el método multicriterio analítico jerárquico, de la ubicación para el relleno sanitario, se esperaba coadyuvar a la ejecución del estudio geotécnico preliminar. Es decir que se esperaba conocer el comportamiento o asociación respecto a las variables evaluadas.

- **Metodología del estudio**

El estudio se divide en cuatro fases: como primera fase se estableció la magnitud del proyecto y los requisitos específicos para el municipio de San Juan Ostuncalco según el monitoreo realizado por la Municipalidad de San Juan Ostuncalco y el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

A partir de la información recabada se inició la segunda fase que consistió en la elaboración de mapas georreferenciados en los que se indicaron las principales unidades a considerar para la implementación este tipo de proyecto, tomando en cuenta los análisis de riesgos y estudios anteriores para el municipio y los requerimientos de la Municipalidad de San Juan Ostuncalco.

La tercera fase consistió en la aplicación del método multicriterio para la selección de ubicación, a partir de los datos obtenidos y la información geográfica se ponderó cada uno de los criterios, se realizó las comparaciones por parejas siguiendo el proceso analítico jerárquico, a partir de los mapas se establecieron 3 posibles alternativas de ubicación para relleno sanitario según lo establecido por la Municipalidad de San Juan Ostuncalco, y se definieron 8 criterios a considerar para la aplicación del método Analítico Jerárquico, con la aplicación del método multicriterio se estableció la alternativa que cumplió con un valor porcentual mayor con los criterios seleccionados, estableciendo de esta forma una metodología para este tipo de procesos.

A partir de la ubicación seleccionada se inició con la última fase el estudio iniciando con una visita o reconocimiento preliminar del área seleccionada, a partir de la misma se determinaron los elementos a evaluar en el estudio geotécnico, que consistió en establecer por medio de trabajo de campo y de gabinete los elementos geotécnicos presentes en el sitio, priorizando los aspectos que representan una amenaza para la futura implementación del proyecto, con esto se evaluaron los factores que tienen incidencia directa en el área de estudio y se establecieron los criterios a evaluar en este tipo de proyecto, el resultado de la exploración de campo se considera la base para la realización del estudio geotécnico especial tipo IV que se determinó como estudio geotécnico definitivo para el proyecto.

INTRODUCCIÓN

A través de los años se han experimentado catástrofes, relacionadas con la elección del sitio donde se emplaza un relleno sanitario, sin embargo, se siguen manejando los mismos métodos de selección que toman algunos aspectos pero que no llegan a cumplir los requisitos de seguridad que un relleno sanitario debe tener. En muchas ocasiones la ubicación es seleccionada por conveniencia, sin la elaboración de estudios previos, se realiza la obra de forma descontrolada, pudiendo provocar daños a la población y medio ambiente.

A nivel nacional el manejo de los residuos sólidos es una de las problemáticas más frecuentes, según el censo del Instituto Nacional de Estadística, 2019 el municipio de San Juan Ostuncalco cuenta con 51,828 habitantes, con una producción estimada de desechos sólidos de 0.54 kilogramos-habitante/día. Según el estudio realizado por la agencia de los Estados Unidos para el desarrollo Internacional, USAID, en el año 2018, la producción anual es de 10,215.30 toneladas para el municipio (USAID, 2018).

Históricamente han existido para el municipio diferentes ubicaciones y formas de tratamiento de los residuos sólidos, la organización Care Guatemala dio inicio a la implementación del proyecto U-SWEEP, en el que se estableció una planta de tratamiento para residuos sólidos y un relleno sanitario, sin embargo, al finalizar este proyecto se realizó un botadero a cielo abierto en la aldea de Monrovia, que no cuenta con manejo adecuado, siendo prioritaria la implementación de una forma de tratamiento y disposición de sólidos, según lo establecido por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, esto con base

en el levantamiento de datos de la disposición de residuos sólidos realizada en el año 2016 para los municipios de Quetzaltenango.

Por lo anterior la realización de una visita al sitio o reconocimiento preliminar, para establecer los elementos geológicos y geotécnicos del área de análisis, en conjunto con la aplicación de un método de selección para establecer todos aquellos criterios que son prioritarios en los procesos de selección, son elementos facilitadores para la toma de decisiones del manejo de los residuos sólidos en el Municipio de San Juan Ostuncalco.

Para ello fue necesario el generar metodologías pertinentes para mejorar la forma de selección de sitios para este tipo de proyecto, tomando en cuenta la normativa vigente aplicable, buscando proveer a los usuarios de información necesaria que será utilizada en las fases posteriores de diseño y construcción.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Ubicación San Juan Ostuncalco

San Juan Ostuncalco es un municipio del departamento de Quetzaltenango, de la región IV sur occidente, posee un área de 109 km² según el Instituto Geográfico Nacional (IGN), el municipio cuenta con: una villa con cuatro zonas urbanas, diecinueve aldeas, veintiséis Caseríos, una Parcela y diez fincas. Coordenadas geográficas del centro del municipio, 14°52' 10" N y 91°37'16 W.

Dentro de las limitaciones a tomar en cuenta para la delimitación de los límites geográficos, es que existen diferencias entre los referenciados por el Instituto Geográfico Nacional y los establecidos por la corporación municipal. En este sentido, el proceso para definir los límites está establecido en el código municipal en su artículo 24 el cual establece lo siguiente:

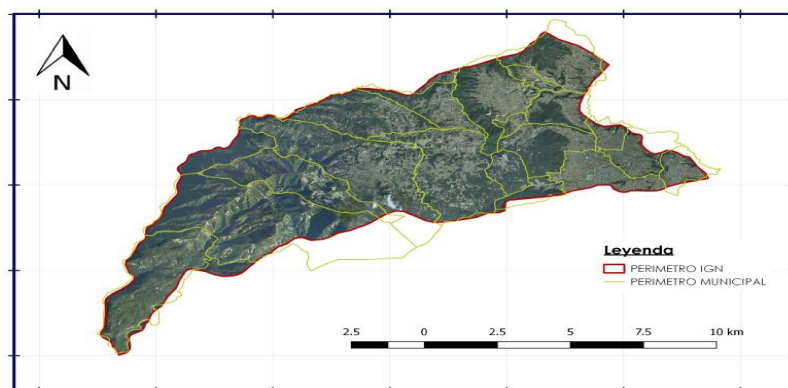
Artículo 24. Conflicto de límites entre distritos municipales. Los conflictos derivados de la falta de definición en los límites existentes entre dos o más municipios, serán sometidos, por los Concejos Municipales afectados, a conocimiento del Ministerio de Gobernación, que dispondrá de un plazo de seis (6) meses, a partir de la recepción del expediente, para recabar los antecedentes que aquellos deberán proporcionarle y el dictamen del Instituto Geográfico Nacional, completar los estudios, informaciones, diligencias y demás medidas que sean necesarias, con base en las cuales

emitirá opinión, y lo elevará a conocimiento del Presidente de la República, para que, si así lo considera, presente a consideración del Congreso de la República la iniciativa de ley correspondiente, para su conocimiento y resolución. (Código Municipal, 2002, p. 6)

En cuanto no se lleve el proceso anterior, el municipio de San Juan Ostuncalco y sus colindantes no podrá establecerse con certeza el límite municipal, por lo que para el presente análisis se tomó en cuenta el límite establecido por el IGN, tomando únicamente como referencia el límite reconocido por las autoridades municipales. Para el análisis de área a evaluar se tomaron también las ortofotos oficiales del municipio del año 2006 del IGN, a partir de las mismas se establecen las áreas y ubicaciones de los sitios de interés.

Figura 1.

Perímetro municipio de San Juan Ostuncalco



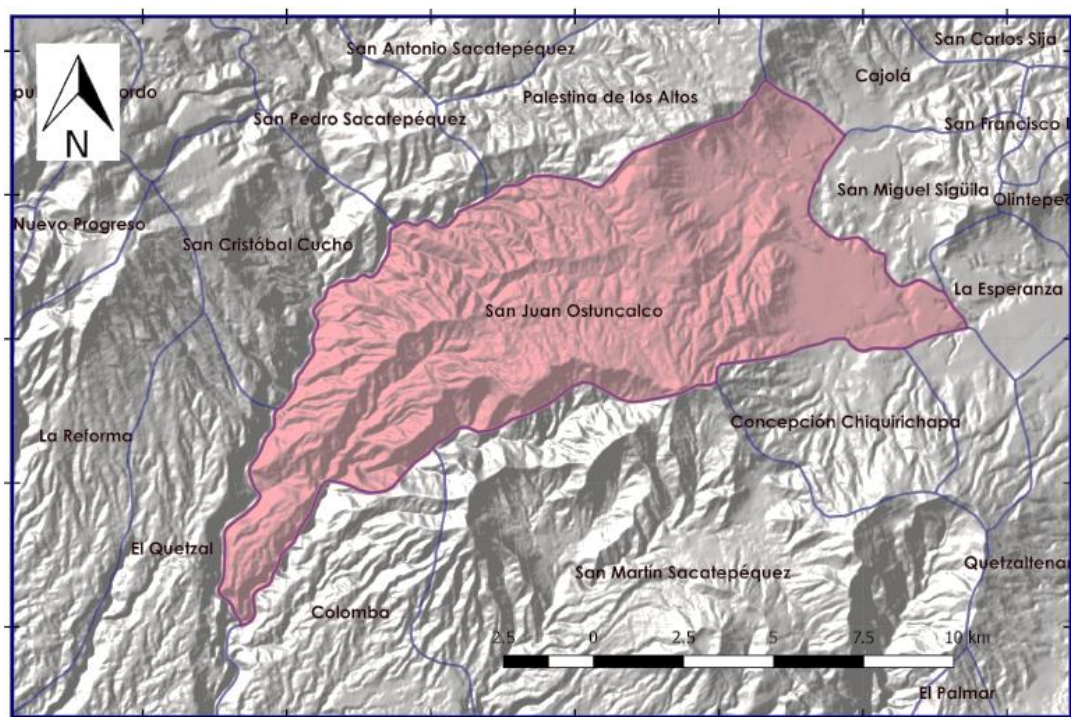
Nota. Comparación de perímetros, del municipio de San Juan Ostuncalco. Adaptado de Instituto Geográfico Nacional (2006). *Mapas temáticos y Ortofotos de la República de Guatemala.* (<http://ide.segeplan.gob.gt/geoservicios.html>), consultado el 10 marzo de 2020. De dominio público.

1.2. Colindancias

Colinda al norte con los municipios de Cajolá, Palestina de los Altos y San Pedro Sacatepéquez, al este con el municipio de San Miguel Sigüila, La Esperanza, al oeste con San Cristóbal Cucho y El Quetzal, al sur con los municipios de San Martín Sacatepéquez y Concepción Chiquirichapa.

Figura 2.

Mapa de Colindancias del Municipio de San Juan Ostuncalco



Nota. Mapa de colindancias del municipio de San Juan Ostuncalco. Adaptado de Instituto Geográfico Nacional (2006). *Mapas temáticos y Ortofotos de la República de Guatemala.* (<http://ide.segeplan.gob.gt/geoservicios.html>), consultado el 10 marzo de 2020. De dominio público.

1.3. Clima

Su temperatura media anual es de 13.6 °C, con un promedio anual de temperaturas máximas y mínimas de 21.7 °C y 5.8 °C. Con temperaturas promedio anual absolutas máximas y mínimas de 29.6 °C. y -11.5 °C respectivamente (Helvetas, 2009).

1.3.1. Lluvia

De acuerdo a la información climática del Estudio Técnico de los Bosques Municipales de San Juan Ostuncalco, Quetzaltenango de Helvetas Guatemala (2009):

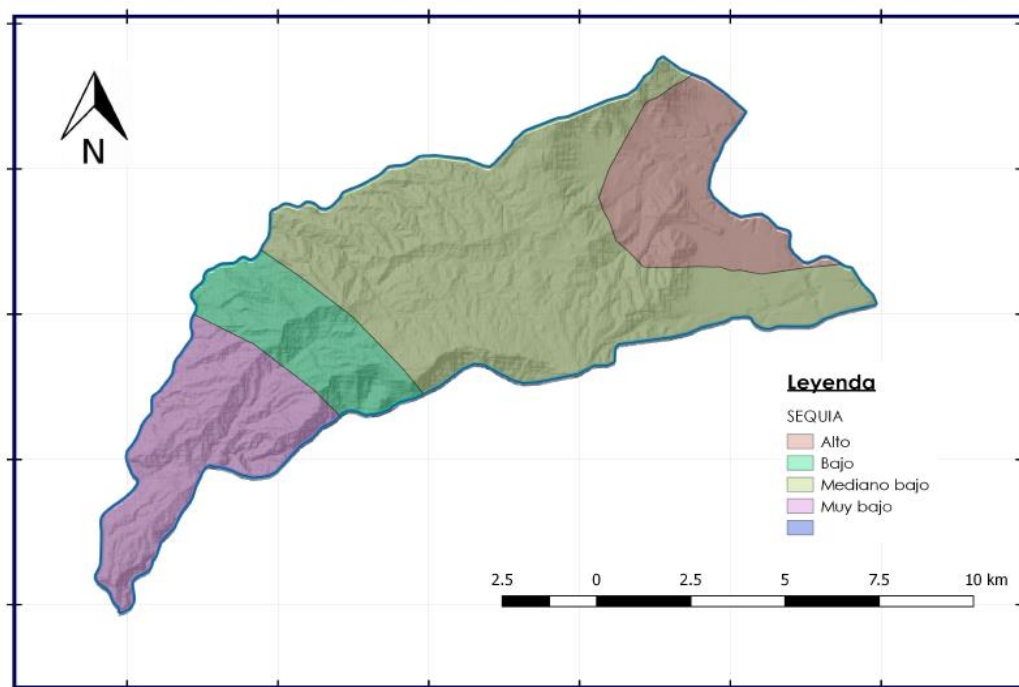
Se puede indicar que existe un registro de precipitación promedio anual de 821.5 milímetros, siendo los meses con mayor precipitación mayo, junio, julio, agosto y septiembre. Con una humedad relativa promedio mensual del 75 %. Y una evaporación promedio anual a la intemperie de 130.5 milímetros, con valores mínimos de 99.20 mm, en el mes de octubre y máximos 136.8 mm, en el mes de marzo, se pudo identificar que los datos de precipitación registrados por el INSIVUMEH en la Labor Ovalle para el mes de octubre del año 2002 a septiembre del 2003 fueron de 701.30 mm, con una temperatura promedio mensual de 15.29 °C.

Según los datos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) del año 1953 a 1987 con un

periodo de 34 años de registro, según los cuales el área se caracteriza por dos épocas bien marcadas: una época de lluvias que se presentan de mayo a octubre y otra seca de noviembre a abril, con un receso de las lluvias de una semana a quince días entre los meses de julio y agosto conocida como canícula. (Helvetas Guatemala, 2009, pp.16-17)

Figura 3.

Mapa de probabilidad de sequías San Juan Ostuncalco



Nota. Mapa de probabilidad de sequía del municipio de San Juan Ostuncalco. Adaptado de Instituto Geográfico Nacional (2006). *Mapas temáticos y Ortofotos de la República de Guatemala*. (<http://ide.segeplan.gob.gt/geoservicios.html>), consultado el 10 marzo de 2020. De dominio público.

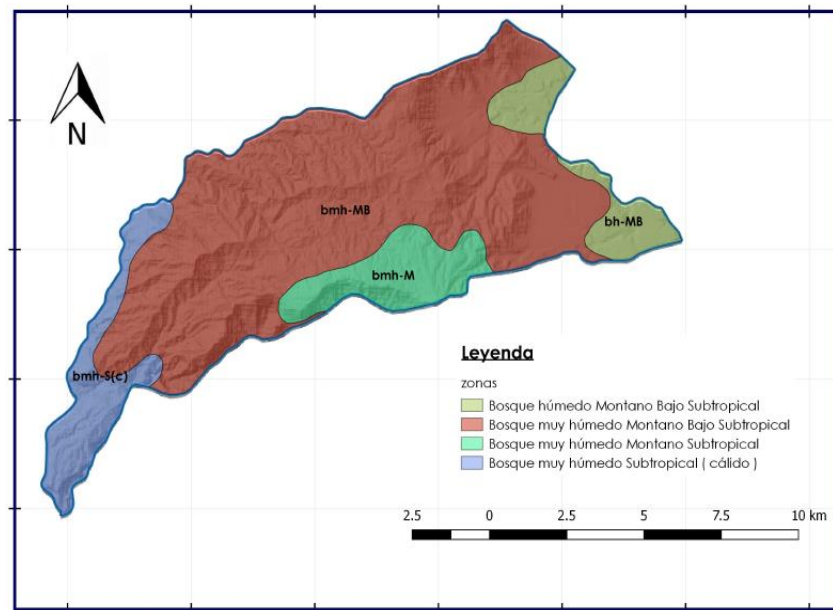
1.4. Vegetación

La zona alta de la cuenca del río Naranjo presenta características de la comunidad natural terrestre de Bosque de Montaña, de Cupressus y latifoliadas de origen neártico, formando parches dispersos, que han sufrido extracción de productos maderables, con poca presencia de epífitas de la familia Bromeliaceae, del género Tillandsia sp. (Gallitos) que se encuentran en la Lista Roja del CONAP, Categoría 1 consideradas como especies en peligro de extinción (CONAP, 1999).

La cuenca alta del río Samalá, posee características de la comunidad natural terrestre de Selva Subtropical Húmeda, de la Laguna de Chicabal de origen mesoamericana, formando parches dispersos, que han sufrido extracción de productos maderables y especiales como broza, con poca presencia de epífita de la familia Bromeliaceae, de la especie Tillandsia sp. (Gallitos) que se encuentran en la Lista Roja del CONAP, Categoría 1 consideradas como especies en peligro de extinción (CONAP, 1999).

Figura 4.

Mapa de zonas de vida



Nota. Mapa de zonas de vida del municipio de San Juan Ostuncalco. Adaptado de Instituto Geográfico Nacional (2006). *Mapas temáticos y Ortofotos de la República de Guatemala*. (<http://ide.segeplan.gob.gt/geoservicios.html>), consultado el 10 marzo de 2020. De dominio público.

1.4.1. Áreas protegidas

El parque regional municipal de San Juan Ostuncalco posee 4 bosques con un total de 40.71 Hectáreas estipuladas como áreas protegidas, desplazándose como se presenta a continuación:

Tabla 1.

Áreas protegidas de San Juan Ostuncalco

Nombre del Bosque	Área (Km ²)	Formación Vegetal
El Tizate	15	Estrato de Coníferas y Latifoliadas
Los Espinos Roble Grande	3	Estrato de Coníferas y Latifoliadas
El Mirasol	11	Estrato de Latifoliadas y coníferas
El Caracol	20	Estrato de Latifoliadas y coníferas

Nota. Tabla de áreas protegidas. Adaptado de Helvetas Guatemala (2009). *Parque Regional Municipal San Juan Ostuncalco Plan Maestro (2009 –2013)*. (<https://conap.gob.gt/wp-content/uploads/2019/10/PM-PRM-San-Juan-Ostuncalco.pdf>), consultado 10 de marzo de 2020. De dominio público.

1.5. Agua subterránea

El agua subterránea se encuentra presente en los espacios del suelo o roca, proveniente del agua superficial infiltrada bajo la acción de la gravedad, la acumulación del agua subterránea conforma los acuíferos.

1.5.1. Acuífero de Quetzaltenango

El estudio realizado por la Dirección General de Investigación por medio del Programa Universitario de Investigación en Recursos Naturales y Ambiente determinó los datos referentes al acuífero de Quetzaltenango, que comprende los municipios de Olinstepeque, Salcajá, Cantel, San Andrés Xecul, San Juan Ostuncalco, San Miguel Sigüila, Concepción Chiquirichapa, Cajóla, San Carlos Sija, Sibila y San Francisco La Unión, obteniendo los parámetros hidrogeológicos de transmisividad, conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento para este acuífero.

El acuífero comprende la zona alta de la cuenca hidrográfica del río Samalá, cuyos afluentes principales son los ríos: Los Tuises y Sigüila. Además, se incluye la subcuenca del Río Posutulté en Totonicapán al este de la cuenca. Es decir, el acuífero de Totonicapán constituye parte de la cuenca hidrogeológica, con un área total de 709.328 km² hasta Cantel.

El límite norte lo constituye un cuerpo intrusivo del Cretácico que forma una barrera negativa, destacando el Cerro Pache. Al este se presentan los cerros de Totonicapán que representan un levantamiento de rocas clásticas del Cretácico, mientras que al oeste se presenta el Cerro Tuicocalx que forma parte del complejo volcánico de Chicabal y Siete Orejas. Al sur el acuífero es encajonado por las faldas del volcán Santa María y Sierra Chuatroj e0n Cantel y Zunil. Las coordenadas geográficas son de 14.7593 a 15.0619 grados de latitud norte y 91.2965 a 91.6738 grados de longitud oeste. Las coordenadas planas en GTM son de 11632,362 m a 11665,666 m N y de 373,802 m a 414,256 m E. (Herrera, Manzo y Hernández, 2016, p. 58)

De acuerdo con Herrera, Manzo y Hernández (2016), el acuífero conocido como acuífero de Quetzaltenango, se encuentra conformado por un acuífero inferior y un acuífero superior, el acuífero superior posee los siguientes parámetros hidrogeológicos: Los espesores saturados son de 6 a 91 metros, La transmisividad hidráulica es media de 100 a 300 metros cuadrados por día, la permeabilidad se estima entre 0.93 a 2.8 metros por día estando clasificado como un acuífero regular a pobre, posee coeficientes de almacenamiento de 0.01 a 0.03. El acuífero superior está constituido por depósitos de piroclastos con

contenidos de sedimentos fluviales, los piroclastos están definidos como fragmentos solidificados de rocas ígneas, la clasificación según su tamaño puede ser cenizas y lapilli.

El acuífero inferior posee los siguientes parámetros hidrogeológicos: los espesores saturados van de 150 a 300 metros, la transmisividad hidráulica 150 a 1,200 metros cuadrados por día, la permeabilidad se estima entre 1 a 10 metros por día estando clasificado como un acuífero regular a bueno, posee coeficientes de almacenamiento de 0.02 (Herrera, Manzo y Hernández, 2016).

El acuífero inferior está constituido por ignimbritas, basaltos, andesitas, tobas soldadas y riolitas. Los basaltos son columnares, típicos de una estructura volcánica de caldera. En la parte norte del acuífero, las lavas se encuentran sobreyacidas por vulcanitas estratificadas, tobas, lahares y diatomitas, que son materiales de baja permeabilidad, que le confieren confinamiento al acuífero.

De acuerdo a Tacam (2011), en la subcuenca del río Sigüilá donde se asienta la ciudad de Quetzaltenango con un área de 120 Km², la extracción de agua subterránea del acuífero superior es de 18.08 millones de m³ por año. Mientras que la oferta anual del recurso hídrico subterráneo es de 23.55 millones de m³, lo que significa que no existe sobre-extracción en el sistema del acuífero libre y considerando una tasa de crecimiento local de 2.1 %, es muy probable que se alcance el punto de equilibrio entre la oferta y demanda en el año 2030.

Herrera y Orozco (2016), determinó que la extracción de agua subterránea en todo el valle de Quetzaltenango es de 45.6 millones de m³, sin considerar el área de Totonicapán. En todo el valle de la cuenca del río Samalá, el acuífero superior tiene un espesor medio de 50 m y una extensión de 316 Km², el volumen del acuífero es de 15.8 Km³.

La porosidad varía de 6 a 20 %, siendo la porosidad media de un 13 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a $2,054 \times 10^6 \text{ m}^3$. El coeficiente de almacenamiento en piroclastos es de 0.02 resultando que al hacer descender en 1 m el nivel del agua del acuífero, se dispondría de aproximadamente 41.1 millones de m^3 de agua.

El acuífero inferior tiene una extensión de 613 Km^2 , sin el área del acuífero, con un espesor medio de 225 m, entonces el volumen del acuífero es de 137.92 Km^3 . Si en este volumen la porosidad media por fracturación es de un 22 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a $30,342 \times 10^6 \text{ m}^3$. El coeficiente de almacenamiento en rocas fracturadas en promedio es de 1.73×10^{-3} , resultando que al hacer descender en 1 m el nivel del agua del acuífero, se dispondría de aproximadamente 52.5 millones de m^3 de agua.

La disponibilidad de agua conjunta de los dos acuíferos es de 93.6 millones de m^3 , comparándola con la extracción de 45.6 millones de m^3 , se tiene un balance positivo de 48 millones de m^3 , equivalente a un caudal de $1.52 \text{ m}^3/\text{s}$.

1.5.1.1. Unidades hidrogeológicas

El valle de Quetzaltenango es un relleno de una antigua caldera volcánica, donde el rasgo más prominente es el volcán Santa María al sur. Esta caldera fue rellenada por antiguos sedimentos y posteriormente por depósitos piroclásticos recientes. En el área existió levantamiento de sedimentos cretácicos al noreste. Al noroeste en el Mesozoico existieron intrusiones de granito como El Cerro Pache, que constituyen barreras negativas. Mientras que al sur los volcanes Siete Orejas y el volcán Santa María, en el Plioceno originaron coladas de lava de diferente composición.

Se presenta el mapa de unidades hidrogeológicas y los perfiles hidrogeológicos A – A' en la figura 11 y 12, donde se observa un basamento impermeable constituido por rocas intrusivas de granitos y rocas clásticas de areniscas, lutitas y conglomerados. Estas rocas son de la edad del Mesozoico. La unidad hidrogeológica con permeabilidad secundaria por fracturación comprende lavas andesíticas, basálticas, riolitas y tobas soldadas del Terciario, con espesores mayores de 200 metros, formando la zona saturada o acuífero inferior en un medio fisurado.

Este acuífero está delimitado en el centro por la falla de Olinstepeque y al sur por la de Zunil. Los piroclastos superiores son materiales volcánicos que comprenden depósitos en forma de abanicos lodosos fluviales o detritus lahario fluvial, que presentan permeabilidad primaria o un medio poroso con abundantes materiales finos de limo y arcilla. Mientras que las rocas piroclásticas inferiores son pómez masivas y sueltas, proveniente de avalanchas de ceniza, que se separan en pómez tipo ignimbrita de San Carlos Sija, Totonicapán y Quetzaltenango. Estos materiales varían entre porosidad primaria y secundaria por fracturas, por lo que se hace difícil diferenciarlas. Los espesores de esta unidad son de hasta 1,000 m.

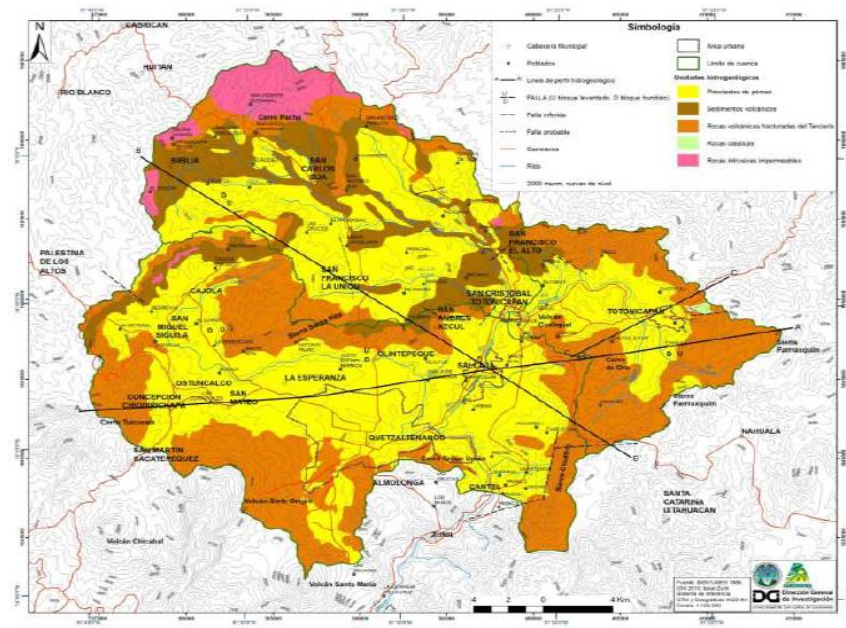
1.5.1.2. Niveles de aguas subterráneas

La profundidad de las aguas subterráneas bajo la superficie del terreno oscila entre 7 a 98 m para el acuífero superior y de 50 a 120 m para el acuífero inferior, de acuerdo al relieve del área. En el mapa de red de flujo, se observa que las isopiezas presentan valores desde 2,700 a 2,500 msnm en las partes altas y de 2,400 hasta 2,325 msnm en las partes bajas (Tacam, 2011).

“La dirección de flujo es variable, ya que está definida por los ríos secundarios de las subcuencas, aunque en general se observa que siguen el patrón general de norte a sur como la corriente superficial del río Samalá” (Herrera, Manzo y Hernández, 2016, p. 58).

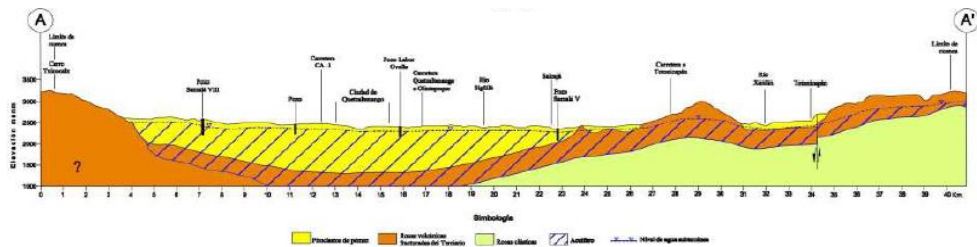
Figura 5.

Unidades hidrogeológicas del acuífero de Quetzaltenango



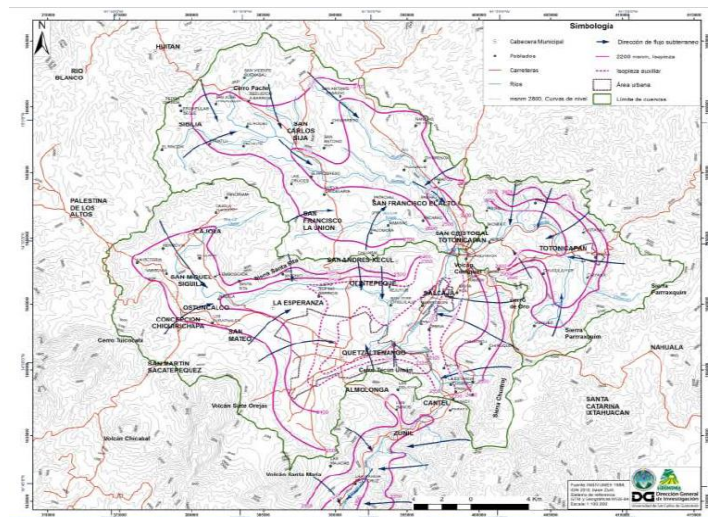
Nota. Unidades hidrogeológicas del acuífero de Quetzaltenango. Obtenido de I. Herrera, D. Manzo y E. Hernández, (2016). *Estudio Hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala*. (<https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puirna/INF-2016-05.pdf>), consultado 10 de marzo 2020. De dominio público.

Figura 6.
Perfil hidrogeológico del acuífero de Quetzaltenango



Nota. Perfil hidrogeológico. Obtenido de I. Herrera, D. Manzo y E. Hernández, (2016). Estudio Hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala. (<https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puirna/INF-2016-05.pdf>), consultado 10 de marzo 2020. De dominio público.

Figura 7.
Red de flujo de aguas subterráneas del acuífero de Quetzaltenango



Nota. Red de flujo de aguas subterráneas. Obtenido de I. Herrera, D. Manzo y E. Hernández, (2016). *Estudio Hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala*. (<https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puirna/INF-2016-05.pdf>), consultado 10 de marzo 2020. De dominio público.

1.6. Información geotécnica del terreno

El análisis geológico es primordial en la determinación de los elementos geotécnicos que deben evaluarse para la implementación de proyectos, partiendo de la geología regional, la geomorfología hasta identificar la geología local.

1.6.1. Geología regional

En la región geológica de Centroamérica y del Caribe se encuentra Guatemala, el norte de Centroamérica está dividido en los bloques Maya, Yucatán y Chorti. La división entre los bloques es la falla del Motagua, el bloque definido como Maya incluye las regiones de Guatemala en su parte norte, Belice, la península de Yucatán y parte de México, El bloque Chorti incluye las regiones de la parte sur de Guatemala, Honduras, El Salvador, el Norte de Nicaragua. Los bloques antes descritos poseen una estratigrafía correspondiente al precretácico.

Los bloques Maya y Chortí son especialmente importantes para la geología caribeña debido a su extensa estratigrafía del precretácico y sus basamentos metamórficos del prepaleozoico tardío. Estos terrenos basamentales son litológicamente diferentes en los dos bloques. Aunque existen paralelos estratigráficos para la serie sedimentaria sobre basamental, los sedimentos preterciarios de cada bloque no son directamente correlativos para comparar en edad los estratos de uno con el otro.

El margen norte del Bloque Chortí en Guatemala consiste en una cordillera de rocas metamórficas y plutónicas que se extienden justo desde el norte de la ciudad de Guatemala, hacia la costa norte de Honduras, en sentido E-NW. Las rocas volcánicas del Bloque Chortí pueden clasificarse como aquellas paralelas

a la costa del Pacífico y que son parte de la cadena volcánica centroamericana, y aquellas asociadas con fallas y grabens de tendencia N-S en el occidente de El Salvador y Sureste de Guatemala y la parte central de Honduras (Williams, et al., 1964).

El vulcanismo cuaternario a lo largo del Pacífico es de tipo calco-alkalino, mientras que algunas de las rocas volcánicas asociadas con el fallamiento normal pertenecen a un conjunto alcalino.

1.6.2. Sismología regional

El estudio de la sismicidad de una región se conoce como sismología regional, para el caso de Guatemala, por la ubicación geográfica del país es considerado altamente sísmico, situándose en el cinturón de fuego del pacífico.

1.6.2.1. Marco tectónico para Guatemala

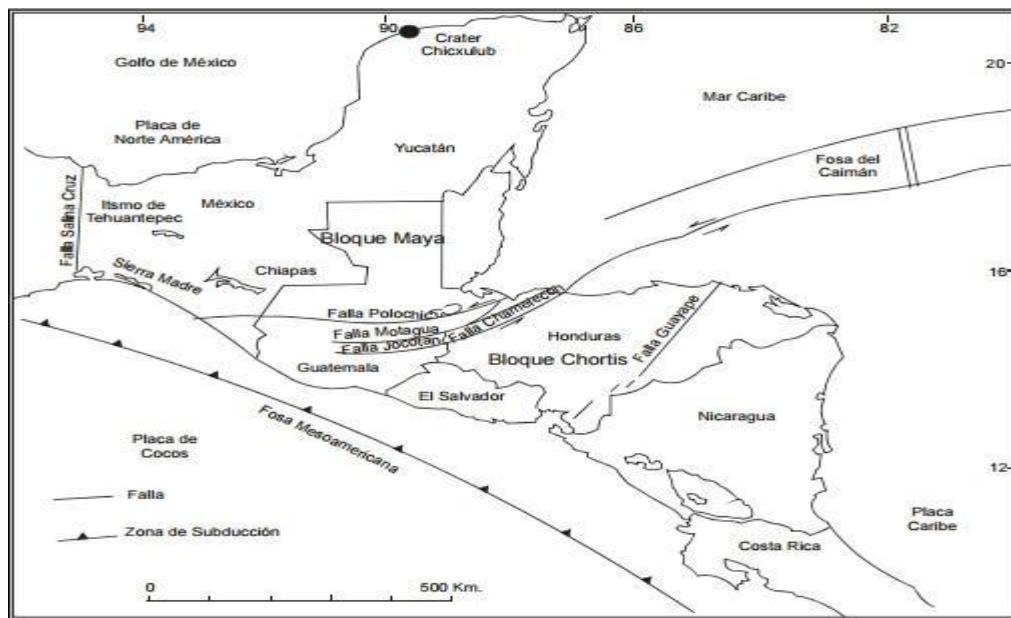
El territorio nacional está repartido en tres placas tectónicas: Norteamérica, Caribe y Cocos. Los movimientos relativos entre éstas determinan los principales rasgos topográficos del país y la distribución de los terremotos y volcanes. El contacto entre las placas de Norteamérica y Caribe es de tipo transversal. Su manifestación en la superficie son las fallas de Chixoy-Polochic y Motagua. El contacto entre las placas de Cocos y del Caribe es de tipo convergente, en el cual la Placa de Cocos se mete por debajo de la Placa del Caribe (fenómeno conocido como subducción). Este proceso da origen a una gran cantidad de temblores y formación de volcanes.

El contacto entre estas dos placas está aproximadamente a 50 km frente a las costas del Océano Pacífico. A su vez, estos dos procesos generan

deformaciones al interior de la Placa del Caribe, produciendo fallas secundarias como: Jalpatagua, Mixco, Santa Catarina Pinula.

Figura 8.

Geodinámico de Centroamérica



Nota. Geodinámico de Centroamérica. J. Álvarez, M. Berjar y J. Martínez (2006). *Caracterización sismotectónica del segmento Ilopango-San Vicente, Zona de Falla de El Salvador.* (https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-A-Contexto-geodinamico-regional-modificado-de-Meschede-y-Frisch-1998-Las_fig1_235724274), consultado el 10 marzo de 2020. De dominio público.

1.6.3. Geología local

La geología local interpreta los elementos geológicos con un mayor detalle, analizando los elementos geomorfológicos presentes en el área de estudio y la fisiografía definida, los elementos de la geología local determinan el tipo de análisis que debe realizarse.

1.6.3.1. Geomorfología

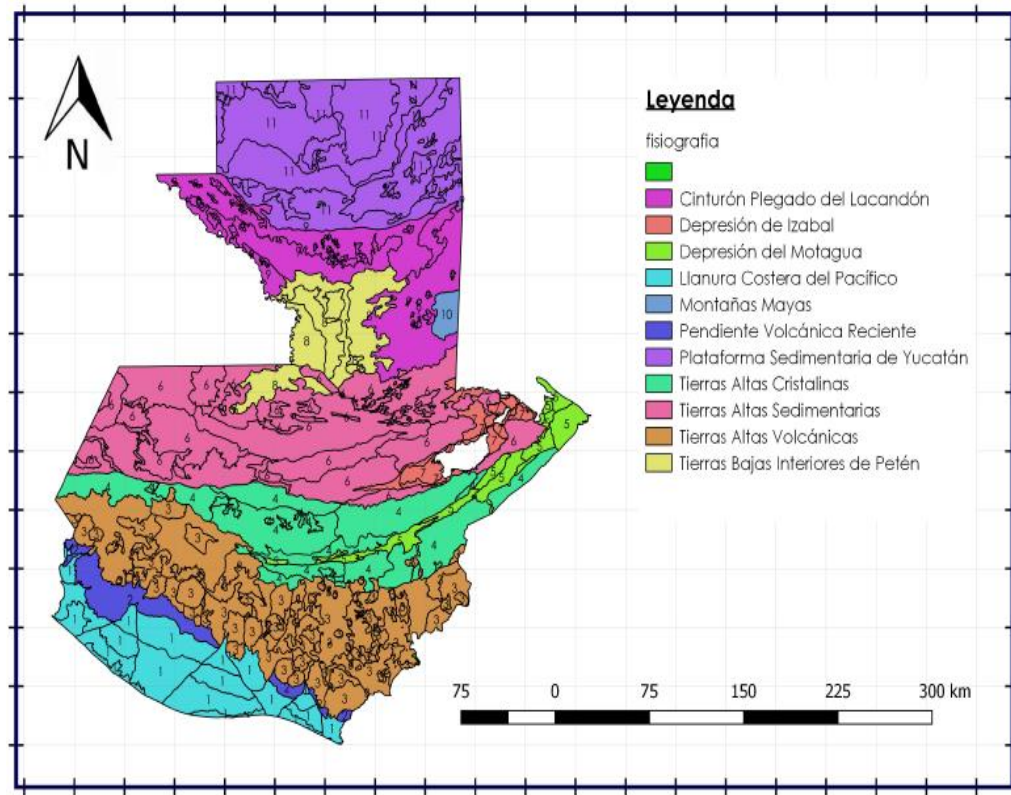
La geomorfología es una disciplina científica que tiene como objetivo la determinación clasificación, y explicación de las formas de la litosfera, y los procesos de cada una de estas formas, para Guatemala se encuentran ya definidas las regiones fisiográficas y la clasificación de las subregiones, realizada El Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), a través de la Unidad de Políticas e Información Estratégica (UPIE), con información del Instituto Geográfico Nacional, y el Estudio de Suelos a nivel de Reconocimiento de la República de Guatemala, y diversos estudios realizados por otras instituciones nacionales e internacionales.

1.6.3.2. Región fisiográfica

El municipio de San Juan Ostuncalco se encuentra en la región fisiográfica de tierras altas volcánicas. San Juan Ostuncalco se encuentra en la subregión 3.1 denominada zona montañosa occidental, Dentro de esta región también se encuentra el norte de Quetzaltenango, San Marcos, el este de Totonicapán, parte de Sololá y Chimaltenango. Las principales formaciones que se encuentran dentro de esta región son las rocas volcánicas, lavas, brechas, conglomerados, cenizas volcánicas, coladas de lavas, lapilli, andesitas, basaltos, materiales piroclásticos, y sedimentos aluviales. Las edades geológicas corresponden al plioceno, pleistoceno, holoceno, terciario superior, cuaternario tardío y cuaternario. (MAGA, 2001, p. 16)

Figura 9.

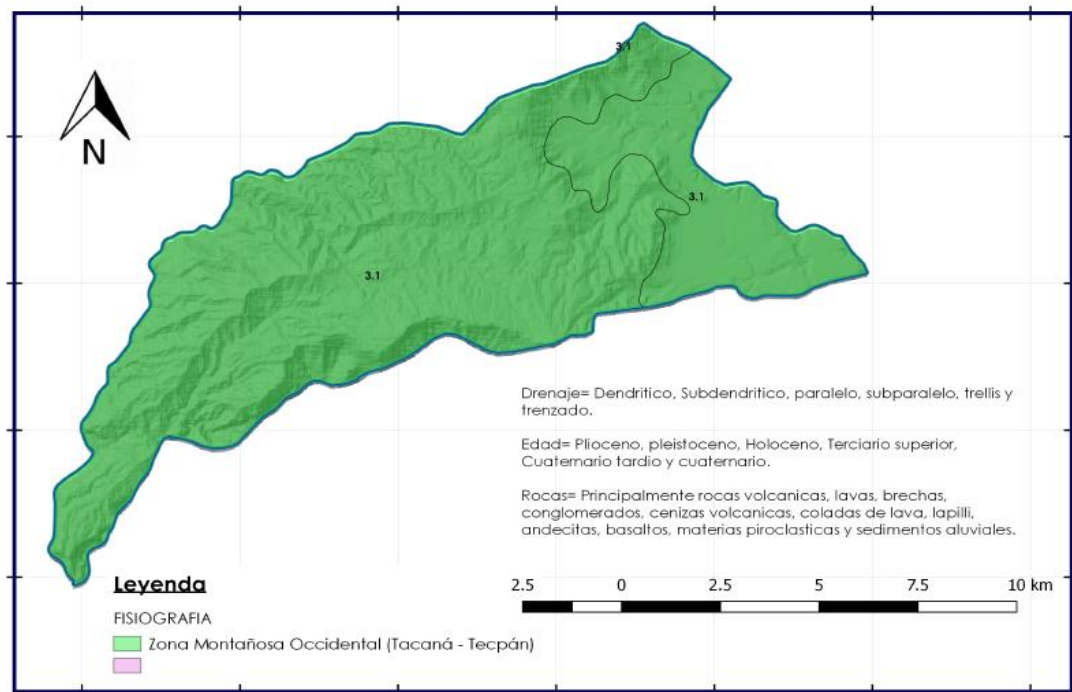
Mapa de fisiografía de Guatemala



Nota. Mapa de fisiografía de Guatemala. Adaptado de Instituto Geográfico Nacional (2006). *Mapas temáticos y Ortofotos de la República de Guatemala.* <http://ide.segeplan.gob.gt/geoservicios.html>), consultado el 10 de marzo de 2020. De dominio público.

Figura 10.

Subregión fisiográfica



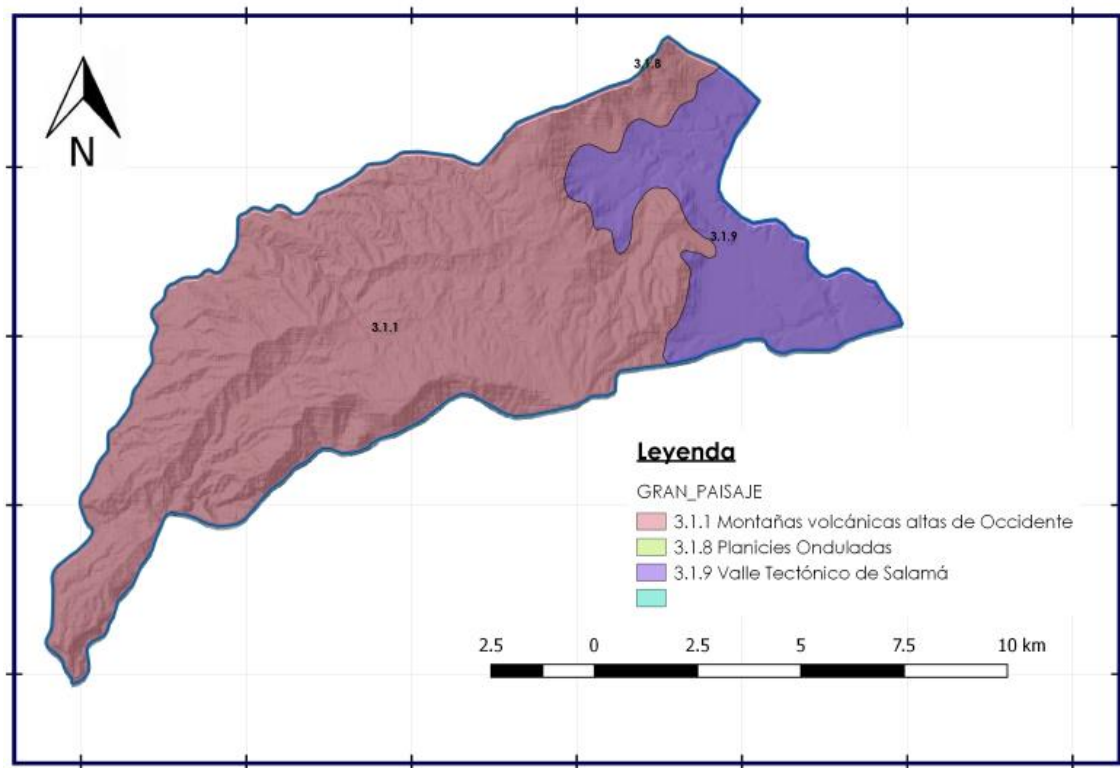
Nota. Mapa de subregión fisiográfica San Juan Ostuncalco. Adaptado de Instituto Geográfico Nacional (2006). *Mapas temáticos y Ortofotos de la República de Guatemala*. <http://ide.segeplan.gob.gt/geoservicios.html>), consultado el 10 de marzo de 2020. De dominio público.

Los elementos de gran paisaje contenidos en el municipio de San Juan Ostuncalco son:

- Montañas volcánicas altas de occidente
- Planicies Onduladas
- Valle tectónico de Salamá

Figura 11.

Mapa de Gran Paisaje



Nota. Mapa de Gran Paisaje, San Juan Ostuncalco. Adaptado de Instituto Geográfico Nacional (2006). *Mapas temáticos y Ortofotos de la República de Guatemala.* <http://ide.segeplan.gob.gt/geoservicios.html>), consultado el 10 de marzo de 2020. De dominio público.

1.6.3.3. Montañas volcánicas altas de occidente

Dentro de la clasificación establecida por el Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA), la región de montañas volcánicas altas de occidente, se encuentra en los departamentos de San Marcos, Quetzaltenango y Totonicapán, la morfografía está compuesta por pendientes mayores al 50 % que corresponde a formaciones de cerros y conos volcánicos, formados por coladas

de lava con alturas superiores a los 3,000 msnm, con formaciones de conos volcánicos que se extienden de Este a Oeste del país, el origen de estas unidades se debe a la actividad volcánica del periodo terciario superior (Mioceno-plioceno), el tipo de roca de estas unidades son principalmente de tipo andesítico-basáltico, basaltos, con cubierta de ceniza, lava y lapilli (MAGA, 2001).

1.6.3.4. Planicies onduladas

La unidad de planicies onduladas según la clasificación se extiende en dos áreas principalmente, la primera en la zona de San Marcos, San Lorenzo, y San Pedro Sacatepéquez, siendo esta área colindante al municipio de San Juan Ostuncalco, por lo que una parte mínima de esta unidad se encuentra en el municipio de San Juan Ostuncalco, la segunda zona se ubica en San Carlos Sija y sus alrededores, la morfografía está conformada por laderas de pendiente suave con elevaciones entre 2,300 a 2,500 msnm, el drenaje superficial tiene orientación hacia el sur y desemboca en los ríos Naranjo y Salamá, el tipo de roca es principalmente una secuencia de rocas piroclásticas de tipo ignimbrita con depósitos de pómez. Las formaciones son de edades del pleistoceno para las rocas de tipo ignimbrita y del Holoceno para los depósitos de pómez (MAGA, 2001).

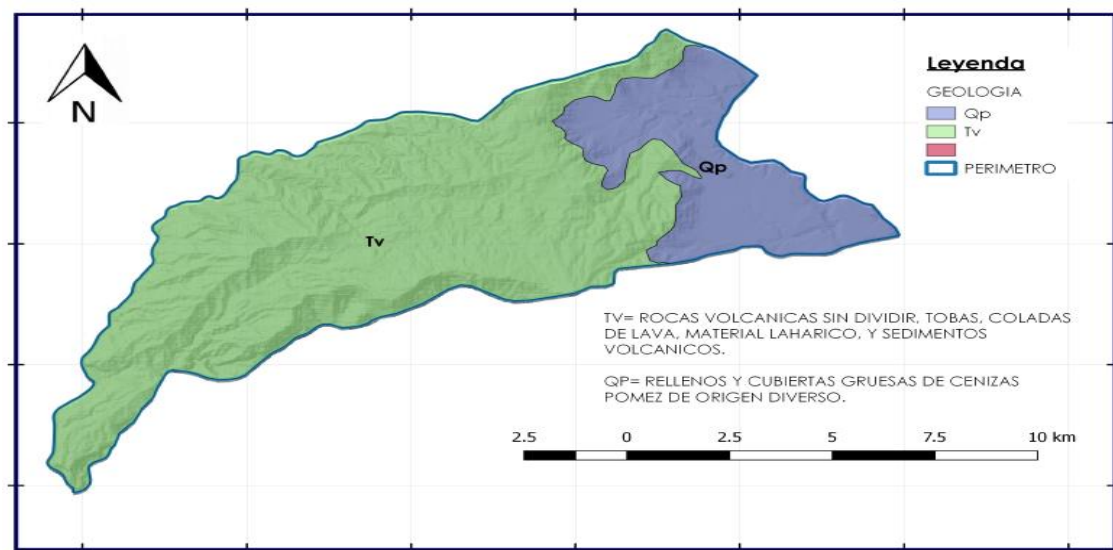
1.6.3.5. Valle Tectónico de Salamá

Según la descripción del Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (2001),

El valle tectónico de Salamá se encuentra en la zona desde San Juan Ostuncalco hasta Totonicapán, la morfografía se presenta con una topografía suave con pendientes menores al 6 %, esta unidad es

atravesada en la parte alta por el río Salamá, las formaciones son del periodo del Neógeno que duró hasta el pleistoceno temprano, las principales rocas que componen la unidad son de tipo ignimbritas, depósitos de pómez, y detritus lahárico fluvial en las cercanías del río Salamá. (MAGA, 2001). Existe un fallamiento gravitacional que ha dado origen a un horst en la parte plana y varios bloques levantados, donde sobresalen las fallas de Olinztepeque en el límite Norte y la de Zunil (que constituye el límite Sur). (p. 21)

Figura 12.
Clasificación geológica



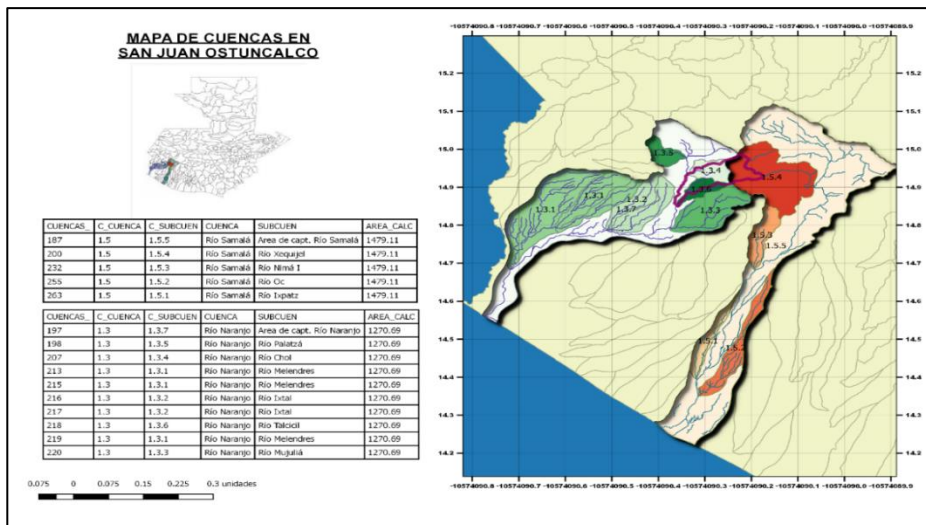
Nota. Mapa de clasificación geológica del municipio de San Juan Ostuncalco. Adaptado de Instituto Geográfico Nacional (2006). *Mapas temáticos y Ortofotos de la República de Guatemala*. <http://ide.segeplan.gob.gt/geoservicios.html>), consultado el 10 de marzo de 2020. De dominio público.

1.7. Hidrología

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. Según Aparicio (2010) las cuencas correspondientes a las corrientes de aportación de la corriente principal reciben el nombre de subcuencas. Para el Municipio de San Juan Ostuncalco los límites municipales, no tienen relación con los límites de las cuencas y subcuencas existentes en el territorio. El municipio de San Juan Ostuncalco se encuentra dentro de las cuencas del río Salamá y Naranjo, específicamente en las subcuencas del río Xequijel, río Chol, y río Talcicil.

Figura 13.

Ubicación de cuencas en San Juan Ostuncalco



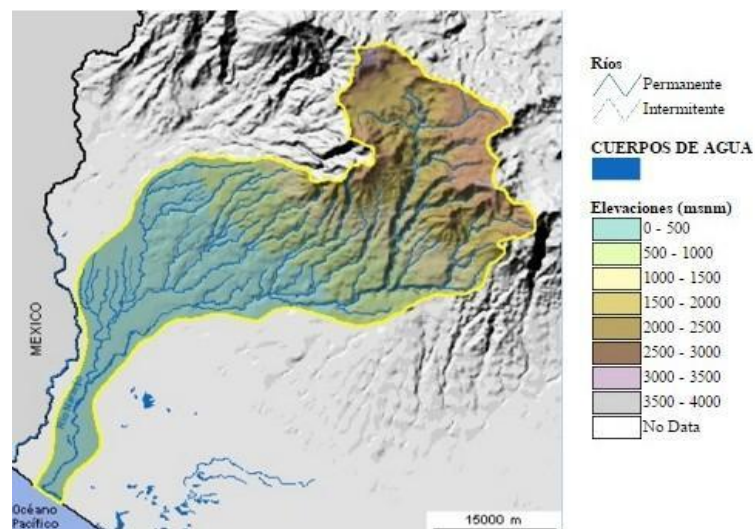
Nota. Mapa de ubicación de cuencas municipio de San Juan Ostuncalco. Adaptado de Instituto Geográfico Nacional (2006). *Mapas temáticos y Ortofotos de la República de Guatemala.* <http://ide.segeplan.gob.gt/geoservicios.html>), consultado el 10 de marzo de 2020. De dominio público.

- Cuenca del río Naranjo

El municipio de San Juan Ostuncalco, se encuentra en la zona alta de la cuenca del río Naranjo, con zonas entre 3000 y 2000 metros sobre el nivel del mar. La cuenca del Río Naranjo se encuentra en los meridianos 91°36'58" y 92°12'23" de longitud Oeste y los paralelos 14°29'49", y 15°01'17", el río naranjo, tiene una longitud desde su nacimiento según el criterio de Horton, al punto de su desembocadura de 103.75 kilómetros. A lo largo de su cauce recibe 16,630 corrientes. Área total: 1270.60 Km².

Figura 14.

Cuenca del río Naranjo



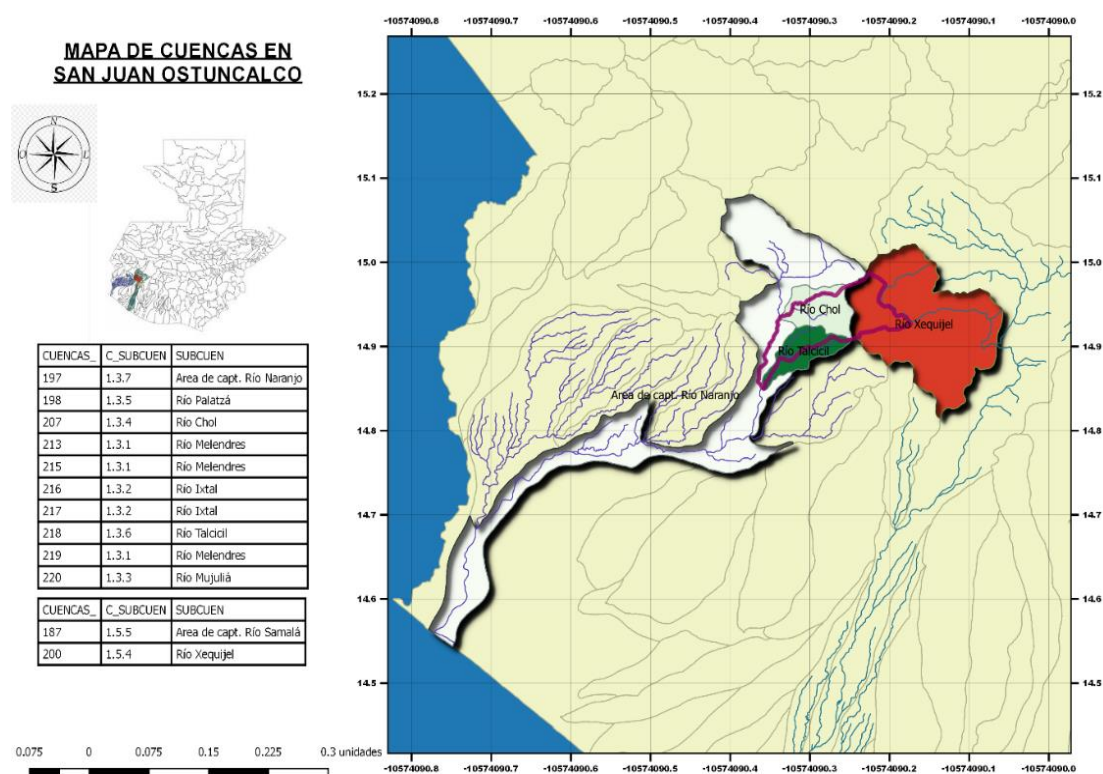
Nota. Mapa de ubicación de cuenca del río Naranjo. Adaptado de Unidad de Información Estratégica para la Investigación y Proyección UIE y el Larna (2022). *Mapa de cuencas, subcuencas y microcuencas.* (<https://sie.url.edu.gt/mapa-de-cuencas-pc/>), consultado el 10 de marzo de 2020. De dominio público.

- Subcuencas en el Municipio de San Juan Ostuncalco

Las subcuencas que tienen incidencia en el municipio de San Juan Ostuncalco son principalmente las del río Chol, río Xequijel y río Talcicil, en la figura 15 se indica la ubicación de estas subcuencas sobre el municipio.

Figura 15.

Subcuencas en el municipio de San Juan Ostuncalco



Nota. Mapa ubicación de subcuencas del municipio de San Juan Ostuncalco. Adaptado de Instituto Geográfico Nacional (2006). *Mapas temáticos y Ortofotos de la República de Guatemala*. <http://ide.segeplan.gob.gt/geoservicios.html>), consultado el 10 de marzo de 2020. De dominio público.

1.8. Estado actual de rellenos sanitarios en el área del sur occidente de Guatemala

Los 24 municipios del departamento de Quetzaltenango, cada uno de estos poseen su propia administración municipal, y tienen la responsabilidad de dar cumplimiento a normativa aplicable al manejo y tratamiento de los residuos sólidos producidos en su jurisdicción. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) es el encargado de inspeccionar el manejo en cada uno de los municipios estableciendo los parámetros para evitar el deterioro del ambiente natural.

En el mes de octubre del año 2016 la delegación de la región VI del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), encargada del departamento de Quetzaltenango, San Marcos, Totonicapán, Sololá, Retalhuleu, y Suchitepéquez, realizó un inventario sobre el estado del manejo de los residuos sólidos estableciendo que la mayoría de municipios de Quetzaltenango no cuenta con documentación ambiental para el manejo de residuos sólidos, o no cuentan con la infraestructura adecuada para la cantidad de residuos producidos en cada municipio, identificando en varios casos que las ubicaciones y procedimientos utilizados no son los apropiados.

Según información proporcionada por el MARN, debido al mal manejo la Procuraduría de los Derechos Humanos a nivel nacional, está gestionando sanciones para las comunas por no dar el tratamiento adecuado a los desechos, tomando como base legal los reglamentos municipales y la normativa del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

Los únicos municipios que cuentan con rellenos sanitarios controlados son el municipio de Cantel y Sibilia, estos para su implementación presentaron un

estudio ambiental completo en el que va incluido el estudio geotécnico específico del área propuesta para la construcción.

El monitoreo realizado por el MARN, da como resultado un seguimiento que enmarcan las principales características de los botaderos de los municipios con observaciones de los mismos, brindando un panorama del manejo de residuos sólidos en la región sur occidente.

1.9. Proyectos de ubicación de rellenos sanitarios actuales

La Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (2018), realizó un estudio de actualización de los diagnósticos existentes y factibilidad de tratamiento de desechos sólidos de manera mancomunada para la mancomunidad de municipios Metrópoli de los Altos, los municipios incluidos en el estudio fueron San Cristóbal Totonicapán, Salcajá, La Esperanza, Quetzaltenango, Sibilia, San Mateo y San Juan Ostuncalco, para este proceso se evaluó 5 aspectos principales, la factibilidad legal, factibilidad social, factibilidad técnica, factibilidad ambiental y económica.

Para este estudio se realizó una caracterización de residuos sólidos en cada uno de los municipios participantes, el análisis económico, investigaciones y trabajo de campo para la obtención de los resultados.

1.10. Adaptación al cambio climático y gestión de riesgos del municipio de San Juan Ostuncalco

USAID y The Nature Conservancy (2016) desarrollaron el estudio *Plan municipal de adaptación al cambio climático del municipio de San Juan Ostuncalco, Quetzaltenango* en el que se elaboró un plan para la adaptación al

cambio climático y la gestión del riesgo, generando resultados con visión de 20 años, se implementó para este proceso talleres participativos con autoridades locales, sociedad civil e instituciones públicas para la identificación de los impactos por el cambio climático y los objetos focales del estudio tomando en cuenta las áreas de riesgo.

De este estudio obtienen las principales problemáticas a nivel municipal y las ubicaciones de las zonas consideradas de riesgo por los participantes del estudio, el formato de los resultados es presentado en mapas elaborados en un *software* de sistemas de información geográfica, presentando un mapa de riesgo a inundaciones, mapa de riesgo de sequías, mapa de riesgo de deslaves, mapa de riesgo de heladas, cada uno de ellos priorizado según un riesgo bajo, medio o alto.

El objetivo principal de este estudio fue el enfoque de las inversiones para la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático, con el fin de disminuir la vulnerabilidad actual y futura del municipio, creando una herramienta para la evaluación de los avances para la creación de sistemas de adaptación al cambio climático y a los riesgos evaluados (USAID y The Nature Conservancy, 2016).

Tabla 2.

Objetos focales con sus efectos

Objeto focal	Efecto del cambio climático	Impacto sobre los efectos focales
Bosques de montaña	Deslave Deslizamientos	– Arrasamiento de árboles

Continuación de la tabla 2.

Objeto focal	Efecto del cambio climático	Impacto sobre los efectos focales
Nacimientos de agua	Inundación	Contaminación de nacimientos de agua
	Deslave	– Destrucción de nacimientos de agua
	Deslizamientos	
Cultivo de papa y granos básicos	Sequía	Disminución de la producción de papa y granos básicos, aumento de plagas en cultivo de papa y granos básicos
	Helada	Pérdida de hasta 100 % de las cosechas
	Inundación	Aumento de precio en cultivo de papa y granos básicos
	Deslave-Deslizamiento	Pérdida total de área de cultivo, destrucción de sistemas de riego
Sistemas de agua potable	Inundación	Daño en sistemas de bombeo
	Deslave-Deslizamiento	Destrucción de tuberías y tanques
Infraestructura vial	Inundación	Destrucción de puentes
	Deslave-Deslizamiento	Incomunicación (caminos, telefonía, emergencias)
Centros poblados	Inundación	Daño de viviendas y sistemas de drenaje
	Deslave-Deslizamiento	Pérdidas de viviendas, de vidas humanas y animales

Nota. Objetos focales y sus efectos por el cambio climático. Adaptado de USAID y The Nature Conservancy (2016). *Plan Municipal de Adaptación al Cambio Climático del municipio de San Juan Ostuncalco, Quetzaltenango*. (<https://docplayer.es/88655034-Guatemala-local-governance-nexos-locales-project.html>), consultado el 10 de marzo de 2020. De dominio público.

1.11. Rellenos sanitarios anteriores en San Juan Ostuncalco

La organización Care Guatemala inició en el año de 1997 a la implementación del proyecto U-SWEEP que consistió en un programa integral de

manejo de desechos sólidos, tomando como solución para la disposición final de la basura la realización de rellenos sanitarios en varias ciudades secundarias del país (Care Guatemala, 1998).

“En la región occidental, las ciudades en las que se inició el programa, fueron Quetzaltenango y San Juan Ostuncalco; En el Municipio de San Juan Ostuncalco, la producción actual de basura asciende a 9.42 toneladas diarias” (USAID, 2018, p. 13). Y representa uno de los mayores problemas del municipio, existiendo un incremento considerable en la cantidad de botaderos clandestinos.

Anteriormente a la implementación del proyecto U-sweep no existía ningún sistema de recolección por lo que se diseñó un sistema siguiendo el modelo de recolección de Quetzaltenango, se escogió a San Juan Ostuncalco para ser parte de este proyecto debido al interés del gobierno municipal y a la disponibilidad de tierras para construir el sistema además de ser una ciudad compatible con los requerimientos del proyecto; La ubicación y ejecución del relleno sanitario fue realizada por parte de la municipalidad, siendo esta la primera experiencia en este tipo de proyecto (Care Guatemala, 1998).

Sin embargo, debido al inadecuado manejo y control dentro del relleno sanitario, fue abandonado convirtiéndose en un botadero sin control siendo posteriormente abandonado, reubicando un nuevo botadero en la aldea de Monrovia del municipio.

1.12. Proyectos ubicados mediante el método analítico jerárquico y selección multicriterio

La selección multicriterio es utilizada en múltiples disciplinas este tipo de análisis puede apoyarse con el uso de sistemas de información geográfica para

establecer los criterios a evaluar debido a que pueden identificarse de forma gráfica los elementos del territorio y establecer los criterios más importantes del área de influencia.

Este tipo de análisis se ha realizado anteriormente en diferentes regiones, uno de los ejemplos de este tipo de aplicación es el del área metropolitana Alto Paraná realizado en la Universidad Nacional del Este Paraguay, en el que se realizó el análisis para la localización para un relleno sanitario mediante el uso del proceso multicriterio y sistemas de información geográfica, en los Distritos de Hernandarias, Ciudad del Este, Minga Guazú y Alto Paraná, estableciendo las características y criterios apropiados para el fin señalado, localizando las áreas probables para su instalación y representando los resultados mediante cartografía temática. (Giménez y Cardozo, 2012, p.2)

El resumen de la elaboración de este estudio es el siguiente:

Se realizó un análisis para determinar el requerimiento de superficie del terreno en relación a la población estimada y su eventual vida útil. Esto permitió elaborar un modelo cartográfico donde se expresan los datos de entrada, procedimientos espaciales aplicados en el SIG, con la utilización del *software* Arc View, y los valores asignados a cada criterio de exclusión, determinando así las áreas óptimas para relleno sanitarios, confeccionando mapas temáticos para mejor observación de las parcelas.

Todo esto permitió seleccionar las áreas que reúnen las características óptimas para la instalación de Relleno Sanitario. Luego del análisis multicriterio fueron seleccionadas 6 (seis) parcelas ubicadas en el Distrito de Minga Guazú, con superficies de; 16, 20, 21, 28 y dos de 17 hectáreas. En conclusión, se determinó los lugares óptimos para localizar rellenos sanitarios utilizando técnicas de SIG, así mismo fue posible la elaboración de los mapas temáticos del área de estudio y de las parcelas seleccionadas dentro del mismo. (Giménez y Cardozo, 2012, p. 3)

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Estudio geotécnico

El estudio geotécnico se conforma por una serie de actividades y procedimientos enfocadas a la investigación de los componentes del suelo, condiciones geológicas, hidrológicas, e hidrogeológicas que tienen como finalidad fijar parámetros y dar las recomendaciones necesarias para evitar fallas durante la construcción y vida útil de proyectos de ingeniería civil. Los estudios geotécnicos se realizan para conocer las condiciones del terreno y del sustrato, con el objetivo de anticipar problemas que pueden ocurrir durante la vida útil de las obras de Ingeniería. (AGIES, 2010, p. 4)

Para llevar a cabo un estudio geotécnico, se realiza una investigación preliminar de la ubicación y luego un estudio minucioso de las características del sitio, basándose en los resultados obtenidos en el reconocimiento o visita determinando los elementos presentes en el área de estudio. El objetivo es que las obras durante su vida útil tengan una probabilidad baja de ser afectadas de forma directa o indirecta por factores geológicos preexistentes.

Debe contar, además, con lo requerido en el capítulo específico para la elaboración de estudios geotécnicos de las Normas de Seguridad Estructural

para la República de Guatemala NSE 2.1, los estudios deben realizarse según la clasificación de obra establecida en la misma norma.

2.2. Tipos de estudios geotécnicos

Los estudios geotécnicos pueden realizarse en diferentes niveles según los requerimientos del proyecto a elaborar, estando definidos dentro de la normativa guatemalteca los reconocimientos preliminares, que son el proceso inicial para determinar el tipo de estudio geotécnico.

2.2.1. Reconocimiento preliminar o visita al sitio

Un reconocimiento preliminar es un acercamiento general de las características geotécnicas de una zona específica, que busca establecer de manera inicial la viabilidad del proyecto o proyectos a implementar. Por lo tanto, se deben presentar de una forma general los datos referentes a la composición geológica de la zona de análisis, haciendo énfasis en las amenazas geológicas presentes y los elementos geomorfológicos que puedan representar limitantes para la implementación de cualquier proyecto.

Los estudios preliminares no siempre son de carácter obligatorio, pero en muchos casos, dependiendo de la magnitud y el tipo de proyecto, es recomendable su realización siendo lo recomendado para obras menores, utilitarias y obras mayores en etapa de prefactibilidad, una de las ventajas de realizar un reconocimiento preliminar es que dependiendo de los resultados del mismo se establecerán los parámetros para la realización del estudio geotécnico definitivo.

2.2.2. Estudio geotécnico definitivo

Los estudios geotécnicos definitivos son realizados cuando se ha definido una ubicación específica, dando como resultado recomendaciones aplicables al diseño y construcción del proyecto a realizar, este tipo de estudio debe ser un análisis específico de las características técnicas del lugar.

Para su realización debe cumplirse con los parámetros mínimos establecidos en la normativa vigente a nivel nacional y local, los parámetros deben ser acorde al proyecto a ejecutar, estableciendo las posibles amenazas que puedan afectar la estabilidad del proyecto. El reconocimiento preliminar no sustituye en ningún caso al estudio geotécnico definitivo, sin embargo, los resultados del análisis inicial optimizan la ejecución del estudio geotécnico definitivo, definiendo los objetivos que este debe alcanzar; En la figura 16 se muestra el proceso de la realización de estudios geotécnicos en proyectos mayores.

Figura 16.

Proceso de análisis geotécnicos



Nota. Diagrama de proceso en los análisis geotécnicos. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word

Los elementos contenidos dentro del estudio geotécnico definitivo dependerán del proyecto a implementar, sin embargo, siempre estarán presentes elementos específicos de la composición mecánica del subsuelo y los elementos geológicos presentes en el sitio, deben evaluarse a su vez las condiciones sísmicas y las condiciones locales del sitio.

2.3. Clasificación de estudios geotécnicos según la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica

En todas las obras que sean apoyadas en el suelo es de necesario realizar la investigación para evitar problemas que puedan presentar las obras debido a las condiciones preexistentes, según AGIES (2010), las categorías de los estudios dependerán de la clasificación de la obra, magnitud del proyecto, y la aplicación que se le dará al estudio, siendo las categorías de estudios geotécnicos las siguientes:

Figura 17.

Categorías de estudios geotécnicos NSE 2.1-10

categorías de estudios geotécnicos NSE 2.1-10	1) Estudio de reconocimiento.
	2) Estudio geotécnico Tipo I, Edificaciones y obras menores. (Obras utilitarias).
	3) Estudio geotécnico Tipo II, Obras ordinarias.
	4) Estudio geotécnico Tipo III, Obras importantes, proyectos de gran envergadura o riesgo.
	5) Estudio geotécnico Tipo IV, para problemas específicos, obras esenciales.

Nota. Categorías de estudios geotécnicos. Adaptado de AGIES (2010). *Normas Estructurales de Diseño y Construcción Recomendadas para la República de Guatemala.* (<https://www.agies.org/wp-content/uploads/2019/02/agies-nse-2-10.pdf>). Consultado el 10 de marzo de 2020. De dominio público.

Los estudios correspondientes a las primeras tres categorías son los que conciernen a obras que pueden ser utilitarias; ordinarias (obras tipo II) o importantes (obras tipo III), incluyendo edificios de hasta 4 niveles, los cuales pueden estar sujetos a de amenazas naturales en niveles correspondientes de bajo a medio. (AGIES, 2010, p.4)

En la actualización de las Normas de Seguridad Estructural del año 2018, NSE 2.1 se realizó una nueva clasificación de los estudios geotécnicos, estableciendo mayores parámetros para mejorar la elaboración y evaluación de los mismos, en este caso los estudios de reconocimiento se sustituyen por la visita al sitio o reconocimiento preliminar que indican “es obligatorio realizar una visita al sitio en la que se verifiquen las condiciones superficiales generales del mismo y su entorno, para determinar el tipo de estudio a realizar” (AGIES, 2018, p. 4-1).

Los rellenos sanitarios no se encuentran especificados dentro de las clasificaciones de la Norma de Seguridad Estructural NSE 1, estableciéndose según la misma norma como obras ordinarias, debiendo realizar el estudio geotécnico especial tipo II como estudio geotécnico definitivo, sin embargo, debe tomarse en cuenta que si existen amenazas geológicas y/o geotécnicas el profesional responsable puede requerir la realización de un estudio Geotécnico especial tipo IV. (AGIES, 2018, p.4-2).

2.3.1. Estudio de reconocimiento

En este caso, se enfocó la investigación a los estudios de reconocimiento que según lo indicado por la NSE 2.1 engloban los elementos correspondientes al reconocimiento preliminar utilizados para anteproyectos en donde existen opciones alternativas del sitio para selección del emplazamiento de una obra. (AGIES, 2010).

Se presenta a continuación, un listado de los contenidos mínimos para un estudio de reconocimiento.

- Resumen
- Introducción
- Información general
 - Información sobre la obra
 - Descripción
 - Plano de localización
 - Colindancias
 - Sistemas constructivos y clasificación
 - Estudios anteriores
 - Fotografías del sitio
 - Información sobre el entorno
 - Clima
 - Vegetación
 - Relieve

- información de agua subterránea
- Información geotécnica del sitio
 - Planes de Exploración
 - Interpretación geotécnica del terreno
 - Recomendaciones geotécnicas
- Conclusiones y recomendaciones
- Bibliografía
- Anexos

2.3.2. Actividades recomendadas para estudios de reconocimiento AGIES NSE 2.1-10

Las actividades recomendadas por la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica incluyen actividades de gabinete y actividades de campo, que deben realizarse según la clasificación de estudio que se considere para cada caso en específico.

2.3.2.1. Actividades de gabinete

Las actividades de gabinete recomendadas incluyen una revisión de los estudios referidos al lugar, debiendo analizar la ubicación en un mapa topográfico y revisar el mapa de fracturas del terremoto de 1,976, también se indica hacer las revisiones de los siguientes elementos, mapas de amenazas (deslizamiento, inundaciones, amenaza sísmica y volcánica, licuefacción) de INSIVUMEH (Proyecto JICA), siendo los sitios de consulta, INSIVUMEH, Instituto Geográfico Nacional IGN. – CESEM - Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de

Guatemala, Laboratorio de SIG Ministerio de Agricultura, AGIES, SEGEPLAN, CONRED (AGIES, 2010).

Es importante también hacer la revisión de la normativa vigente aplicable para la implementación de rellenos sanitarios.

2.3.2.2. Actividades de campo

Las actividades de campo dependerán del tipo de estudio geotécnico definido según la clasificación de la obra y del reconocimiento preliminar, para la realización de ensayos de campo y toma de muestras existen los parámetros establecidos de cantidad y especificaciones que deben tomarse en cuenta en su realización.

2.4. Información geotécnica del sitio

La información geotécnica del sitio debe partir de un análisis de la geología regional y local, haciendo el análisis de los principales elementos geomorfológicos que puedan tener incidencia en el área de estudio, identificando la edad geológica de las formaciones.

2.4.1. Geología regional

La geología regional se encarga de la descripción y análisis de la composición geológica de una región específica, según la división territorial o por características determinadas de una zona o región, se describe por ejemplo un continente o un país; En este caso se toma en cuenta únicamente los aspectos a nivel general sin entrar en detalles de los elementos específicos del área.

2.4.2. Geología local

La geología local se refiere a la configuración geológica específica de un área, esta es más detallada que la geología regional, en este caso se toma en cuenta todos los elementos geológicos que tienen incidencia en la zona que sean relevantes para el estudio que se pretenda realizar, debiendo describirse cada uno de los elementos presentes.

2.4.3. Geomorfología

El estudio geomorfológico se refiere a la descripción y estudio de las formas del relieve terrestre y los factores internos y externos que generan y modifican dichas formas, es importante establecer todos aquellos aspectos que puedan incidir en la ubicación de proyectos, dentro de los aspectos geomorfológicos más importantes que se deben analizar están, las ubicaciones de cauces presentes y potenciales, fallas geológicas, formaciones geológicas de importancia y las unidades geomorfológicas adyacentes que tienen incidencia en la zona de estudio.

2.4.4. Estratigrafía

La estratigrafía es una rama de la geología que trata del estudio, análisis, identificación, y descripción de las rocas tomando en cuenta las características y disposición de los estratos presentes en el sitio de estudio, tomando en cuenta la secuencia en la que se ubican.

2.4.5. Información hidrológica e hidrogeológica

Dentro de la información hidrológica se deben incluir todos los datos correspondientes a las precipitaciones históricas, corrientes dentro del área de estudio e información sobre niveles freáticos.

2.4.6. Recopilación de datos de mecánica de suelos históricos

Los datos históricos de estudios realizados de mecánica de suelos son una referencia importante para verificar los componentes reales del suelo, debiendo establecer la correlación con el sitio de estudio, esto debido a la posible variabilidad de la composición de los puntos o áreas analizados. Siendo importante los antecedentes de eventos como remociones en masa, zonas de licuefacción, zonas con suelos expansivos entre otros.

2.5. Normativa aplicable a la implementación de rellenos sanitarios en la República de Guatemala

Las regulaciones y normativa guatemalteca aplicable al manejo de residuos sólidos se dividen en dos niveles, nacional y municipal.

Dentro de la legislación nacional, el manejo de residuos sólidos se menciona dentro del código municipal, el código de salud, y código civil. Dentro de los acuerdos gubernativos relacionados al manejo de residuos sólidos, se encuentran el del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales 281-2015 emitido el 15 de diciembre del 2015, en el que se aprueba una política nacional para la gestión integral de residuos y desechos sólidos, el acuerdo del Ministerio de Salud Pública y Asistencia social, 509-2001 con fecha 28 de diciembre del 2001

en el que se aprueba un reglamento para el manejo de desechos sólidos hospitalarios.

Por lo anterior, es el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales el encargado de regular el correcto manejo de los residuos sólidos, buscando evitar que los mismos dañen o afecten de manera directa o indirecta al ambiente, y el Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social el encargado de velar por el manejo para proteger la integridad de la salud humana. A nivel municipal la creación de reglamentos y acuerdos municipales son los que estimulan y regulan el manejo de los residuos sólidos dentro del municipio, siendo parte integral del ordenamiento del territorio.

2.5.1. Código municipal

Dentro de la normativa aplicable, es importante mencionar lo establecido en el Código Municipal (2002) emitido por el Congreso de la República de Guatemala, en el que se da autonomía de los municipios, siendo responsables de la planificación y ejecución de proyectos para el manejo de residuos y desechos sólidos:

Artículo 3. Autonomía. En ejercicio de la autonomía que la Constitución Política de la República garantiza al municipio, éste elige a sus autoridades y ejerce por medio de ellas, el gobierno y la administración de sus intereses, obtiene y dispone de sus recursos patrimoniales, atiende los servicios públicos locales, el ordenamiento territorial de su jurisdicción, su fortalecimiento económico y la emisión de sus ordenanzas y reglamentos. Para el cumplimiento de los fines que le son inherentes

coordinará sus políticas con las políticas generales del Estado y en su caso, con la política especial del ramo al que corresponda. Ninguna ley o disposición legal podrá contrariar, disminuir o tergiversar la autonomía municipal establecida en la Constitución Política de la República. (p. 2)

2.5.2. Plan de ordenamiento territorial

Para la ejecución de proyectos dentro la jurisdicción de los municipios debe velarse por el cumplimiento de los reglamentos y acuerdos a nivel local, los planes de ordenamiento territorial deben basarse en principios rectores que se basen en el bien común, estando establecido en el Código Municipal (2002) la reforma al código municipal el siguiente artículo:

Artículo 142. Formulación y ejecución de planes. Las Municipalidades están obligadas a formular y ejecutar planes de ordenamiento territorial y de desarrollo integral de sus municipios, y, por consiguiente, les corresponde la función de proyectar, realizar y reglamentar la planeación, proyección, ejecución y control urbanísticos, así como la preservación y mejoramiento del entorno y el ornato. (p. 21)

2.5.3. Código de Salud Decreto 90-97

De conformidad con el Código de Salud (1997) en su artículo 103:

Se prohíbe arrojar o acumular desechos sólidos de cualquier tipo en lugares no autorizados, alrededor de zonas habitadas y en lugares que

puedan producir daños a la salud de la población, al ornato o al paisaje, utilizar medios inadecuados para su transporte y almacenamiento o proceder a su utilización, tratamiento y disposición final, sin la autorización municipal correspondiente, la que deberá tener en cuenta el cumplimiento de las medidas sanitarias establecidas para evitar la contaminación del ambiente, específicamente de los derivados de la contaminación de los afluentes provenientes de los vertederos de basura legales o clandestinos.

(p. 23)

2.5.4. Reglamento de evaluación, control y seguimiento ambiental

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales en el Acuerdo Gubernativo número 137-2016, estableció el Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental, aplicable para la República de Guatemala estando estipulado en su artículo 5 lo siguiente:

Artículo 5. Creación del sistema de evaluación, control y seguimiento ambiental. Se crea el sistema de evaluación, control y seguimiento ambiental, en adelante el Sistema, como el conjunto de normas, procedimientos e instrumentos técnicos y operativos cuya organización permite el desarrollo de los procesos de evaluación, control y seguimiento ambiental de todo proyecto, obra, industria o actividad que por sus características, pueden producir deterioro a los recursos naturales,

renovables o no, al ambiente, o introducir modificaciones nocivas o notorias al paisaje y a los recursos culturales del patrimonio nacional. (Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental, 2016, p. 18).

La clasificación en el listado taxativo del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, para este tipo de proyecto, se sitúa en la división 38 fila 556, siendo la categoría diseño, construcción y operación de empresas relacionadas con actividades de tratamiento de desechos no peligrosos, estando clasificado este tipo de estudio como B2, de moderado a bajo impacto ambiental potencial.

Para proyectos nuevos debe realizarse para este tipo de categoría una evaluación ambiental inicial y un plan de gestión ambiental, esto según la normativa estipulada por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

2.6. Relleno sanitario

El relleno sanitario es un método de disposición final de desechos sólidos que tiene como principal propósito el minimizar los efectos nocivos provocados por un botadero a cielo abierto, consiste en la confinación de los desechos sólidos generalmente desechos de tipo residencial mediante métodos de compactación y creando capas de cobertura con un material seleccionado. Este tipo de sistema brinda una solución que requiere un mantenimiento y una infraestructura relativamente simple, sin embargo, la complejidad en las etapas de diseño, ejecución, mantenimiento y cierre, están directamente relacionados con las características del lugar donde se implemente, apoyado con lo descrito por Jaramillo (1993), el éxito de un relleno sanitario depende de la ubicación del sitio, diseño y en su óptima operación y control.

2.6.1. Elementos básicos de un relleno sanitario

El funcionamiento de todos los tipos de rellenos sanitarios es similar, existen elementos básicos con los que debe contarse para garantizar el buen funcionamiento durante los procesos de operación y cierre, siendo estos los siguientes:

- Material de cobertura
- Protección de taludes
- Drenaje para el control de lixiviados
- Elementos para el control de gases

2.6.2. Tipos de rellenos sanitarios

Los tipos de relleno sanitario según su forma de ejecución se pueden clasificar en los siguientes:

2.6.2.1. Rellenos manuales

Cuando la cantidad de residuos sólidos producidos es pequeña, pueden realizarse rellenos manuales, para su realización no se utiliza maquinaria, únicamente se compactan los residuos con cuadrillas de trabajadores.

2.6.2.2. Rellenos mecanizados

Cuando el volumen de residuos sólidos a tratar es muy grande, es necesario el uso de maquinaria para el movimiento y compactación de los desechos sólidos, la colocación del material de cobertura, y el mantenimiento de los terraplenes. Este tipo de relleno no requiere de cuadrillas de personal para la

compactación o mantenimiento, ya que se tiene disposición de la maquinaria en todo momento.

2.6.2.3. Rellenos semimecanizados

Se combina el uso de la maquinaria con cuadrillas de personal para la compactación y manejo de los residuos sólidos. Puede realizarse en casos en los que no se cuente completamente con la disposición de maquinaria o que pueda utilizarse la misma solo por intervalos de tiempo.

2.6.3. Métodos de construcción rellenos sanitarios

Generalmente el método de construcción de un relleno sanitario depende de varios factores, como la topografía, tipo de terreno, profundidad del nivel freático, y disponibilidad de material de cobertura, entre otros. Dentro de los métodos más utilizados para la construcción de rellenos sanitarios se mencionan los siguientes:

- Método de trinchera
- Método de área
- Método combinado

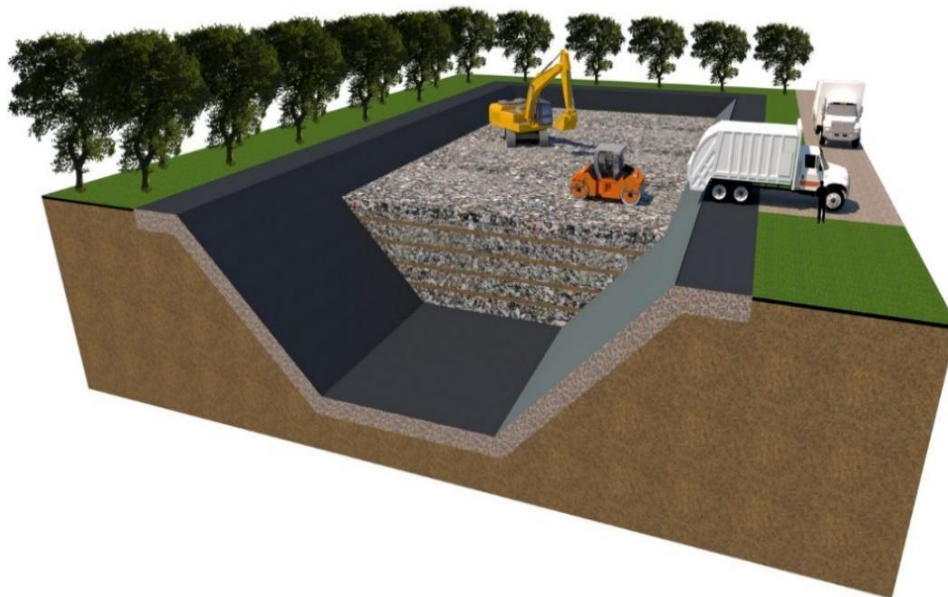
A continuación, se detallan los aspectos relevantes de los métodos constructivos de rellenos sanitarios antes mencionados, y de los elementos de un diseño básico con los que debe contar un relleno sanitario para su implementación representados en un diagrama básico.

2.6.3.1. Método de trinchera

Este método consiste en la excavación de trincheras o zanjas de dimensiones determinadas por el diseño y características del suelo, generalmente se realiza en regiones con topografías sin muchas pendientes y con terreno fácil de excavar. Los lugares que poseen niveles freáticos altos no son apropiados para este método. En terrenos planos deben tomarse medidas especiales para el control de las lluvias estableciendo los drenajes para evitar la contaminación de la escorrentía superficial.

Figura 18.

Diagrama método trinchera



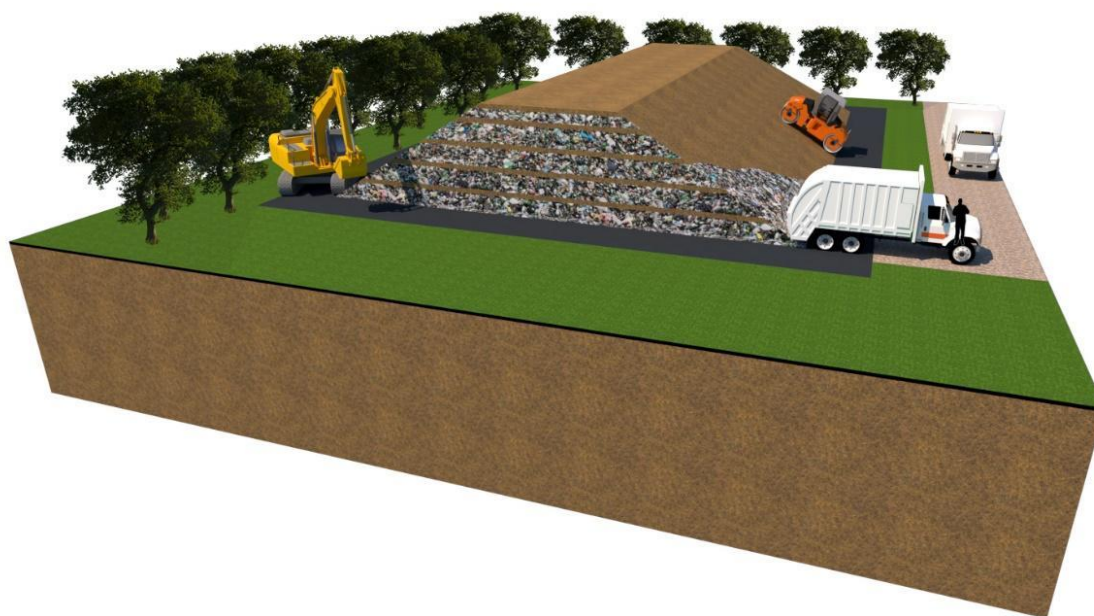
Nota. Relleno sanitario tipo trinchera. Elaboración propia, realizado con Sketchup software.

2.6.3.2. Método de área

En este caso por la constitución del terreno, es imposible la excavación de zanjas, entonces se realiza la impermeabilización del suelo en donde los residuos son depositados directamente. La metodología es la misma, deben compactarse los residuos, y cubrirse posteriormente con un suelo seleccionado generalmente extraído de otro lugar, y es posible elevar este tipo de relleno únicamente algunos metros verificando siempre la estabilidad, este método es útil para rellenar depresiones naturales.

Figura 19.

Diagrama método de área



Nota. Relleno sanitario método de área. Elaboración propia, realizado con Sketchup software.

2.6.3.3. Método combinado

Por la topografía del terreno en algunos casos se pueden aprovechar los beneficios de ambos métodos, cumpliendo en todo momento con la impermeabilización de toda la sección en donde se confinen los desechos, el material de recubrimiento dependerá de la disponibilidad en el sitio, debiendo controlar las pendientes de los taludes conformados.

Figura 20.

Diagrama método combinado



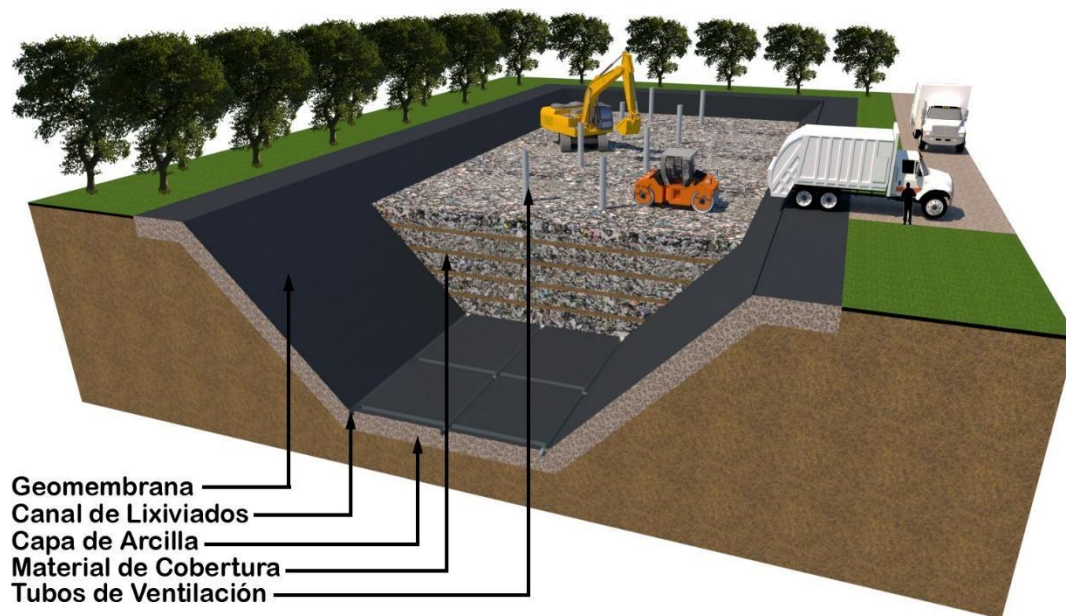
Nota. Relleno sanitario método combinado trinchera y área. Elaboración propia, realizado con Sketchup software.

2.6.4. Diagrama de un relleno sanitario

La conformación de un relleno sanitario se basa en la magnitud y el diseño del mismo, así como las características del área de emplazamiento, sin embargo, de forma general debe contar con los siguientes elementos:

Figura 21.

Diagrama básico de un relleno sanitario



Nota. Partes principales de un relleno Sanitario. Elaboración propia, realizado con Sketchup software.

2.7. Principales fallas en rellenos sanitarios

Dentro de los rellenos sanitarios se generan procesos importantes que deben controlarse para evitar las fallas, siendo estos los siguientes: la generación

de gases producto de la descomposición de los desechos, los asentamientos generados por la consolidación, el movimiento de líquidos y transporte de los mismo dentro y fuera del relleno sanitario, los procesos antes mencionados provocan las principales fallas de los rellenos sanitarios, a continuación, se presentan algunas posibles fallas.

2.7.1. Fallas en los sistemas de impermeabilización

Los sistemas de impermeabilización son uno de los elementos más importantes que deben considerarse dentro del diseño de los rellenos sanitarios, con un sistema deficiente, los lixiviados pueden causar daños irreparables a los acuíferos o corrientes subterráneas, teniendo un impacto ambiental significativo.

2.7.1.1. Uso de barrera de arcilla

Infiltración de lixiviados en la barrera de arcilla cuando este es el único elemento de separación entre los desechos y el suelo dando como resultado una posible contaminación de los mantos freáticos.

2.7.1.2. Uso de geomembrana

Alteración de la membrana de polietileno de alta densidad por la acción de químicos contenidos dentro del relleno sanitario o elementos físicos que dañan la misma dando como resultado la contaminación de los mantos freáticos.

2.7.2. Fallas en los sistemas de drenaje de lixiviados

Los lixiviados son uno de los problemas más frecuentes asociados a los rellenos sanitarios, la formación de los lixiviados se da al percolarse agua

proveniente de la lluvia dentro de los residuos sólidos, mezclándose y degradando la materia orgánica, los lixiviados al infiltrarse en el suelo puede llegar a ser un contaminante importante para el manto freático y el suelo.

2.7.3. Erosión en las capas que componen el relleno

Por la acción de la meteorización puede darse un proceso de erosión en los taludes y en las capas que componen al relleno sanitario, provocando de esta forma que puedan mezclarse los residuos sólidos con el material de cobertura no permitiendo el correcto funcionamiento del relleno. Se debe analizar por lo tanto el efecto de los agentes que puedan causar erosión durante la construcción y tiempo de vida del relleno.

2.7.4. Fallas de estabilidad en taludes

Un talud es una superficie inclinada respecto a la horizontal, cuando se trata de una superficie con una configuración natural se conoce como ladera, cuando la configuración se debe a una modificación confirmación o corte se conoce como talud, las fallas de estabilidad son referidas a la incapacidad del terreno de mantener su configuración inicial.

2.7.5. Hundimientos o asentamientos

En los rellenos sanitarios se producen también hundimientos o asentamientos, siendo estos de los problemas más comunes que se dan lo cual puede deberse a un mal diseño o una compactación deficiente de las capas del relleno, siendo en muchos casos asentamientos importantes que pueden poner en riesgo el correcto funcionamiento del relleno sanitario. Estos problemas

dependen de la configuración y altura del relleno, del tipo de desechos enterrados, del grado de compactación y de la precipitación pluvial en la zona.

2.8. Método de selección multicriterio

El análisis multicriterio permite identificar los criterios más importantes de un problema, las posibles soluciones, esto con el fin de ponderar dichas soluciones y a través de un análisis encontrar la mejor solución, para poder decidir entre diversas posibilidades. El objetivo del método multicriterio es el de mejorar el proceso de toma de decisiones, realizando comparaciones sencillas para identificar la mejor alternativa. Mediante el análisis multicriterio se permitirá por lo tanto dar una solución a un problema de una forma eficaz y a un bajo costo (Saaty, 1994).

2.8.1. Método analítico jerárquico

Dentro de los modelos de análisis multicriterio más utilizados y desarrollados se encuentra el método del Proceso Analítico Jerárquico. Este método es utilizado para muchas aplicaciones y en muchas ramas, y fue desarrollado por el matemático, Thomas L. Saaty, busca realizar una comparación por parejas para facilitar la toma de decisiones, basándose en la facilidad de comparar por pares para el ser humano, utilizando estimaciones de forma numérica, partiendo de otra escala como son los autovectores principales.

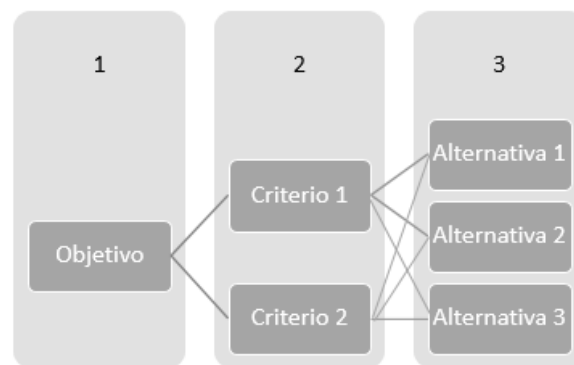
Para la realización del método analítico jerárquico es necesaria la creación de una estructura bien organizada de los criterios a evaluar, y establecer las alternativas para la resolución del problema. El método analítico Jerárquico se realiza por etapas, siendo la primera la construcción de una jerarquía básica, constituida por el objetivo que quiere alcanzarse y los criterios que se evaluarán,

pueden encontrarse subdivididos en niveles jerárquicos, teniendo relación entre los niveles presentados.

En una jerarquía que se construye para este tipo de análisis en el nivel más alto se encuentra el problema de decisión que constituye el objetivo que se quiere alcanzar. En los niveles inmediatos inferiores se localizan los elementos que afectan a la decisión, estos deben ser analizados de forma independiente antes de la construcción de la estructura, siendo los niveles intermedios los criterios, y en el nivel más bajo se representan las alternativas a seleccionar, esta construcción es la parte más laboriosa del proceso analítico jerárquico debiendo establecer un consenso entre todos los decisores consultados en el proceso. Este tipo de proceso es funcional en el caso de análisis de proyectos complejos que requieren un enfoque multidisciplinario (Saaty, 1994).

Figura 22.

Proceso Analítico Jerárquico primera etapa



Nota. Diagrama del proceso analítico jerárquico. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Una vez construida la estructura de la jerarquía del problema se inicia la segunda etapa del procedimiento que consiste en la valoración de cada uno de los elementos. Los decisores deben emitir sus preferencias o juicios de valor, esto para todas las jerarquías establecidas en la estructura, tomando en cuenta las investigaciones previas realizadas sobre el problema tratado. El proceso consiste en una comparación de valores establecidos de manera subjetiva por parejas, debido a la facilidad de la evaluación por pares, estableciendo un valor de preferencia entre dos criterios, estas comparaciones se basan tanto en los factores cuantitativos y cualitativos establecidos por los decisores y las investigaciones previas.

Esta evaluación puede realizarse por medio de una escala de medidas de importancia de los criterios, la propuesta por Saaty se basa en una escala en el rango 1 a 9 y consiste en la comparación de dos elementos que cuando son igualmente preferidos o importantes, el decisor le asigna al par de elementos un 1, si es moderadamente preferido un elemento se representa por 3, si el elemento es fuertemente preferido por 5 y extremadamente preferido por 9. Los números pares se utilizan para expresar situaciones intermedias de la preferencia de los criterios (Saaty, 1994).

El objetivo de esta etapa es definir un valor de prioridad de cada elemento, tal como la define Saaty (1994) las prioridades son rangos numéricos medidos en una escala de razón. Una escala de razón es un conjunto de números positivos cuyas relaciones se mantienen igual si se multiplican todos los números por un número arbitrario positivo. El objeto de la evaluación es emitir juicios concernientes a la importancia relativa de los elementos de la jerarquía para crear escalas de prioridad de influencia.

Tabla 3.*Escalas de prioridad de influencia*

Criterio	Pares	Criterio más importante	Clasificación
C1	C1-C2	C1	1-9
C2	C2-C3	C3	1-9
C3	C3-C1	C3	1-9

Nota. Diagrama del proceso analítico jerárquico. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

El resultado de las comparaciones es una matriz cuadrada, recíproca y positiva, denominada Matriz de comparaciones pareadas, en este tipo de comparación cada uno de sus componentes refleja la intensidad de preferencia de un elemento frente a otro respecto al problema u objetivo a resolver (Saaty, 1994).

En la tabla 4 se ejemplifica una matriz de comparaciones pareadas, el tamaño de la tabla dependerá de la cantidad de criterios a evaluar. En este nivel ya deben tenerse definidos los criterios específicos que van a compararse para poder determinar la preferencia de un criterio sobre otro.

Tabla 4.*Matriz de comparaciones pareadas*

	C1	C2	C3
C1	C1/C1		
C2		C2/C2	
C3			C3/C3

Nota. Diagrama del Proceso Analítico Jerárquico. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Luego de la valoración de los criterios, se debe formar un vector principal, para lograr esto es necesario generar una matriz auxiliar, para la conformación de esta matriz se debe realizar un cálculo para cada celda con el resultado de la división de cada valor asignado por la sumatoria de la columna correspondiente. Finalmente, se promedian los valores normalizados de las filas. Este promedio corresponde al vector principal, que corresponde al valor de cada uno de los criterios (Saaty, 1994).

El valor obtenido de cada criterio se debe de normalizar, sumando todos los valores de cada columna de la matriz de comparaciones pareadas, se obtiene el inverso de cada columna y se multiplica por cada elemento de la matriz y la resultante se denomina matriz de comparaciones normalizada, la matriz resultante es el valor ponderado de cada criterio (Saaty, 1994).

La matriz obtenida debe evaluarse para poder verificar la razón de consistencia, para verificar que la valoración de los criterios no se encuentre sesgados o inclinados por una opción, esto se hace aplicando las fórmulas ya establecidas para la verificación de consistencia, al ser verificada la consistencia se procede a realizar la evaluación de las alternativas respecto a cada uno de los criterios analizados.

Se realiza la evaluación de alternativas creando matrices pareadas respecto a cada uno de los criterios comparando en parejas cada una de las alternativas propuestas, esto para obtener el valor ponderado de cada alternativa, y así tener una valoración de criterio y alternativas para establecer la preferencia de una de las alternativas tomando en cuenta los criterios.

2.9. Sistemas de información geográfica aplicados a ubicación de rellenos sanitarios

Un sistema de información geográfica o SIG, es una herramienta que permite crear, procesar, analizar, información geográfica característica de un territorio en específico. Los SIG son sistemas informáticos creados para resolver problemas en los que se buscan visualizar múltiples elementos geográficos y poblacionales. La visualización y representación de un sistema de información geográfica, es similar al uso de mapas sobrepuestos para un análisis integral.

Durante un proceso de selección de sitios para proyectos, muchos de los elementos que se requiere evaluar pueden representarse de forma espacial, lo cual se facilita con la utilización de sistemas de información geográfica, representando una mejora en la ejecución de los estudios necesario y abaratando el proceso de selección, sin embargo, el resultado de del estudio dependerá siempre de la calidad de los datos que se ingresen y de las metodologías de análisis. De forma general los sistemas de información geográfica funcionan como una herramienta, que facilita los procesos de decisión para selección de sitios mejorando la visualización de todos los elementos y permitiendo ponderar los factores críticos para la selección y georeferenciando los mismos.

3. MARCO METODOLÓGICO

Dentro de los alcances de esta investigación, se estableció el determinar por medio del método analítico jerárquico, la alternativa de ubicación que cumple con los criterios seleccionados para la implementación de un relleno sanitario en el municipio de San Juan Ostuncalco, la aplicación del método analítico jerárquico en este caso requirió el análisis y levantamiento de mapas georreferenciados, para evaluar los criterios y establecer las posibles alternativas de ubicación, a partir de la selección de la alternativa que cumplió con un valor porcentual mayor con los criterios, se realizó un reconocimiento preliminar estableciendo el tipo de estudio geotécnico definitivo a realizar, por medio de ensayos de campo y de laboratorio, se indicaron, los elementos con mayor incidencia para la implementación de un relleno sanitario en el sitio seleccionado, brindando una base para la elaboración del estudio geotécnico definitivo. Se indicaron los resultados de la aplicación del método multicriterio, y los resultados cuantitativos de las propiedades evaluadas en el estudio geotécnico, del área seleccionada, con el fin de comprobar la hipótesis planteada.

3.1. Metodología para el levantamiento de mapas para la selección de ubicación

Esta fase consistió en la realización de mapas georreferenciados utilizando de base las ortofotos oficiales del Instituto Geográfico Nacional, utilizando los datos obtenidos de las investigaciones previas realizadas en el Municipio de San Juan Ostuncalco y la información proporcionada por el Instituto Geográfico Nacional, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, la información disponible de la Coordinadora Nacional para la Reducción de

Desastres y los mapas básicos y de amenaza de la Agencia de Cooperación internacional del Japón. La información fue digitalizada y presentada en el *software* QGIS.

3.1.1. Levantamiento áreas protegidas

El 5 de marzo del 2007, mediante resolución número 072/2007, la Secretaria Ejecutiva del Consejo Nacional de Áreas Protegidas declaró como parque regional municipal de los bosques (El tizate, Los Espinos-Roble Grande, El Mirasol y El Caracol), ubicada en San Juan Ostuncalco departamento de Quetzaltenango, realizándose la inscripción correspondiente a folio 35 y 36 del libro de registro de legalización de áreas protegidas privadas, municipales y áreas ya declaradas número 38601.

Las coordenadas de cada una de estas áreas protegidas son determinadas por el Departamento de Áreas Protegidas y Medio Ambiente estando contenidas en el Plan Maestro 2009-2013 del Parque Regional de San Juan Ostuncalco, las coordenadas se encuentran establecidas en coordenadas de tipo geográfico, para el presente estudio las mismas son requeridas en coordenadas UTM.

Tabla 5.

Áreas protegidas coordenadas UTM, Bosque el Tizate

Bosque El Tizate				
Geográficas			UTM	
No	Longitud	Latitud	X	Y
1	-91.694	14.8925	640485.283	1646847.62
2	-91.6948	14.8929	640398.956	1646891.37
3	-91.6946	14.8946	640419.371	1647079.56

Continuación de la tabla 5.

Bosque El Tizate				
Geográficas			UTM	
No	Longitud	Latitud	X	Y
4	-91.6932	14.8925	640571.351	1646848.12
5	-91.6932	14.8922	640571.546	1646814.94
6	-91.693	14.8917	640593.387	1646759.75
7	-91.6927	14.8917	640625.663	1646759.94
8	-91.6935	14.8909	640540.113	1646670.93
9	-91.6935	14.891	640540.048	1646681.99
10	-91.694	14.8925	640485.283	1646847.62

Nota. Tabla de áreas protegidas, bosque el Tizate. Adaptado de Helvetas Guatemala (2009). *Parque Regional Municipal San Juan Ostuncalco Plan Maestro (2009 –2013)*. (<https://conap.gob.gt/wp-content/uploads/2019/10/PM-PRM-San-Juan-Ostuncalco.pdf>), consultado 10 de marzo de 2020. De dominio público.

Tabla 6.

Áreas protegidas coordinadas UTM, Bosque Espino Roble Grande

Bosque Espino Roble Grande				
Geográficas			UTM	
No	Longitud	Latitud	X	Y
1	-91.637	14.8643	646636.773	1643764.55
2	-91.637	14.8641	646636.908	1643742.43
3	-91.6353	14.864	646819.899	1643732.48
4	-91.6355	14.8635	646798.716	1643677.03
5	-91.637	14.8624	646638.056	1643554.35
6	-91.6402	14.8617	646294.1995	1643474.81
7	-91.6396	14.8623	646358.357	1643541.59

Continuación de la tabla 6.

Bosque Espino Roble Grande				
Geográficas			UTM	
No	Longitud	Latitud	X	Y
8	-91.637	14.8643	646636.773	1643764.55

Nota. Tabla de áreas protegidas, bosque Espino Roble Grande. Helvetas Guatemala (2009). *Parque Regional Municipal San Juan Ostuncalco Plan Maestro (2009 –2013)*. (<https://conap.gob.gt/wp-content/uploads/2019/10/PM-PRM-San-Juan-Ostuncalco.pdf>), consultado 10 de marzo de 2020. De dominio público.

Tabla 7.

Áreas protegidas de coordenadas UTM, Bosque Mirasol

Bosque Mirasol				
Geográficas			UTM	
No	Longitud	Latitud	X	Y
1	-91.6685	14.9099	643217.218	1648788.81
2	-91.6692	14.9115	643140.855	1648965.36
3	-91.6691	14.913	643150.621	1649131.37
4	-91.6691	14.9132	643150.488	1649153.5
5	-91.6686	14.9138	643203.879	1649220.2
6	-91.668	14.9137	643268.491	1649209.52
7	-91.6676	14.9122	643312.515	1649043.83
8	-91.6669	14.9109	643388.68	1648900.47
9	-91.667	14.9104	643378.253	1648845.09
10	-91.668	14.9104	643270.676	1648844.44
11	-91.6685	14.9099	643217.218	1648788.81

Nota. Tabla de áreas protegidas, bosque Mirasol. Adaptado de H Helvetas Guatemala (2009). *Parque Regional Municipal San Juan Ostuncalco Plan Maestro (2009 –2013)*. (<https://conap.gob.gt/wp-content/uploads/2019/10/PM-PRM-San-Juan-Ostuncalco.pdf>), consultado 10 de marzo de 2020. De dominio público.

Tabla 8.*Áreas protegidas de coordenadas UTM, Bosque Caracol*

Bosque Caracol				
Geográficas			UTM	
No	Longitud	Latitud	X	Y
1	-91.6527	14.8823	644935.411	1645745.64
2	-91.6518	14.8816	645032.712	1645668.78
3	-91.6527	14.8795	644937.282	1645435.88
4	-91.6535	14.8795	644851.208	1645435.36
5	-91.6537	14.8784	644830.423	1645313.53
6	-91.6549	14.878	644701.577	1645268.5
7	-91.6565	14.8787	644528.96	1645344.91
8	-91.6563	14.8766	644551.878	1645112.71
9	-91.6574	14.8745	644434.922	1644879.68
10	-91.6586	14.8741	644306.073	1644834.65
11	-91.6583	14.8752	644337.62	1644956.54
12	-91.6592	14.8777	644239.123	1645232.53
13	-91.6596	14.878	644195.885	1645265.46
14	-91.6605	14.8781	644098.985	1645275.94
15	-91.6594	14.8794	644216.474	1645420.47
16	-91.6605	14.8805	644097.39	1645541.45
17	-91.6613	14.8816	644010.586	1645662.63
18	-91.6588	14.8806	644280.231	1645553.61
19	-91.6587	14.8803	644291.19	1645520.49
20	-91.6569	14.8798	644485.19	1645466.34

Nota. Tabla de áreas protegidas, bosque Caracol. Adaptado de Helvetas Guatemala (2009). *Parque Regional Municipal San Juan Ostuncalco Plan Maestro (2009 –2013)*. (<https://conap.gob.gt/wp-content/uploads/2019/10/PM-PRM-San-Juan-Ostuncalco.pdf>), consultado 10 de marzo de 2020. De dominio público.

Los polígonos de los bosques establecidos como áreas protegidas se presentan sobre el mapa de San Juan Ostuncalco que contiene las Ortofotos del año 2006 del Instituto Geográfico Nacional.

3.1.2. Levantamiento de zonas de riesgo a inundación y deslizamientos

Para establecer las zonas de amenaza por inundación o deslizamiento se tomaron dos parámetros importantes, el mapa de amenaza por deslizamientos municipales presentado por la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED), para la obtención de este mapa se utilizó la metodología Mora-Vahrson para evaluar la amenaza por deslizamiento a detalle de 1 kilómetro, se utiliza una combinación de información sobre litología, la humedad del suelo, pendiente y pronóstico de precipitación acumulada que CATHALAC, genera diariamente con el uso del modelo mesoscale PSU/NCAR. Y el estudio elaborado en 2016 por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), en conjunto con The Nature Conservancy que lleva por nombre Plan Municipal de Adaptación al Cambio Climático del municipio de San Juan Ostuncalco, Quetzaltenango, en donde se establece según la apreciación municipal e institucional los lugares establecidos como zonas de riesgo a inundación y deslizamientos, se unificaron ambos criterios para establecer los polígonos correspondientes.

3.1.3. Levantamiento de centros poblados

Para establecer el mapa de los centros poblados se utilizó la información proporcionada por el municipio de San Juan Ostuncalco; A través de la oficina de información pública de la Municipalidad de San Juan Ostuncalco se obtuvo el croquis del municipio, en donde se encuentra la clasificación de los centros

poblados del municipio, incluyendo aldeas, cantones, caseríos y fincas, comparando cada una de las ubicaciones con los datos de campo y con las Ortofotos del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

3.1.4. Levantamiento de zanjones y acuíferos

Dentro de la investigación se estableció según los mapas temáticos y ortofotos del Instituto Geográfico Nacional (IGN), las visitas de campo al municipio de San Juan Ostuncalco y los estudios del acuífero de Quetzaltenango la ubicación de los zanjones y acuíferos que podrían tener incidencia para la ubicación de un relleno sanitario, a partir de esta información se realizaron los mapas correspondientes.

3.1.5. Levantamiento de pendientes y modelo de elevación digital

Basándose en el modelo de elevación digital (DEM), el mapa de curvas de nivel del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el mapa de amenaza por inundación o deslizamiento municipal presentado por la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED), se establecieron las zonas que por su topografía no eran aptas para la ubicación de un relleno sanitario. La herramienta que se utilizó es el *software* QGIS, aplicando las capas correspondientes y herramientas vectoriales para determinar los criterios antes mencionados.

3.2. Metodología para la selección de criterios y aplicación del método analítico jerárquico

Los criterios y alternativas se seleccionaron basándose en los estudios, planes de desarrollo y análisis de riesgos previamente establecidos para el municipio de San Juan Ostuncalco, tomando en cuenta los criterios indicados por parte de la Dirección de Planificación Municipal, la aplicación del método analítico jerárquico se realizó según lo establecido por Thomas L. Saaty según lo indicado en la bibliografía disponible, utilizando los mapas elaborados con sistemas de información geográfica para facilitar la comparación de los criterios.

3.3. Ensayos de laboratorio y campo en el sitio seleccionado

Esta fase del estudio consistió en la evaluación del área donde se implementará el relleno, estableciendo con la visita o reconocimiento preliminar las condiciones generales para determinar el tipo de ensayos a realizar, esto según los factores con incidencia en el área. Sin embargo, se indica la metodología de los ensayos que en general proporcionan las características físico-mecánicas útiles para la evaluación del sitio atendiendo a lo establecido en la Norma de Seguridad Estructural NSE 2.1.

Figura 23.

Toma de muestra inalterada



Nota. Fotografía de toma de muestra inalterada en el área seleccionada. Elaboración propia.

3.3.1. Clasificación del suelo

Para la clasificación de suelos para usos ingenieriles se utiliza de forma general el sistema American Association of State Highway Officials (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, estos sistemas de clasificación se basan en el análisis de la distribución granulométrica y el cálculo de la plasticidad para agrupar los suelos según características mecánicas, el sistema de la American Association of State Highway Officials (AASHTO), se utiliza generalmente en el desarrollo de carreteras, mientras que para análisis geotécnicos se utiliza el sistema unificado de clasificación de suelos.

El sistema unificado de clasificación de suelos clasifica los suelos en dos grandes categorías:

- Suelos de grano grueso que son de grava y arena en estado natural con menos del 50 % que pasa a través del tamiz núm. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo de G o S. G es para el suelo de grava o grava, y S para la arena o suelo arenoso.
- Suelos de grano fino con 50 % o más que pasa por el tamiz núm. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo de M, que es sinónimo de limo inorgánico, C para la arcilla inorgánica y O para limos orgánicos y arcillas. El símbolo Pt se utiliza para la turba, lodo y otros suelos altamente orgánicos (Das, 2015).

Otros símbolos que también se utilizan para la clasificación son:

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

Figura 24.

Sistema unificado de clasificación de suelo

Tabla 4.2 Sistema unificado de clasificación de suelo (basado en el material que pasa por el tamiz núm. 75)

Criterio para la asignación de símbolos de grupo			Símbolos de grupo
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias Menos de 5% finos ^a	GW GP
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Gravas con finos Más de 12% finos ^{a,d}	GM GC
		Arenas limpias Menos de 5% finos ^b	SW SP
		Arenas con finos Más de 12% finos ^{b,d}	SM SC
Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico	CL ML
		Orgánico	OL
	Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico	CH MH
		Orgánico	OH Pt

^aGravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GP-GC, GP-GC.
^bArenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.
^c $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$; $C_c = \frac{D_{60} \times D_{10}}{(D_{30})^2}$
^dSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.
^eSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo CL-ML.

Nota. Resumen del sistema unificado de clasificación de suelos (basado en el material que pasa por el tamiz núm. 75). Adaptado de Das (2015). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 21). Cengage Learning.

3.3.1.1. Análisis granulométrico (ASTM D6913-04)

El análisis granulométrico consiste en la clasificación de una muestra por el tamaño de partículas que la componen, esta distribución de diferentes tamaños determina las propiedades del suelo, para esto por medio de agitación se hace pasar una muestra por tamices de diferentes diámetros que se reducen de forma progresiva, el procedimiento para realizar este análisis lo establece la norma (ASTM D6913-04), para realizar el procedimiento el suelo debe encontrarse completamente seco, y seguirse los parámetros establecidos para la elaboración del ensayo y la posterior clasificación de los resultados obtenidos.

Después de agitar el suelo, se determina la masa de suelo retenido en cada tamiz. Cuando se analizan los suelos cohesivos, romper los terrones en partículas individuales puede ser difícil. En este caso el suelo se puede mezclar con agua para formar una suspensión y después lavarse a través de los tamices. Las porciones retenidas en cada tamiz se recogen por separado y se secan al horno antes de medir la cantidad recogida en cada tamiz (Das, 2015).

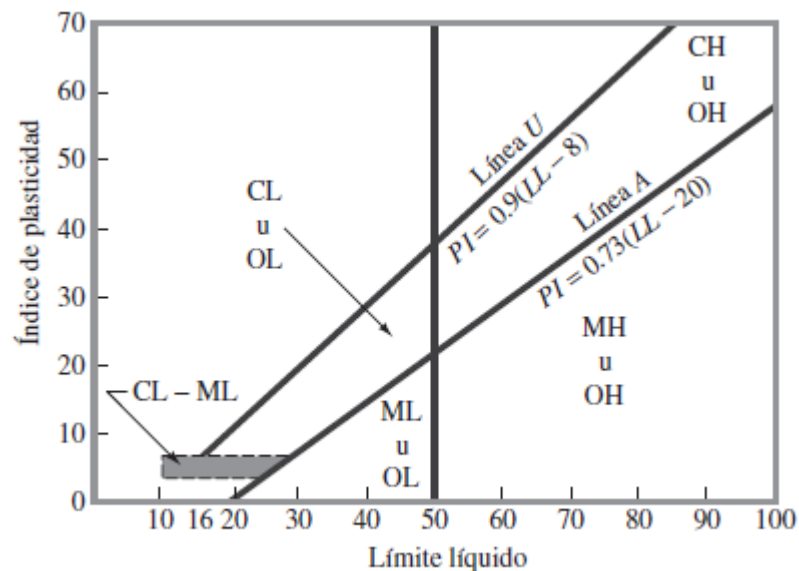
3.3.1.2. Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg se utilizan para medir los estados de consistencia de los suelos en función de su porcentaje de humedad, dependiendo de la cantidad de agua y el diámetro de partículas presentes en la muestra comportamiento del suelo puede variar, para la realización del ensayo que permiten la obtención del límite líquido se utiliza el método de Casagrande, con el suelo que pasa el tamiz número 40, para la obtención del límite plástico se realizan cilindros de 3 milímetros de mezcla de suelo y agua y midiendo la humedad de los mismos.

La frontera entre el estado semilíquido y plástico se denomina límite líquido (LL), la frontera entre el estado plástico y semisólido se denomina límite plástico (PL). La frontera entre el estado semisólido y sólido se denomina límite de contracción (SL). La diferencia entre el límite líquido y límite plástico se define como índice de plasticidad (PI) (Juárez y Rico, 2005).

Figura 25.

Gráfica de plasticidad



Nota. Gráfica de plasticidad, sistema unificado de clasificación de suelos. Adaptado de Das (2015). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 20). Cengage Learning.

3.3.2. Ensayo de gravedad específica (ASTM D854-02)

La gravedad específica o peso específico es un valor adimensional que relaciona el peso unitario del agua con el peso unitario del suelo a analizar, para establecer el valor en laboratorio se debe seguir el procedimiento establecido en la norma ASTM D854-02, para el cálculo se utiliza un picnómetro para determinar

la relación entre el peso de la muestra y el volumen total, debiendo establecer la temperatura del agua al momento del análisis.

La mayoría de los minerales tienen una gravedad específica que cae dentro de un rango general de 2.6 a 2.9. El peso específico de los sólidos de arena, que está compuesta principalmente de cuarzo, se puede estimar en alrededor de 2.65 para suelos arcillosos y limosos, pudiendo variar desde 2.6 hasta 2.9 (Das, 2015).

3.3.3. Ensayo de corte directo (ASTM D 3080-98)

El ensayo de corte directo consiste en la aplicación de una carga vertical y horizontal, que se aplican a una muestra controlada, en la que se puede medir las cargas aplicadas y las deformaciones, con este ensayo se busca obtener los parámetros de resistencia del suelo, el ensayo se debe realizar según lo indicado en la norma ASTM D 3080-98. Dependiendo del equipo, la prueba de corte puede ser de esfuerzo controlado o deformación controlada (Das, 2015).

A partir del ensayo se busca obtener las siguientes constantes:

- Cohesión aparente
- Ángulo de fricción
- Gráfico esfuerzo normal vs esfuerzo de corte

3.3.4. Ensayo de penetración estándar (SPT) (ASTM D1586)

Ensayo de penetración estándar es una prueba que se realiza in situ que se emplea en la exploración geotécnica para determinar las propiedades

geomecánicas del suelo, su uso se limita a suelos y a suelos no litificados, cuyo diámetro máximo es de menos de la mitad del tamaño del tomador de muestras.

El procedimiento consiste en introducir un muestreador estandarizado en el suelo con golpes de martillo en la parte superior de la barra de perforación. El peso estándar del martillo es de 623 N y, para cada golpe, el martinete tiene una altura de caída de 762 mm. Se registra el número de golpes necesarios para la penetración del muestreador de tres intervalos de 152.4 mm. El número de golpes necesarios para los dos últimos intervalos se suman para dar el número de penetración estándar, N , a esa profundidad (Das, 2015).

Los resultados del número de penetración estándar, N , pueden correlacionarse con algunas propiedades mecánicas de los suelos, como por ejemplo la correlación entre los valores de resistencia a la penetración estándar, con los valores de ángulo de fricción interna, o la correlación entre la resistencia de penetración estándar y la densidad relativa del suelo granular.

Figura 26.

Ensayo de penetración estándar



Nota. Fotografía de ensayo de penetración estándar en el área seleccionada. Elaboración propia.

3.4. Metodología de análisis de los datos obtenidos

Para el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de campo y de laboratorio, pueden utilizarse múltiples métodos, definiendo a continuación los aplicados para estabilidad de taludes y asentamiento del relleno sanitario.

3.4.1. Análisis de estabilidad de taludes

Las metodologías para analizar la estabilidad en taludes más utilizadas son el método del equilibrio límite y el método de cálculo de deformaciones, en este caso se utilizará el cálculo de equilibrio límite el cual se basa en un análisis estático determinando el estado de equilibrio de una porción de masa, y calculando un factor de seguridad, comparando el momento que resiste con el momento actuante que sobre una superficie de falla determinada.

Este método se realiza utilizando el análisis de las dovelas que consiste en dividir la masa deslizante en una serie de porciones verticales de suelo donde se estudia el equilibrio de cada porción, para este tipo de análisis existen varios métodos, este caso se utilizará el método de Morgenstern y Price que considera que existen una función que relaciona las fuerzas cortantes y las fuerzas normales entre dovelas, el análisis se realizará por medio del *software*, SLOPE/W, es parte del grupo de *software* GeoStudio 2021.4 desarrollado por Seequent Limited, el mismo puede descargarse de forma gratuita.

3.4.2. Asentamientos en rellenos sanitarios

Los rellenos sanitarios sufren grandes asentamientos continuos a lo largo del tiempo. Yen y Scanlon documentaron el asentamiento de varios rellenos en California (Das, 2015).

Después de terminado el relleno, la tasa de asentamiento se puede expresar como:

$$m = \frac{\Delta HF(m)}{\Delta t(mes)} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

m = tasa de asentamiento

HF= altura máxima del relleno sanitario

Con base en observaciones de campo se determinaron las correlaciones empíricas siguientes de la tasa de asentamiento:

- $m = a - b \log t_1$ (para rellenos de altura entre 12 y 24 m)
- $m = c - d \log t_1$ (para rellenos de altura entre 24 y 30 m)
- $m = e - f \log t_1$ (rellenos altura mayor de 30)

m está en m/mes (pies/mes), t_1 es la edad media del relleno, en meses

En unidades del sistema internacional, los valores de a, b c, d, e y f dados en las ecuaciones anteriores son los siguientes:

- $a = 0.0268$
- $b = 0.0116$
- $c = 0.038$
- $d = 0.0155$
- $e = 0.0435$
- $f = 0.0183$

Se considerará la metodología antes mencionada para estimar el asentamiento del relleno sanitario.

4. RESULTADOS

4.1. Resultados del monitoreo de residuos sólidos municipales realizada por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales

Dentro del monitoreo realizado por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales sobre la gestión municipal de los residuos sólidos, se obtuvieron fichas de resumen del estado actual de la gestión y manejo de residuos sólidos para 9 municipios del área sur occidente incluyendo San Juan Ostuncalco, los resultados se muestra a continuación:

Tabla 9.

Resultados disposición actual

Municipio	Tipo de disposición final	Área que ocupa el botadero o relleno sanitario actual
Zunil	Botadero a cielo abierto	7,000 m ²
Salcajá	Relleno sanitario	10,400 m ²
Quetzaltenango	Relleno sanitario	672,000 m ²
Palestina de los altos	Planta y vertedero controlado	1250 m ²
La esperanza	Botadero a cielo abierto	10,000 m ²
San Juan Ostuncalco	Botadero a cielo abierto	7,000 m ²
Almolonga	Botadero a cielo abierto	4,260 m ²
Cantel	Planta de tratamiento	8,500 m ²
Concepción Chiquirichapa	Botadero a cielo abierto	2,976 m ²


Nota. Tabla de estado de la disposición para residuos sólidos para el departamento de Quetzaltenango. Adaptado de Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2016), *Monitoreo de Residuos Sólidos Municipales 2016*.

4.1.1. Estado actual de la disposición de residuos en San Juan Ostuncalco

Según la evaluación que realizó el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, en el año 2016, la disposición de desechos sólidos del Municipio de San Juan Ostuncalco no posee ningún tratamiento, siendo un vertedero a cielo abierto, los datos de la disposición actual se presentan en la figura 24.

Figura 27.

Ficha de seguimiento de residuos sólidos municipio de San Juan Ostuncalco

GOBIERNO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA		BOLETA DE BASUREROS DE LOS MUNICIPIOS DEL DEPARTAMENTO DE QUETZALTENANGO	
TÉCNICO	Fernando Castillo	FECHA LEVANTAMIENTO	07-11-2016
DEPARTAMENTO	Quetzaltenango	MUNICIPIO	SAN JUAN OSTUNCALCO
COMUNIDAD	Aldea Monrovia		
COORDENADAS: A) GEOGRÁFICAS: LAT	14° 54' 43.2"	LONG	91° 38' 02.8"
B) UTM	X: 0646915	Y	1649135
ÁREA QUE OCUPA:	7000 M²	VOLUMEN APROXIMADO:	6.300 ton.
TONELADAS SEMANALES:	238	TONELADAS DIARIAS:	31
TIPO DE BASURERO:	MUNICIPAL	TREN DE ASEO ÁREA URBANA:	SI
TREN DE ASEO ÁREA RURAL:	NO	COBRO POR SERVICIO:	Q. 8.00
COBERTURA DE RECOLECCIÓN R.S.:	CASCO URBANO		
DÍA DE RECOLECCIÓN D. S.:	DE LUNES A SABADO Y DOMINGO MERCADOS		
RECEPCIÓN DE D.S.:	GRANEL, BOLSA COSTALES		
TRANSPORTE DE D.S.:	CAMION		
PROPIETARIO DEL BASURERO:	MUNICIPAL		
OBSERVACIONES			
Este basurero se inauguró el 16 de febrero del 2015. Alrededor hay casas, escuelas, mal olor, moscas, niños recogiendo juguetes y plásticos. La Municipalidad está gestionando un vertedero de desechos sólidos en este lugar.			
			

Nota. Estado de la disposición para residuos sólidos para el municipio de San Juan Ostuncalco. Adaptado de Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2016). *Monitoreo de Residuos Sólidos Municipales 2016.*

4.2. Resultados de la magnitud del proyecto

Se utilizó para este estudio los criterios básicos establecidos en la Norma de Seguridad Estructural NSE 2.1-18, apoyado por el proceso analítico jerárquico para la selección de sitios y la elaboración de mapas utilizando sistemas de información geográfica, Sin embargo, para el análisis de adecuado de la magnitud del proyecto fue necesaria la evaluación de la producción de desechos sólidos, para determinar el tipo de proyecto a implementar para el municipio.

4.2.1. Sistema constructivo y clasificación

Los rellenos sanitarios a pesar de realizarse con diferentes métodos constan de elementos similares indispensables para su correcto funcionamiento, sin embargo, para estimar el área del relleno sanitario deben tomarse en cuenta los siguientes parámetros:

- Volumen proyectado de residuos sólidos

En el año 2018 la USAID, realizó un estudio de campo para establecer la factibilidad de realizar el manejo de residuos sólidos de forma mancomunada, para la verificación de la factibilidad se realizaron investigaciones en diferentes municipios haciendo visitas de campo para identificar la composición, volumen y peso de los desechos producidos en los municipios que fueron investigados en el estudio.

- Proyección de desechos y cálculo de área necesaria para el relleno

Dentro del proyecto elaborado por la USAID, se realizó una caracterización de los desechos de cada uno de los municipios que se estudiaron,

presentando el total de kilogramos por cada habitante producidos en un día, los resultados para el municipio de San Juan Ostuncalco son los siguientes:

Tabla 10.

Producción de desechos sólidos

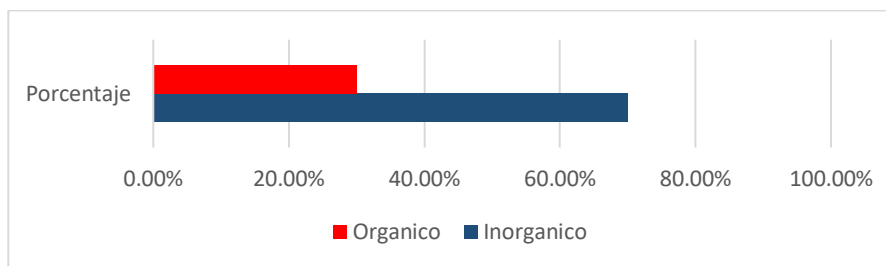
Municipio	Población año 2018	Producción per cápita kilogramo-habitante/día	Producción diaria (Ton.)
San Juan Ostuncalco	17,500	0.54	9.4

Nota. Producción de desechos sólidos. Adaptado de USAID (2018). *Estudio de Factibilidad de Tratamiento de Desechos Sólidos de Manera Mancomunada Mancomunidad de Municipios Metrópoli de Los Altos –Mmma.* (p. 15).

El porcentaje de generación de desechos orgánicos e inorgánicos para el municipio es el siguiente:

Figura 28.

Clasificación de desechos sólidos



Nota. Producción de desechos sólidos, resultado del análisis de desechos por municipio para San Juan Ostuncalco. Adaptado de USAID (2018). *Estudio de Factibilidad de Tratamiento de Desechos Sólidos de Manera Mancomunada Mancomunidad de Municipios Metrópoli de Los Altos –Mmma.* (p.15).

- Selección del método constructivo según el área proyectada

Proyección de residuos sólidos producidos para el municipio de San Juan Ostuncalco, proyección de 10 años. Para obtener el total de kilogramos producidos se realizó la proyección del crecimiento poblacional para cada año, se utilizó los datos del censo realizado en el año 2018 utilizando la población de San Juan Ostuncalco y utilizando la tasa de crecimiento poblacional establecida por el Instituto Nacional de Estadística, (INE) para el país, en su página oficial.

Tabla 11.

Proyección de residuos sólidos

Año	Proyección de población	Total, de población (habitantes)	Total, de kilogramos producidos por día	Total, de toneladas producidas por día
2019		51828	27987.12	27.99
2020	$51828 * \left(1 + \frac{2.19}{100}\right)^1$	52963	28600.04	28.60
2021	$51828 * \left(1 + \frac{2.19}{100}\right)^2$	54123	29226.38	29.23
2022	$51828 * \left(1 + \frac{2.19}{100}\right)^3$	55308	29866.44	29.87
2023	$51828 * \left(1 + \frac{2.19}{100}\right)^3$	56519	30520.51	30.52
2024	$51828 * \left(1 + \frac{2.19}{100}\right)^4$	57757	31188.91	31.19
2025	$51828 * \left(1 + \frac{2.19}{100}\right)^5$	59022	31871.95	31.87
2026	$51828 * \left(1 + \frac{2.19}{100}\right)^6$	60315	32569.94	32.57
2027	$51828 * \left(1 + \frac{2.19}{100}\right)^7$	61636	33283.23	33.28

Continuación de la tabla 10.

Año	Proyección de población	Total, de población (habitantes)	Total, de kilogramos producidos por día	Total, de toneladas producidas por día
2028	$51828 * \left(1 + \frac{2.19}{100}\right)^8$	62985	34012.13	34.01
2029	$51828 * \left(1 + \frac{2.19}{100}\right)^9$	64365	34756.99	34.76

Nota. Cálculo de proyección de residuos sólidos para el municipio de San Juan Ostuncalco. Elaboración propia, realizado con Excel.

Para el análisis del volumen según el peso calculado, se estimó un volumen por peso, tomando en cuenta el estado de los residuos sólidos compactado y no compactado, tomando en cuenta también el volumen del material de recubrimiento los datos obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 12.

Proyección de área para residuos sólidos producidos

Total, de kilogramos producidos por día	Total, de toneladas por día	Toneladas anuales	Toneladas acumuladas	Volumen compactado	Metros cúbicos estabilizados
27987.12	27.99				
28600.04	28.60	10439.01	10439.01	0.5 ton/m³	20878.03
29226.38	29.23	10667.63	21106.64	0.5 ton/m³	21335.26
29866.44	29.87	10901.25	32007.89	0.5 ton/m³	21802.50
30520.51	30.52	11139.99	43147.88	0.5 ton/m³	22279.97
31188.91	31.19	11383.95	54531.83	0.5 ton/m³	22767.90
31871.95	31.87	11633.26	66165.09	0.5 ton/m³	23266.52

Continuación de la tabla 12.

Total, de kilogramos producidos por día	Total, de toneladas por día	Toneladas anuales	Toneladas acumuladas	Volumen compactado	Metros cúbicos estabilizados
32569.94	32.57	11888.03	78053.12	0.5 ton/m ³	23776.06
33283.23	33.28	12148.38	90201.50	0.5 ton/m ³	24296.75
34012.13	34.01	12414.43	102615.92	0.5 ton/m ³	24828.85
34756.99	34.76	12686.30	115302.23	0.5 ton/m ³	25372.61
					230604.45

Nota. Cálculo de proyección de área necesaria para residuos sólidos para el municipio de San Juan Ostuncalco. Elaboración propia, realizado con Excel.

Para la estimación del volumen se toma en cuenta un volumen teórico de 500 kg/m³, para el diseño específico deben realizarse pruebas para estimar el valor real. Contando con un volumen total proyectado para el año 2030 de 34.76 toneladas diarias se define que el tipo de relleno debe ser mecanizado, tomando una altura de relleno de 12 metros el área necesaria para el relleno es de 19,217.04 metros cuadrados.

4.3. Aplicación del método multicriterio analítico jerárquico

El método analítico jerárquico tiene fundamentos psicológicos en los cuales se determina que las comparaciones por pares son más fáciles de analizar para la mente humana, que un análisis global, en función de esto se establece una escala de comparación pareada, en donde se compara si un criterio es de igual, mayor o menor importancia que otro. El objetivo es la selección de la alternativa que se adapte mejor a lo requerido, con base en una serie de criterios que facilitan la toma de decisiones.

4.3.1. Selección de criterios

Para la implementación de un relleno sanitario, basados en la investigación se establecen los siguientes criterios:

- Criterio de pendientes máximas para implementar un relleno sanitario
- Criterio de cercanía de centros poblados
- Criterio de cercanía de corrientes superficiales y acuíferos
- Criterio de amenaza por deslizamientos
- Criterio de amenaza por inundación
- Criterio de área mínima para la implementación
- Criterio de distancia de áreas protegidas
- Criterio de distancia de vía de acceso

Para facilitar el análisis según los procesos establecidos se identificará los criterios propuestos con los siguientes símbolos:

Tabla 13.

Símbolos de los criterios

Símbolo	Descripción de criterio
Pm	1. Criterio de pendientes máximas.
Cp	2. Criterio de cercanía de centros poblados
Cr	3. Criterio de cercanía de corrientes superficiales y acuíferos
D	4. Criterio de amenaza por deslizamientos
I	5. Criterio de amenaza por inundación
Am	6. Criterio de área mínima para la implementación
Ap	7. Criterio de distancia de áreas protegidas
Va	8. Criterio de distancia de vía de acceso.

Nota. Símbolos utilizados para los criterios utilizados en el método de selección multicriterio.
Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla 14.*Evaluación de criterios método analítico jerárquico*

Intensidad	Definición	Explicación
1	Importancia igual	Las dos actividades contribuyen igualmente al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen una actividad sobre la otra
5	Importancia esencial o fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre la otra
7	Importancia muy fuerte	Una actividad es fuertemente favorecida y su dominancia es demostrada en la práctica
9	Importancia extrema	La evidencia en favor de una actividad sobre otra presenta el mayor orden de posible afirmación
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando el compromiso es necesario

Nota. Resumen del sistema unificado de clasificación de suelos. Adaptado de *How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process*. [Cómo tomar una decisión: el proceso de jerarquía analítica]. (p. 14). Interfaces.

Tabla 15.*Matriz de comparación pareada*

	Pendientes máximas	Centros poblados	Corrientes superficiales y acuíferos	Amenaza por deslizamiento	Amenaza por inundación	Área mínima	Áreas protegidas	Vía de acceso
Pendientes máximas	1/1	5/1	1/9	1/5	1/5	1/1	1/3	1/1
Centros poblados	1/5	1/1	1/9	1/5	1/5	1/3	1/5	1/1

Continuación de la tabla 15.

	Pendientes máximas	Centros poblados	Corrientes superficiales y acuíferos	Amenaza por deslizamiento	Amenaza por inundación	Área mínima	Áreas protegidas	Vía de acceso
Corrientes superficiales y acuíferos	9/1	9/1	1/1	1/1	1/1	5/1	1/1	5/1
Amenaza por deslizamiento	5/1	5/1	1/1	1/1	1/1	5/1	1/1	5/1
Amenaza por inundación	5/1	5/1	1/1	1/1	1/1	5/1	1/1	5/1
Área mínima	1/1	3/1	1/5	1/5	1/5	1/1	1/5	1/1
Áreas protegidas	3/1	5/1	1/1	1/1	1/1	5/1	1/1	1/1
Vía de acceso	1/1	1/1	1/5	1/5	1/5	1/1	1/1	1/1

Nota. Matriz de comparación pareada del método Analítico Jerárquico. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

A partir de la comparación se tomó en cuenta los criterios y normativas que tienen relevancia en la selección del sitio, la priorización de los criterios se realizó con base en el levantamiento de mapas y en la investigación del municipio. Se utilizó únicamente las variables que tienen incidencia directa en el

área de influencia, excluyendo los criterios geotécnicos no relevantes para el tipo de proyecto, también según el Proceso Analítico Jerárquico se evaluó en los criterios seleccionados las características de: homogeneidad, reciprocidad y consistencia.

4.3.2. Normalización de la matriz de comparaciones pareada y valor de cada criterio

En la tabla 15 se comparó los criterios por pares utilizando la escala de valor propuesta por Saaty, los criterios evaluados se propusieron según los estudios anteriores y las condiciones actuales del Municipio de San Juan Ostuncalco. Es importante hacer constar que no fueron evaluados criterios económicos para la investigación, debiéndose realizar las comparaciones de las alternativas presentadas de forma posterior.

Tabla 16.

Matriz de comparación pareada normalizada

	Pm	Cp	Cr	D	I	Am	Ap	V
Pm	0.040	0.147	0.024	0.042	0.042	0.043	0.058	0.050
Cp	0.008	0.029	0.024	0.042	0.042	0.014	0.035	0.050
Cr	0.357	0.265	0.216	0.208	0.208	0.214	0.174	0.250
D	0.198	0.147	0.216	0.208	0.208	0.214	0.174	0.250
I	0.198	0.147	0.216	0.208	0.208	0.214	0.174	0.250
Am	0.040	0.088	0.043	0.042	0.042	0.043	0.035	0.050
Ap	0.119	0.147	0.216	0.208	0.208	0.214	0.174	0.050
V	0.040	0.029	0.043	0.042	0.042	0.043	0.174	0.050

Nota. Matriz de comparación pareada normalizada del método Analítico Jerárquico. Elaboración propia, realizado con Excel.

Se establecieron los porcentajes a los que corresponde cada uno de los criterios analizados. Este análisis se realizó previo al del análisis de consistencia, si el resultado del análisis de consistencia indica que existe un sesgo debe realizarse un nuevo análisis.

Tabla 17.

Cálculo del valor de cada criterio

	Pm	Cp	Cr	D	I	Am	Ap	V	Valor de cada criterio
Pm	0.040	0.147	0.024	0.042	0.042	0.043	0.058	0.050	0.056
Cp	0.008	0.029	0.024	0.042	0.042	0.014	0.035	0.050	0.030
Cr	0.357	0.265	0.216	0.208	0.208	0.214	0.174	0.250	0.237
D	0.198	0.147	0.216	0.208	0.208	0.214	0.174	0.250	0.202
I	0.198	0.147	0.216	0.208	0.208	0.214	0.174	0.250	0.202
Am	0.040	0.088	0.043	0.042	0.042	0.043	0.035	0.050	0.048
Ap	0.119	0.147	0.216	0.208	0.208	0.214	0.174	0.050	0.167
V	0.040	0.029	0.043	0.042	0.042	0.043	0.174	0.050	0.058

Nota. Matriz cálculo de valor de cada criterio del método Analítico Jerárquico. Elaboración propia, realizado con Excel.

El valor de cada criterio se establece según la matriz normalizada en función de la evaluación total. Para la ejecución del método analítico Jerárquico debe establecerse que la matriz presentada es consistente, para lo cual se realizó el siguiente proceso:

- Cálculo del índice de consistencia CI

Para el cálculo del índice de consistencia se utiliza la siguiente fórmula:

$$CI = \frac{N_{max} - N}{N-1} \quad (\text{Ec. 2})$$

Para la evaluación de la consistencia de la matriz se utiliza la matriz de valores de cada criterio y la matriz original para esto según la fórmula establecida, realizando la multiplicación entre ambas matrices y sumando los resultados (Saaty, 1994).

Tabla 18.

Cálculo de consistencia de la matriz

Matriz principal de criterios								Valores	Resultado
1	5	0.11111	0.2	0.2	1	0.33333	1	0.056	0.48
0.2	1	0.11111	0.2	0.2	0.33333	0.2	1	0.030	0.26
9	9	1	1	1	5	1	5	0.237	2.11
5	5	1	1	1	5	1	5	0.202	1.77
5	5	1	1	1	5	1	5	0.202	1.77
1	3	0.2	0.2	0.2	1	0.2	1	0.048	0.41
3	5	1	1	1	5	1	1	0.167	1.42
1	1	0.2	0.2	0.2	1	1	1	0.058	0.49
Nmax								8.70	

Nota. Matriz de consistencia del método Analítico Jerárquico. Elaboración propia, realizado con Excel.

A partir de este valor se puede calcular el índice de consistencia tomando en cuenta que N es el valor de los criterios contenidos en este caso 8.

$$CI = \frac{N_{max} - N}{N - 1} = \frac{8.70 - 8}{8 - 1} = 0.10$$

Posterior a la realización de este cálculo se debe efectuar el cálculo de la consistencia aleatoria:

$$RI = \frac{1.98 (N - 2)}{N} = \frac{1.98 (8 - 2)}{8} = 1.485$$

Tendiendo los valores del índice de consistencia y la consistencia aleatoria se obtuvo la razón de consistencia.

Siendo el resultado de la consistencia:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.10}{1.485} = 0.068$$

El nivel de inconsistencia se considera aceptable si es menor o igual a 0.1, por lo que se considera que la matriz no presenta sesgos o inclinaciones en las decisiones (Saaty, 1994).

4.3.3. Selección de alternativas

Para la evaluación multicriterio a partir del análisis de consistencia, se realizó la selección de las posibles alternativas, con el análisis de mapas se estableció 3 ubicaciones en las que se puede implementar un relleno sanitario con posibilidad de cubrir la demanda por 2.5 años, pudiendo ejecutarse el proyecto por fases según sean los requerimientos del municipio, a continuación,

se presenta un cuadro de las coordenadas de las tres posibles alternativas de solución:

Tabla 19.

Alternativas para ubicación de rellenos sanitarios

Alternativa	Símbolo	Coordenadas
Alternativa 1	At1	14°53'36.92"N 91°37'46.13"W
Alternativa 2	At2	14°52'41.9"N 91°40'23.8"W
Alternativa 3	At3	14°51'38.1"N 91°40'40.7"W

Nota. Posibles alternativas de ubicación para el relleno sanitario. Elaboración propia, realizado con Excel.

Con cada una de las alternativas propuestas se evaluaron los criterios planteados, se realizó el proceso de Saaty para cada una de las alternativas realizando la comparación por pares y normalizando cada una de las matrices resultantes.

4.3.4. Matrices de comparación pareadas para cada alternativa

Se realizó la evaluación correspondiente para cada alternativa según los criterios propuestos para obtener el valor de cada alternativa.

Tabla 20.*Comparación de alternativas por pares, pendientes máximas*

Pendientes		AT1	AT2	AT3		AT1	AT2	AT3	Valor
para implementar los rellenos	AT1	1	1	5	AT1	0.4545	0.4545	0.4545	0.4545
	AT2	1	1	5	AT2	0.4545	0.4545	0.4545	0.4545
	AT3	1/5	1/5	1	AT3	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
		2 1/5	2 1/5	11					

Nota. Comparación de cada alternativa, con pendientes máximas. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 21.*Comparación de alternativas por pares, centros poblados*

		AT1	AT2	AT3		AT1	AT2	AT3	Valor
Centros Poblados	AT1	1	5	3	AT1	0.6522	0.5556	0.6923	0.6333
	AT2	1/5	1	1/3	AT2	0.1304	0.1111	0.0769	0.1062
	AT3	1/3	3	1	AT3	0.2174	0.3333	0.2308	0.2605
		1 ½	9	4 1/3					

Nota. Comparación de cada alternativa, con centros poblados. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 22.*Comparación de alternativas por pares, corrientes y acuíferos*

		AT1	AT2	AT3		AT1	AT2	AT3	Valor
Corrientes y Acuíferos	AT1	1	3	5	AT1	0.6522	0.6923	0.5556	0.6333
	AT2	1/3	1	3	AT2	0.2174	0.2308	0.3333	0.2605
	AT3	1/5	1/3	1	AT3	0.1304	0.0769	0.1111	0.1062
		1 ½	4 1/3	9					

Nota. Comparación de cada alternativa, con corrientes y acuíferos. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 23.*Comparación de alternativas por pares, deslizamientos*

Deslizamientos		AT1	AT2	AT3		AT1	AT2	AT3	Valor
	AT1	1	1	1/3	AT1	0.2	0.2	0.2	0.2
	AT2	1	1	1/3	AT2	0.2	0.2	0.2	0.2
	AT3	3	3	1	AT3	0.6	0.6	0.6	0.6
		5	5	1 2/3					

Nota. Comparación de cada alternativa, con zonas de deslizamientos. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 24.*Comparación de alternativas por pares, áreas de inundación*

		AT1	AT2	AT3		AT1	AT2	AT3	Valor
Inundación	AT1	1	5	3	AT1	0.6522	0.5556	0.6923	0.6333
	AT2	1/5	1	1/3	AT2	0.1304	0.1111	0.0769	0.1062
	AT3	1/3	3	1	AT3	0.2174	0.3333	0.2308	0.2605
		1 ½	9	4 1/3					

Nota. Comparación de cada alternativa, con zonas de inundaciones. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla 25.*Comparación de alternativas por pares, área mínima*

		AT1	AT2	AT3		AT1	AT2	AT3	Valor
Área mínima	AT1	1	5	1	AT1	0.4545	0.4545	0.4545	0.4545
	AT2	1/5	1	1/5	AT2	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
	AT3	1	5	1	AT3	0.4545	0.4545	0.4545	0.4545
		2							
		2 1/5	11	1/5					

Nota. Comparación de cada alternativa, con área mínima para implementación. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 26.*Comparación de alternativas por pares, áreas protegidas*

Áreas protegidas		AT1	AT2	AT3		AT1	AT2	AT3	Valor
	AT1	1	1/3	1/5	AT1	0.1111	0.0769	0.1304	0.1062
	AT2	3	1	1/3	AT2	0.3333	0.2308	0.2174	0.2605
	AT3	5	3	1	AT3	0.5556	0.6923	0.6522	0.6333
		9	4 1/3	1 1/2					

Nota. Comparación de cada alternativa, con áreas protegidas. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 27.*Comparación de alternativas por pares, vías de acceso*

Vías de Acceso		AT1	AT2	AT3		AT1	AT2	AT3	Valor
						0.161	0.148	0.384	0.231
	AT1	1	1/5	5	AT1	3	9	6	6
						0.806	0.744	0.538	0.696
	AT2	5	1	7	AT2	5	7	5	5
						0.032	0.106	0.076	0.071
		AT3	1/5	1/7	1	AT3	3	4	9
		6 1/5	1 1/3	13					

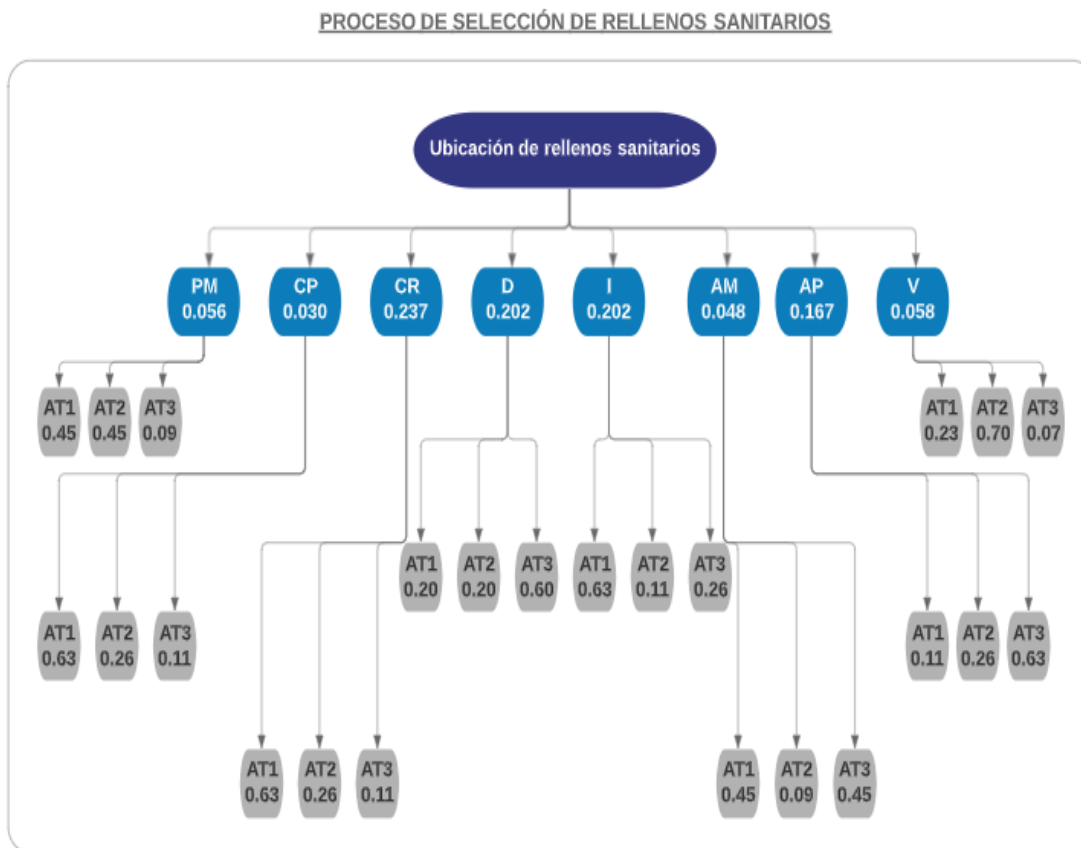
Nota. Comparación de cada alternativa, con vías de acceso. Elaboración propia, realizado con Excel.

4.3.5. Valores obtenidos de criterios y alternativas

Para obtener el valor final de cada alternativa deben tomarse en cuenta los vectores calculados de cada criterio.

Figura 29.

Diagrama final de criterios y alternativas



Nota. Diagrama final de alternativas y criterios. Elaboración propia, realizado con Lucidchart.

Según lo establecido por Saaty debe realizarse una multiplicación de las matrices resultantes para criterios y alternativas.

Tabla 28.*Cálculo del valor de las alternativas*

Matriz 1								Matriz 2	
Pm	Cp	Cr	D	I	Am	Ap	V	CR	Resultado
0.454	0.633	0.633	0.	0.633	0.454	0.106	0.231	0.055638	
5	3	3	2	3	5	2	6	7	0.41584407
0.454	0.106	0.260	0.	0.106	0.090	0.260	0.696	0.030486	
5	2	5	2	2	9	5	5	2	0.24029024
0.090	0.260	0.106	0.	0.260	0.454	0.633	0.071	0.236695	
9	5	2	6	5	5	3	9	7	0.34386569
								0.202148	
								6	
								0.202148	
								6	
								0.047782	
								7	
								0.167227	
								9	
								0.057871	
								6	

Nota. Cálculo del valor de las alternativas. Elaboración propia, realizado con Excel.

4.3.6. Resultados de la aplicación del proceso analítico jerárquico

Para la ubicación de un relleno sanitario en el municipio de San Juan Ostuncalco se utilizó el método analítico jerárquico desarrollado por Thomas L. Saaty, definiendo y ponderando las prioridades con el uso de una jerarquía y estructura definida. Para el presente estudio se evaluaron 8 criterios correspondientes a los elementos presentes en el área de influencia y de los

criterios más importantes a evaluar para la implementación de un relleno sanitario, habiendo comparado por pares todos los criterios según la escala de valores establecida en el método analítico jerárquico.

Tabla 29.

Criterios evaluados

1. Criterio de pendientes máximas.
2. Criterio de cercanía de centros poblados
3. Criterio de cercanía de corrientes superficiales y acuíferos
4. Criterio de amenaza por deslizamientos
5. Criterio de amenaza por inundación
6. Criterio de área mínima para la implementación
7. Criterio de distancia de áreas protegidas
8. Criterio de distancia de vía de acceso.

Nota. Criterios evaluados. Elaboración propia, realizado con Excel.

A partir de esta comparación resulta una matriz en la que se establecen los valores para cada criterio, para definir que no exista sesgo o preferencia se realizó un análisis de consistencia de la matriz. Para el análisis se calculó la razón de consistencia a partir del índice de consistencia y la consistencia aleatoria (Saaty, 1994).

Teniendo un resultado de razón de consistencia de 0.068, debiendo ser este valor menor a 0.10 para considerarse una matriz consistente según el método del proceso analítico jerárquico, por lo cual se considera que la ponderación es consistente.

Tabla 30.*Valores finales de cada criterio*

Criterios	Valor de cada criterio
1. Criterio de pendientes máximas.	0.056
2. Criterio de cercanía de centros poblados	0.030
3. Criterio de cercanía de corrientes superficiales y acuíferos	0.237
4. Criterio de amenaza por deslizamientos	0.202
5. Criterio de amenaza por inundación	0.202
6. Criterio de área mínima para la implementación	0.048
7. Criterio de distancia de áreas protegidas	0.167
8. Criterio de distancia de vía de acceso.	0.058

Nota. Valores finales de cada criterio evaluado. Elaboración propia, realizado con Excel.

A partir del levantamiento realizado y la selección de los criterios se estableció las zonas en las que no es viable la implementación de rellenos sanitarios, con la definición de estas zonas se identificó 3 alternativas probables para la implementación, estas alternativas comparadas de forma pareada respecto a la evaluación de cada criterio.

Obteniendo así una matriz ponderada de cada alternativa por criterio y al estar establecida la ponderación para cada criterio, la resultante de la multiplicación de ambas matrices da como resultado el valor de cada alternativa respecto a los criterios analizados.

Tabla 31.*Valores finales de cada Alternativa*

Alternativa	Resultado
Alternativa 1	0.41584407
Alternativa 2	0.24029024
Alternativa 3	0.34386569

Nota. Valores finales de cada alternativa evaluada. Elaboración propia, realizado con Excel.

De las tres alternativas analizadas se estableció que el área que se ubica en las coordenadas 14°53'36.92"N 91°37'46.13"W es la que cumple de mejor manera con los criterios evaluados, con un 41.58 %, y cumpliendo con la consistencia de los criterios evaluados.

4.4. Reconocimiento preliminar de la alternativa seleccionada

A partir de la selección de la ubicación se realizó visita de campo para evaluar las características del sitio lo datos recabados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 32.*Resultado de visita al sitio o reconocimiento preliminar*

Información general		Posibles amenazas
Coordenadas del sitio	Remociones en masa Clasificación: Los taludes del sitio están compuestos por suelo (arena-limos-arcillas), no hay presencia de bloques de rocas.	Debido a la antigua extracción de materiales se observan taludes, con ángulos casi verticales, se debe verificar la posibilidad de remociones en masa.
14°53'36.92"N		
91°37'46.13"W		

Continuación de la tabla 32.

Información general		Posibles amenazas	
Coordenadas del sitio	14°53'36.92"N 91°37'46.13"W	Remociones en masa Clasificación: Los taludes del sitio están compuestos por suelo (arena-limos-arcillas), no hay presencia de bloques de rocas.	Debido a la antigua extracción de materiales se observan taludes, con ángulos casi verticales, se debe verificar la posibilidad de remociones en masa.
Uso actual del predio	Sin uso, anteriormente se pudo verificar uso de extracción de suelos. Existen zonas adyacentes que tiene uso actual de extracción.		No se observan antiguos deslizamientos, tampoco existen antiguos flujos de barro o detritos. No se observan deformaciones en las coronas de los taludes. No se observa reptación de suelos, ni deformación en laderas.
Corrientes superficiales	Se verificó en los alrededores, no existen ríos o riachuelos, sin embargo el predio se ve afectado por la escorrentía superficial por las pendientes, de las partes superiores.	Licuefacción	No existen antecedentes de fenómenos de licuefacción en la zona de estudio. Sin embargo se deben verificar las características del suelo.
		Inundaciones	No existen antecedentes de inundaciones en la zona de estudio.
Información sobre acuíferos	A una distancia de 900 metros existe un pozo de agua que posee una perforación total de 900 pies.	Fallas	No se observan fallas o fracturas en el sector, se debe de verificar la inclinación de la estratificación.
Vegetación	Se observa abundante vegetación en las partes superiores de los taludes, siendo las especies, Latifoliadas y coníferas	Riesgo volcánico	No existe en el sector.

Nota. Valores finales de cada criterio evaluado. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 30.

Ubicación seleccionada



Nota. Fotografía de área seleccionada con el método analítico jerárquico. Elaboración propia.

Según las características del área a evaluar se determinó que se debe verificar el valor soporte del suelo en donde se emplazará el relleno sanitario y la estabilidad del talud ubicado en el área de influencia del proyecto, para los ensayos de campo se consideraron tres ensayos de penetración estándar en la corona de del talud, realizando el análisis granulométrico, límites de Atterberg y gravedad específica para cada uno de los ensayos, esto con el fin de determinar las características físico-mecánicas del suelo, se realizó también un ensayo de corte directo en la superficie de mayor altura del talud para verificar su estabilidad, y un ensayos de penetración estándar en la base donde se emplazará el relleno sanitario, los resultados de este último ensayo fueron proporcionado por la Municipalidad de San Juan Ostuncalco. En el mapa que se muestra a continuación se indican las ubicaciones de los ensayos realizados.

Figura 31.

Ubicaciones de los ensayos y puntos de muestra



Nota. Fotografía de ubicación de ensayos. Obtenido de Google Earth (2022). *Mapa.* (<https://www.google.com/intl/es-419/earth/>), consultado el 10 de marzo de 2022.

4.4.1. Resultados de los ensayos de penetración estándar

A continuación, se muestran los resultados de cada uno de los sondeos indicando los datos según la profundidad y los resultados de las muestras alteradas obtenidas.

Tabla 33.*Resultados del sondeo de penetración estándar 1*

Profundidad	N (corregido)	Capacidad soporte		Clasificación	Angulo de fricción interna
		Kg/cm ²	Ton/m ²		
0.50	3	0.27	2.73	SM	23
1.00	7	0.64	6.37	SC	27
1.50	13	1.18	11.83	SC	31
2.00	15	1.37	13.65	SC	32
2.50	24	2.18	21.84	SC	37

Nota. Resultado del sondeo de penetración estándar 1. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 34.*Resultados del sondeo de penetración estándar 2*

Profundidad	N (corregido)	Capacidad soporte		Clasificación	Angulo de fricción interna
		Kg/cm ²	Ton/m ²		
0.50	12	1.09	10.92	SM	30
1.00	9	0.82	8.19	SM	28
1.50	3	0.27	2.73	SM	23
2.00	4	0.36	3.64	SM	24
2.50	4	0.36	3.64	SM	24

Nota. Resultado del sondeo de penetración estándar 2. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 35.*Resultados del sondeo de penetración estándar 3*

Profundidad	N (corregido)	Capacidad soporte		Clasificación	Angulo de fricción interna
		Kg/cm ²	Ton/m ²		
0.50	5	0.46	4.55	SC	25
1.00	5	0.91	9.10	SC	25
1.50	10	1.0	10	SC	29
2.00	11	1.01	10.10	SC	30
2.50	11	1.01	10.10	SC	30

Nota. Resultado del sondeo de penetración estándar 3. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 36.*Resultados del sondeo de penetración estándar 4*

Profundidad	N (corregido)	Capacidad soporte		Clasificación	Angulo de fricción interna
		Kg/cm ²	Ton/m ²		
0.50	6	0.55	5.46	ML	26
1.00	8	0.73	7.28	ML	28
1.50	10	0.91	9.10	ML	29
2.00	7	0.64	6.37	ML	27
2.50	6	0.55	5.46	ML	26
3.00	5	0.46	4.55	ML	25
3.50	4	0.36	3.64	ML	24
4.00	12	1.09	10.92	ML	30
4.50	7	0.64	6.37	ML	27
5.00	9	0.82	8.19	ML	28
5.50	11	1.00	10.01	ML	30
6.00	17	1.55	15.47	ML	33

Nota. Resultado del sondeo de penetración estándar 4. Elaboración propia, realizado con Excel.

4.4.2. Resultados del muestreo de suelos y pruebas de laboratorio

El muestreo de suelos y pruebas de laboratorio se realizaron con base en el sistema unificado de clasificación de suelos, con muestras alteradas e inalteradas según cada caso.

4.4.2.1. Análisis granulométrico

Como parte de los ensayos, se realizaron los análisis granulométricos para cada uno de los sondeos, y la clasificación de cada muestra analizada, se presentan los datos de las muestras extraídas a cada 50 centímetros de los sondeos de penetración estándar, unificados por cada sondeo, y la gráfica y resultados de la granulometría de la muestra utilizada para el ensayo de corte directo. En la siguiente tabla se indican los resultados de los análisis granulométricos realizados para cada una de las muestras, utilizando la clasificación, SUCS:

Tabla 37.

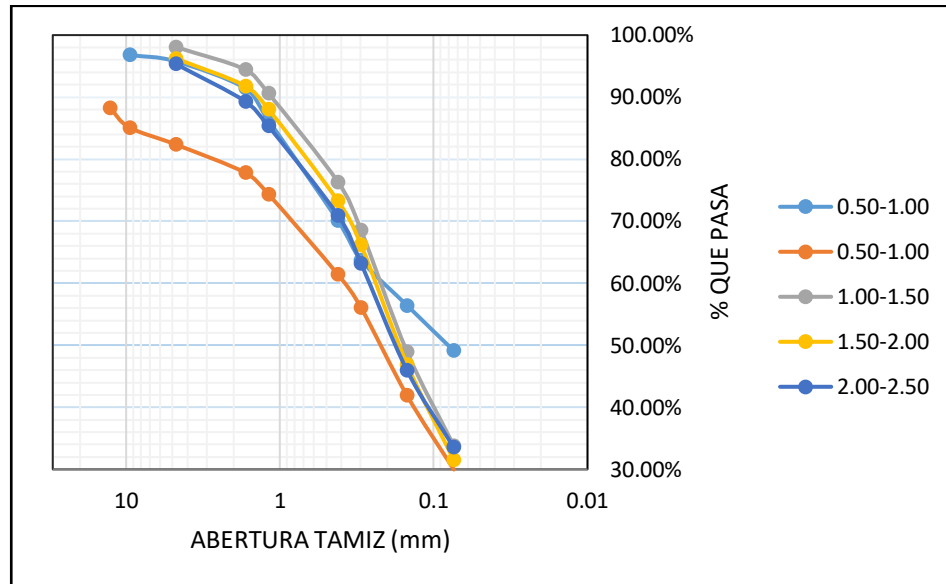
Resultado análisis granulométrico sondeo 1

Ubicación	% Gruesos	% Arenas	% Finos	Clasificación SUCS
0 m - 50 m	4	47	49	SM arenas limosas
0.50 m -1 m	18	52	30	SC arenas arcillosas
1 m -1.50 m	2	64	34	SC arenas arcillosas
1.5 m -2.00 m	4	65	32	SC arenas arcillosas
2.00m-2.50 m	5	62	34	SC arenas arcillosas

Nota. Resultado del análisis granulométrico sondeo 1. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 32.

Gráfica granulométrica sondeo 1



Nota. Gráfica del análisis granulométrico sondeo 1. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 38.

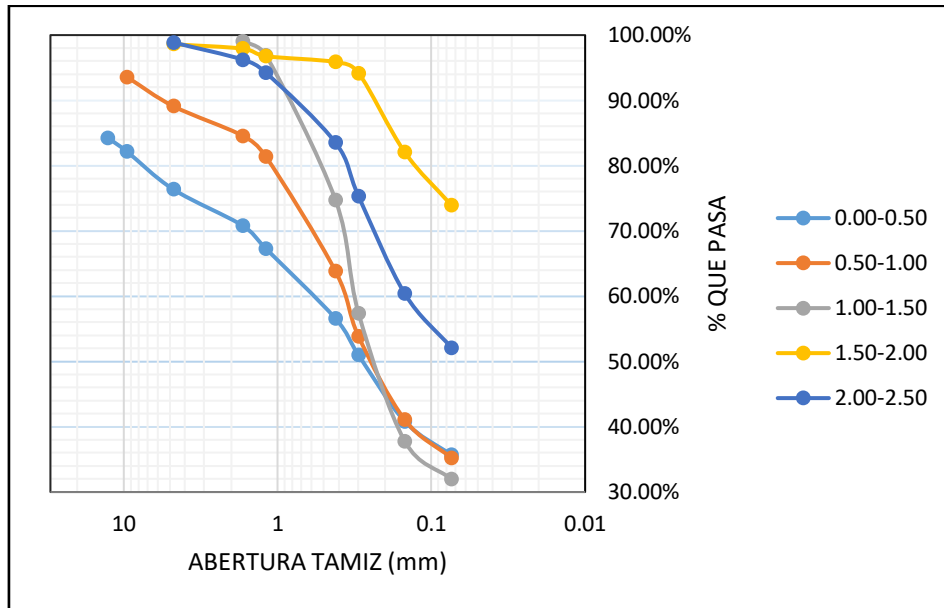
Resultado análisis granulométrico sondeo 2

Ubicación	% Gruesos	% Arenas	% Finos	Clasificación SUCS
0 m - 50 m	24	41	36	SM Arenas Limosas
0.50 m -1 m	11	54	35	SM Arenas Limosas
1 m -1.50 m	0	68	32	SM Arenas Limosas
1.5 m -2.00 m	1	25	74	MH Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos más elásticos.
2.00m-2.50 m	1	47	52	MH Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos más elásticos.

Nota. Resultado del análisis granulométrico sondeo 2. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 33.

Gráfica granulométrica sondeo 2



Nota. Gráfica del análisis granulométrico sondeo 2. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 39.

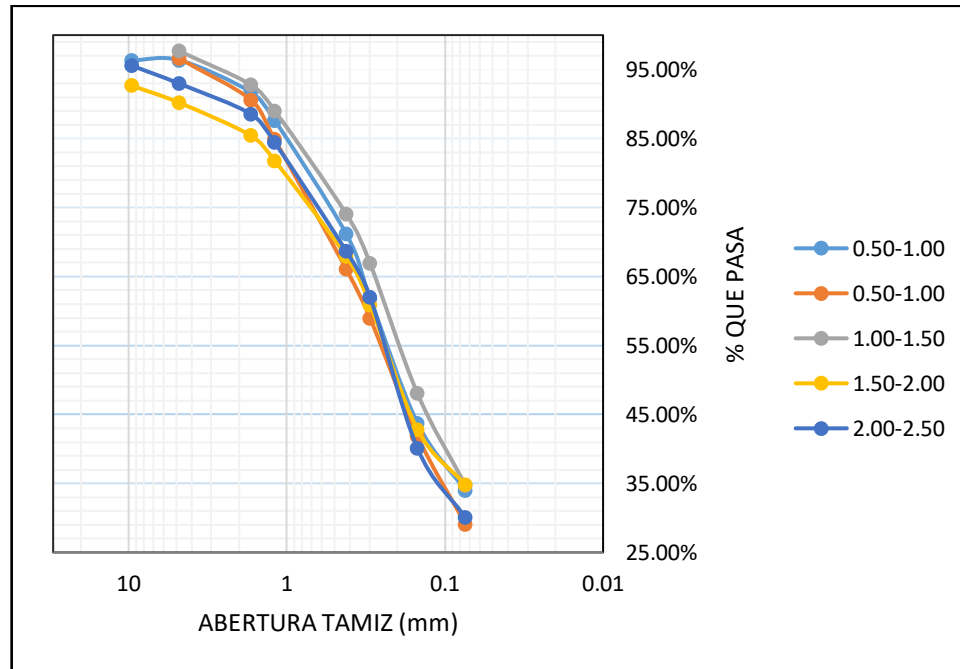
Resultado análisis granulométrico sondeo 3

Ubicación	% Gruesos	% Arenas	% Finos	Clasificación SUCS
0 m - 50 m	4	62	34	SC Arenas Arcillosas
0.50 m -1 m	3	68	29	SC Arenas Arcillosas
1 m -1.50 m	2	63	35	SC Arenas Arcillosas
1.5 m -2.00 m	10	55	35	SC Arenas Arcillosas
2.00m-2.50 m	7	63	30	SC Arenas Arcillosas

Nota. Resultado del análisis granulométrico sondeo 3. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 34.

Gráfica granulométrica sondeo 3



Nota. Gráfica del análisis granulométrico sondeo 3. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 40.

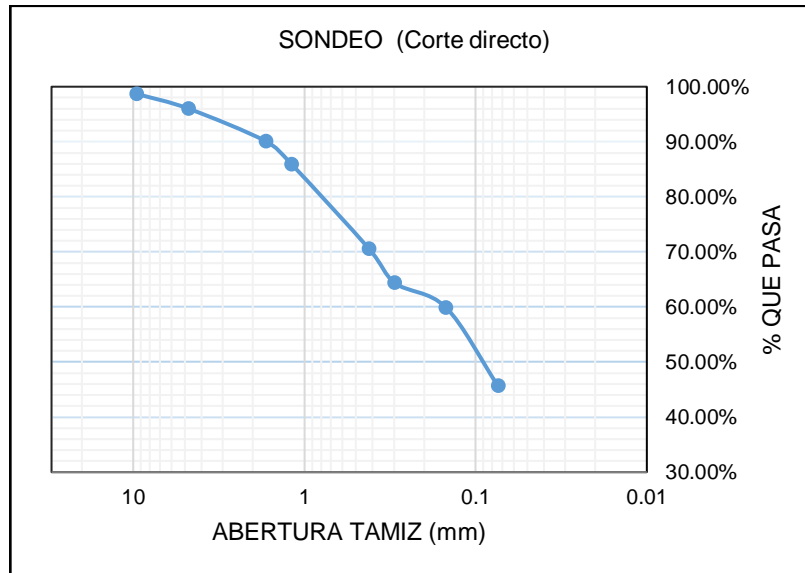
Resultado análisis granulométrico corte directo

Ubicación	% Gruesos	% Arenas	% Finos	Clasificación SUCS
14 m	4	50	46	SC Arenas Arcillosas

Nota. Resultado del análisis granulométrico corte directo. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 35.

Gráfica granulométrica (corte directo)



Nota. Gráfica del análisis granulométrico corte directo. Elaboración propia, realizado con Excel.

4.4.2.2. Límites de Atterberg y contenido de humedad natural

Los límites de Atterberg se establecieron con diferentes contenidos de humedad para las muestras alteradas e inalteradas provenientes de los ensayos de penetración estándar y para el ensayo de corte directo, se indican los resultados según la altura de extracción de cada muestra.

Tabla 41.*Resultado límites de Atterberg sondeo 1*

Ubicación	Limite liquido			Límite plástico	Humedad natural	% orgánico
0 m - 50 m	49 (18 golpes)	49 (25 golpes)	50 (32 golpes)	0	46.77 %	0 %
0.50 m -1 m	0	0	0	0	33 %	0 %
1 m -1.50 m	0	0	0	0	21.35 %	0 %
1.5 m -2.00 m	0	0	0	0	24.48 %	0 %
2.00m-2.50 m	0	0	0	0	17.72 %	0 %

Nota. Resultado de los límites de Atterberg para el sondeo 1 a cada 50 centímetros de profundidad. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 42.*Resultado límites de Atterberg sondeo 2*

Ubicación	Limite liquido			Límite plástico	Humedad natural	% orgánico
0 m - 50 m	43 (18 golpes)	45 (28 golpes)	46 (35 golpes)	0	19.09 %	0 %
0.50 m -1 m	36 (20 golpes)	36 (25 golpes)	37 (35 golpes)	0	18.3 %	0 %
1 m -1.50 m	33 (20 golpes)	34 (27 golpes)	35 (32 golpes)	0	13.62 %	0 %
1.5 m -2.00 m	53 (21 golpes)	54 (27 golpes)	55 (35 golpes)	0	22.47 %	0 %
2.00m-2.50 m	62 (35 golpes)	57 (25 golpes)	61 (35 golpes)	0	33.33 %	0 %

Nota. Resultado de los límites de Atterberg para el sondeo 2 a cada 50 centímetros de profundidad. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 43.

Resultado límites de Atterberg sondeo 3

Ubicación	Limite liquido			Límite plástico	Humedad natural	% orgánico
0 m - 50 m	0	0	0	0	35.42 %	0 %
0.50 m -1 m	0	0	0	0	16.6 %	0 %
1 m -1.50 m	0	0	0	0	19.66 %	0 %
1.5 m -2.00 m	0	0	0	0	19.89 %	0 %
2.00m-2.50 m	0	0	0	0	21.53 %	0 %

Nota. Resultado de los límites de Atterberg para el sondeo 3 a cada 50 centímetros de profundidad. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 44.

Resultado límites de Atterberg (corte directo)

Ubicación	Limite liquido			Límite plástico	Humedad natural	% orgánico
18 m	0	0	0	0	24.71 %	0 %

Nota. Resultado de los límites de Atterberg para el ensayo de corte directo. Elaboración propia, realizado con Excel.

Cuando la muestra de suelo resbala en la copa, y continúa resbalando, aunque se aumente el contenido de humedad o si el número de golpes requerido para cerrar la ranura es siempre menor que 25 golpes, se anota que el límite líquido no puede determinarse y se registrará como no plástico.

4.4.2.3. Ensayo de gravedad específica

La gravedad específica se obtiene dividiendo el peso unitario del material por el peso unitario del agua, debiendo realizarse el ensayo en los suelos que pasan el tamiz No.4. (Das, 2015).

Los resultados para cada ensayo de penetración estándar y para el ensayo de corte directo se presentan en la tabla 45, indicando la temperatura de la muestra y la gravedad específica promedio de cada ensayo.

Tabla 45.

Resultado gravedad específica ASTM D854-02

Muestra	GS	Temperatura DEL agua °C
Sondeo 1	0.81	18
Sondeo 2	1.11	18
Sondeo 3	0.94	18
Corte directo	0.62	18

Nota. Resultado de gravedad específica para todos los sondeos. Elaboración propia, realizado con Excel.

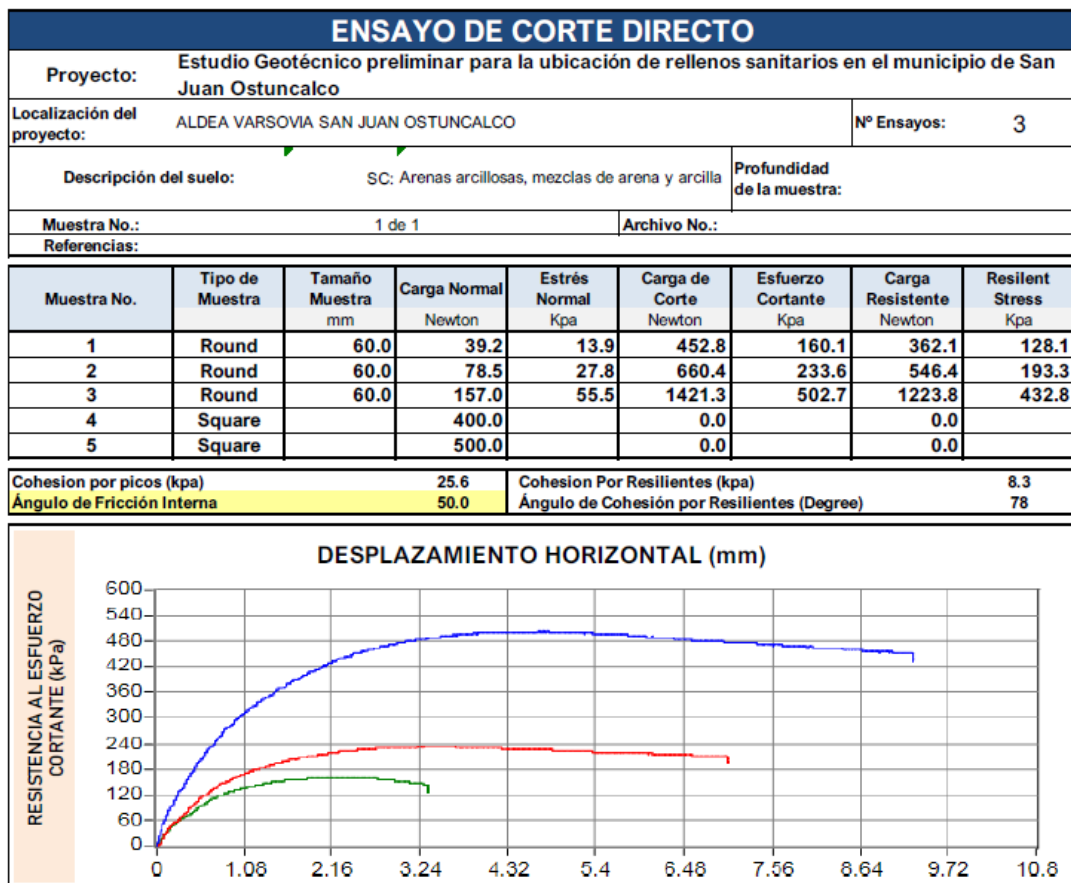
4.4.3. Ensayo de corte directo

Este ensayo se realiza únicamente en suelos que presentan cohesión ya que la fase de rotura se realiza en condiciones no drenadas, por lo anterior según la clasificación obtenida en los análisis granulométricos se realizó el sondeo en la superficie del talud correspondiente al sondeo 1.

Se realizaron 3 ensayos de la muestra inalterada estableciendo los siguientes resultados; se presenta un valor de ángulo de fricción interna de ϕ 50° y una cohesión aparente de $C_u = 0.26 \text{ kg/cm}^2$, (2.6 Ton/m²), la resistencia al corte del material es de 0.936 kg/cm^2 (9.36 Ton/m²), el ángulo de reposo del material es de 70°.

Figura 36.

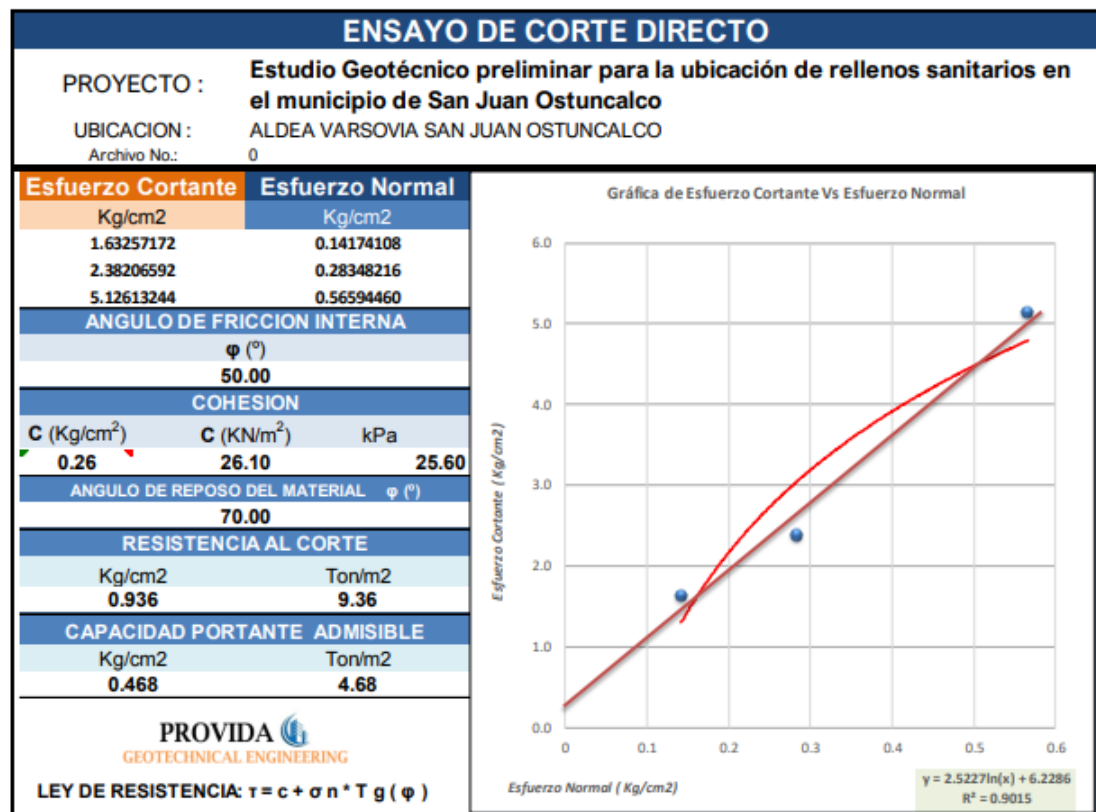
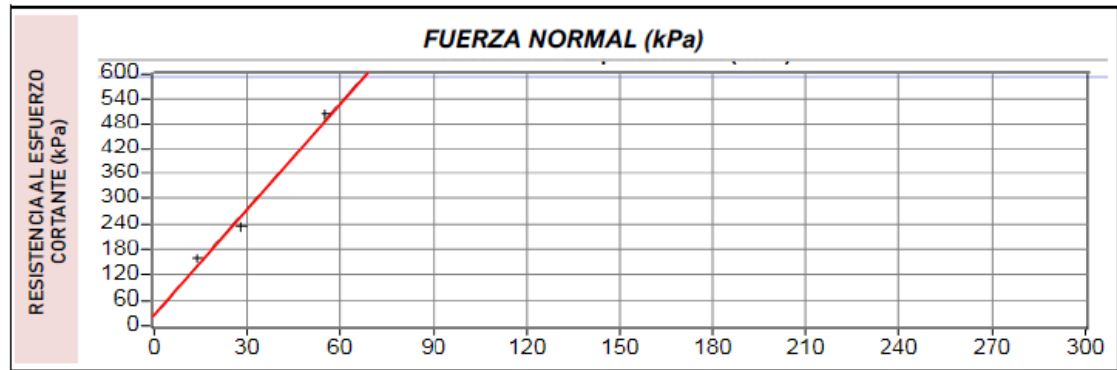
Resultados ensayo de corte directo



Nota. Resultado de corte directo. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.

Figura 37.

Gráfica corte directo y resumen de resultados



Nota. Resultado de corte directo. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.

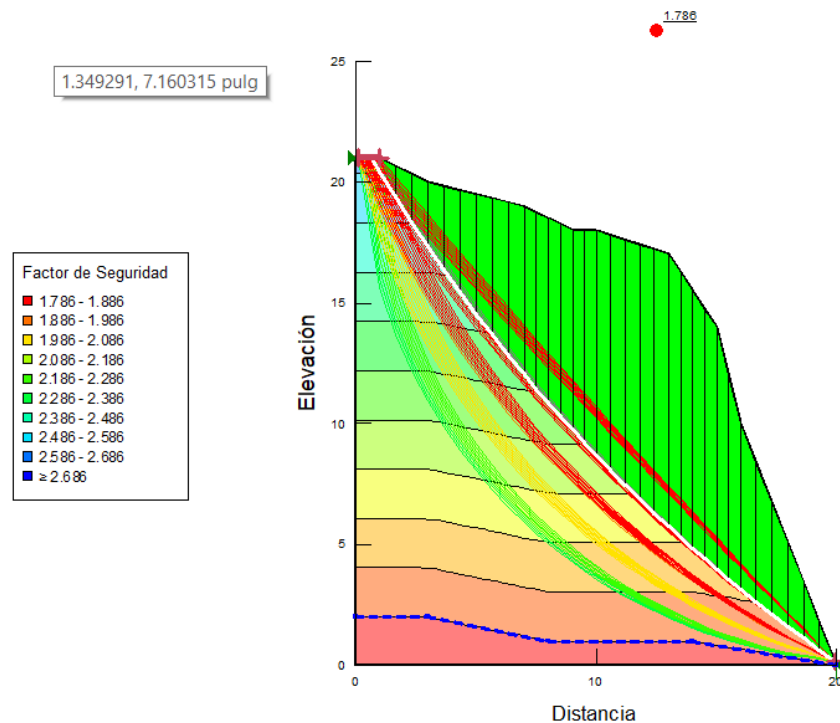
4.4.4. Análisis de estabilidad de talud

Con los resultados obtenidos en laboratorio y con el levantamiento topográfico del perfil del talud de la parte crítica se procedió a verificar la estabilidad, estableciendo los siguientes criterios de ingreso al *software*:

- Tipo de análisis: Morgenstern-Price
- Opción de función de fuerza entre rebanadas: Medio-Seno
- Peso unitario del agua: 9.80 KN/m^3
- Número de dovelas: 30

Figura 38.

Resultado análisis de estabilidad de talud perfil

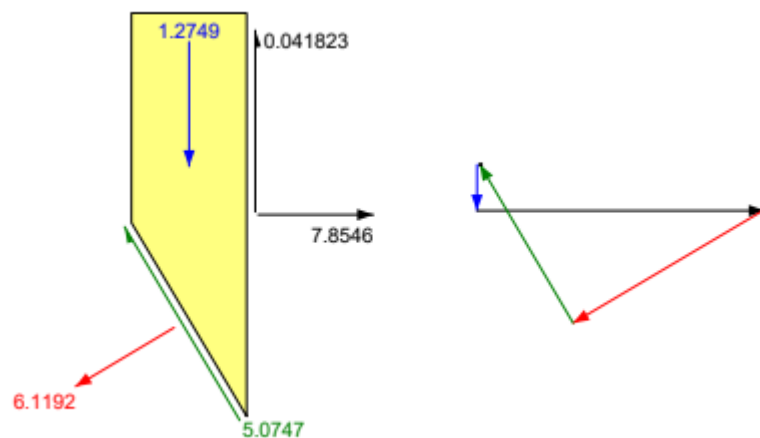


Nota. Análisis de estabilidad de talud perfil. Elaboración propia, realizado con Geostudio 2021.4.

El análisis indica que se tiene una superficie crítica en la dovela 27 con un factor de seguridad de 1.786, el volumen de la superficie de deslizamiento es de 121.41 m³, con un peso total de 1,726.4 KN, con una fuerza deslizante total de 850.4 KN, y una fuerza resistente total de 1,518.9 KN.

Figura 39.

Resultado análisis de estabilidad de talud



Nota. Análisis de estabilidad de talud. Elaboración propia, realizado con Geostudio 2021.4.

Según lo indicado en el artículo 10.3.2 de la Normas de Seguridad Estructural para Guatemala NSE 2.1-18 estudios geotécnicos. El factor de seguridad de un talud cuya falla no amenace la estabilidad de una edificación o de la vía pública podrá regirse por el criterio $FS \geq 1.5$ para cargas gravitacionales y $FS \geq 1.1$ para sismo ordinario. En este caso no existen edificaciones en la parte superior del talud.

Debe aplicarse también lo establecido en el punto 6.2.3 que indica: En condiciones estáticas el factor de seguridad para excavaciones temporales será

superior a 1.35 y para excavaciones permanentes será superior a 1.50. Para condiciones sísmicas el factor de seguridad será igual o superior a 1.10 para todos los casos (AGIES, 2018).

En este caso se cumple con el factor de seguridad establecido, por lo que se considera un talud estable.

4.4.5. Cálculo de asentamiento estimado del relleno sanitario

La correlación empírica aplicable para el relleno sanitario a ubicar en el municipio de San Juan Ostuncalco corresponde a la siguiente ecuación:

$$m = a - b \log t_1 \text{ (para rellenos de altura entre 12 y 24 m) (Ec. 3)}$$

- m está en m/mes (pies/mes)
- t_1 = es la edad media del relleno, en meses
- $a = 0.0268$
- $b = 0.0116$

El tiempo estimado en meses según la producción y el volumen disponible en la ubicación seleccionada es de 30 meses.

$$m = a - b \log t_1$$

$$m = (0.0268) - (0.0116) (\log 30)$$

$$m = 0.0096 \text{ m/mes}$$

Se estima un asentamiento de 0.0096 metros/mes, debiendo considerar la influencia de la correcta ejecución del relleno sanitario.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A partir de la investigación realizada se obtuvo un proceso para la selección de rellenos sanitarios, el proceso se resume en las actividades de la tabla 46, las mismas fueron extraídas de los resultados de selección en el municipio de San Juan Ostuncalco, cada actividad como parte del método puede contener subactividades dependiendo de cada caso.

Tabla 46.

Metodología del proceso de selección

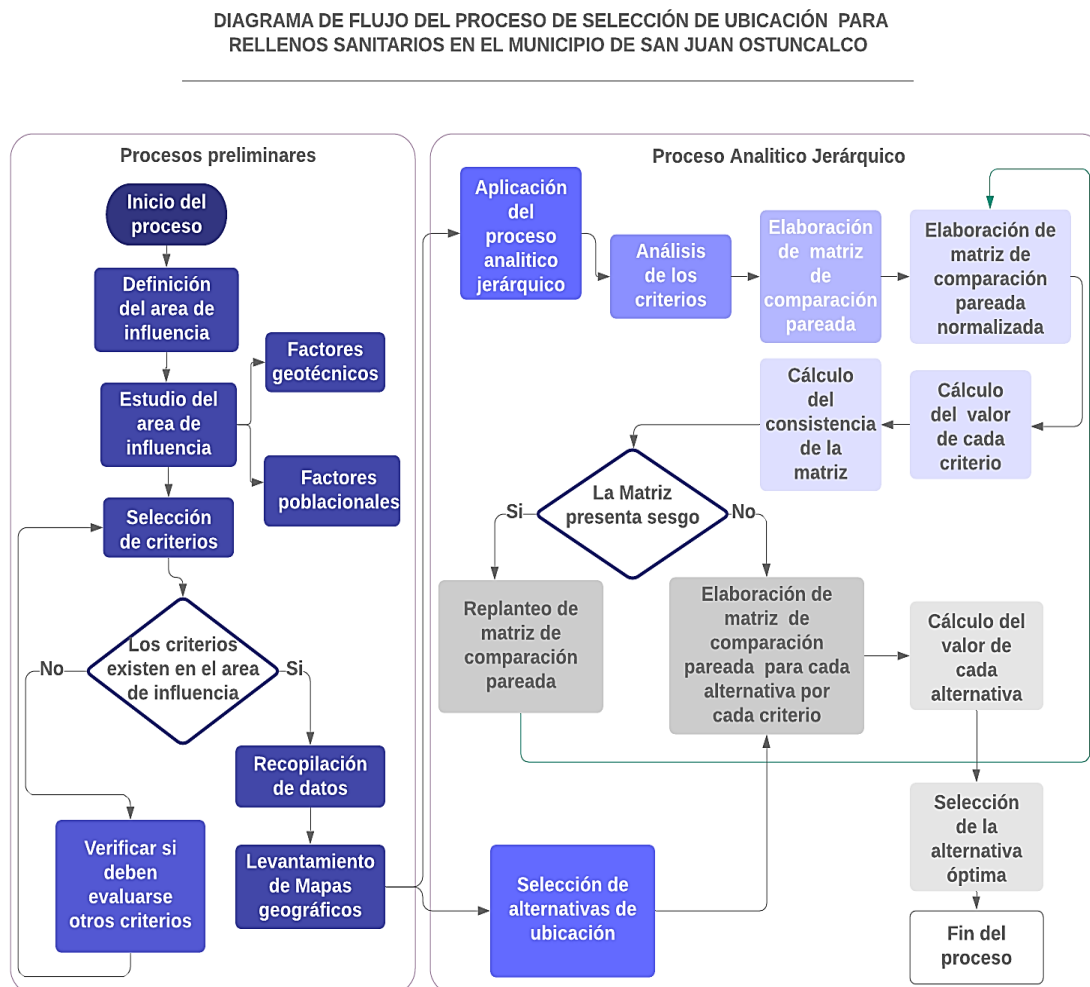
No.	Actividad
1.	Definición del área de influencia
2.	Estudio del área de influencia
2.1	Factores geológicos
2.2.	Factores poblacionales
3.	Selección de criterios para ubicación de rellenos sanitarios.
4.	Levantamiento de mapas según los criterios.
5.	Aplicación del proceso analítico jerárquico.
5.1.	Análisis de los criterios.
5.2.	Elaboración de matriz de comparación pareada.
5.3.	Elaboración de matriz de comparación pareada normalizada.
5.4.	Cálculo del valor de cada criterio.
5.6.	Cálculo de consistencia de la matriz.
5.7.	Selección de alternativas de ubicación según el levantamiento de mapas.
5.8.	Elaboración de matriz de comparación pareada para cada alternativa por cada criterio.
5.9	Cálculo de valor para cada alternativa.
5.10	Selección de la alternativa óptima.

Nota. Metodología propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

De forma general las actividades del proceso se relacionan entre sí según el diagrama de flujo de la figura 26, considerando que deben existir verificaciones y controles durante el proceso.

Figura 40.

Diagrama de flujo del proceso de selección para rellenos sanitarios



Nota. Diagrama de flujo del proceso de selección para rellenos sanitarios en el Municipio de San Juan Ostuncalco. Elaboración propia, realizado con Lucidchart.

Las actividades y el diagrama de flujo constituyen una metodología para selección de rellenos sanitarios aplicable al Municipio de San Juan Ostuncalco, sin embargo, al constituirse por actividades generales y por contar con criterios y alternativas variables, la metodología puede aplicarse a otras áreas similares, incluyendo criterios y alternativas diferentes a las propuestas en este estudio.

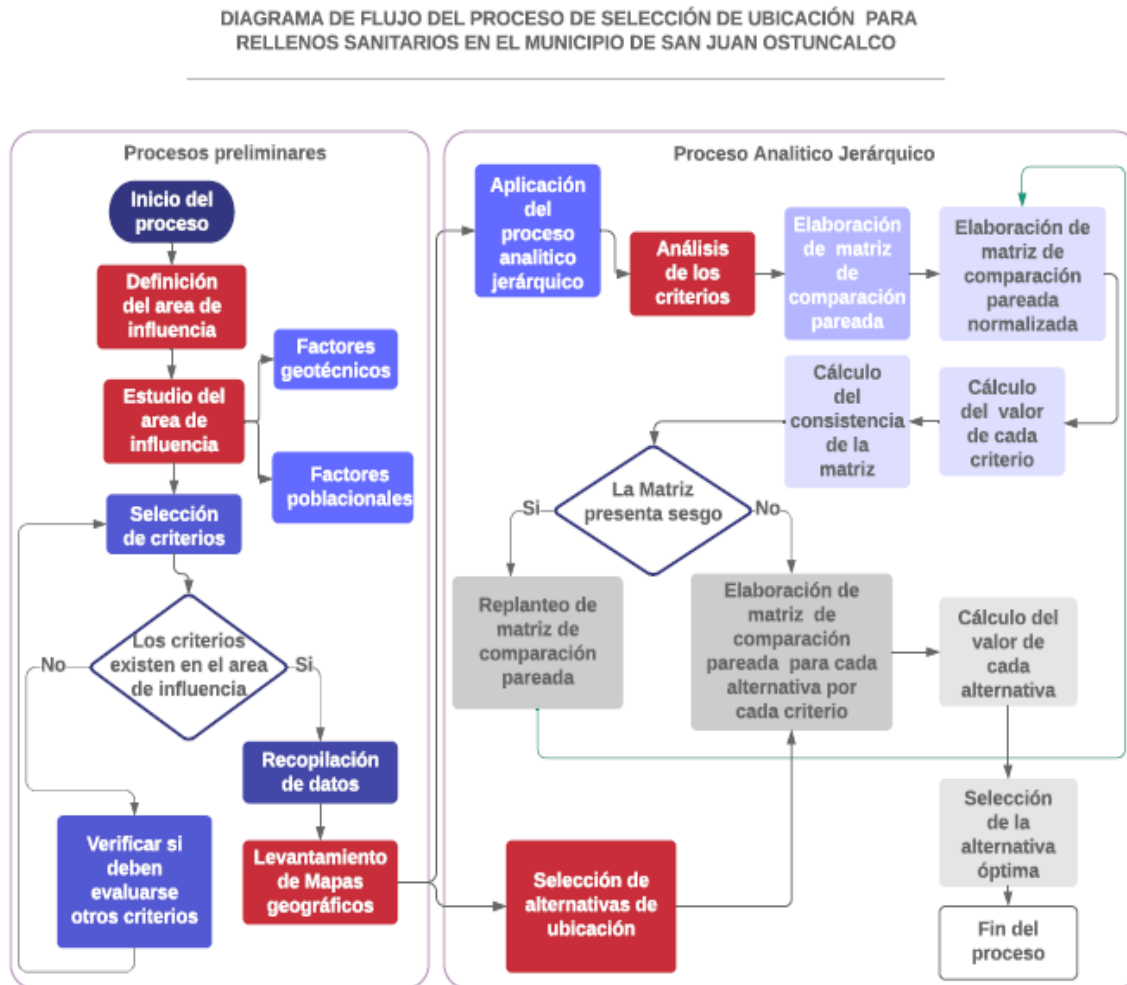
Dentro del proceso se identificaron las actividades críticas para la selección de sitios, los resultados de estas actividades rigen la facilidad o dificultad del proceso de selección, las actividades identificadas durante el proceso fueron las siguientes:

- Definición del área de influencia
- Estudio del área de influencia
- Levantamiento de mapas geográficos
- Selección de las alternativas de ubicación
- Análisis de los criterios

Las actividades específicas del estudio del área de influencia y los levantamientos de mapas o actividades preliminares, en muchos municipios corresponden a planes territoriales, facilitando en estos casos la aplicación de la metodología de selección, para el municipio de San Juan Ostuncalco no se contó con mapas específicos geográficamente referenciados, sin embargo, en el municipio se han realizado estudios complementarios para la realización del proceso. Las actividades propias del proceso analítico jerárquico como la selección de criterios y alternativas de ubicación dependen no únicamente de los factores geotécnicos y poblacionales, siendo posible ampliarlos factores, el método analítico jerárquico permite al decisor indicar cuál criterio y alternativa es preferible sobre otra, en la figura 41 se identifican las actividades críticas identificadas en el proceso de selección.

Figura 41.

Actividades críticas del proceso de selección



Nota. Metodología propuesta (ruta crítica). Elaboración propia, realizado con Lucidchart.

Los 8 criterios evaluados proporcionan una referencia adecuada para evaluar y seleccionar sitios para la ubicación de rellenos sanitarios, el proceso planteado cumple de manera efectiva con el análisis de consistencia, utilizando el proceso analítico jerárquico fue posible realizar la selección de forma objetiva sin sesgos durante el proceso de decisión, por lo tanto, la metodología planteada

puede considerarse pertinente para este tipo de evaluación. Debe considerarse que existen factores económicos, de tramitología, legales y sociales que pueden ser determinantes para la ejecución del proyecto, estos factores no han sido evaluados en el presente estudio, sin embargo, deben verificarse por las autoridades municipales para la factibilidad del proyecto.

Los valores obtenidos de cada alternativa indican que la alternativa 1, con el 41.58 % es la que cumple porcentualmente de mejor manera con los 8 criterios planteados, seguida de la alternativa 3 con un 34.39 % y por último la 2 alternativa 24.03 %.

Tabla 47.

Cuadro comparativo de alternativas

Factores de análisis	Alternativa (1)	Alternativa (2)	Alternativa (3)
Coordenadas	14°53'36.92"N 91°37'46.13"W	Latitud 14°52'41.34"N Longitud 91°40'25.39"O	Latitud 14°51'33.67"N Longitud 91°40'41.71"O
Geología General	Rocas volcánicas no diferenciadas: andesitas, basaltos, riolitas, tobas y conglomerados laháricos.	Rocas volcánicas no diferenciadas: andesitas, basaltos, riolitas, tobas y conglomerados laháricos.	Rocas volcánicas no diferenciadas: andesitas, basaltos, riolitas, tobas y conglomerados laháricos.
Acuífero	Acuífero de Quetzaltenango	Acuífero de Quetzaltenango	Acuífero de Quetzaltenango
Pendientes	Altitud entre 2510 y 2500 msnm	Altitud entre 2800 msnm	Altitud entre 2990 y 3,000 msnm

Continuación de la tabla 47.

Factores de análisis	Alternativa (1)	Alternativa (2)	Alternativa (3)
Corrientes superficiales	Distancia a corriente más cercana 389.48 m	Distancia a corriente más cercana 288.55 m	Distancia a corriente más cercana 413.66 m
Amenaza por deslizamientos	Fuera de área de amenaza por deslizamiento	Fuera de área de amenaza por deslizamiento	Fuera de área de amenaza por deslizamiento
Amenaza por inundación	Fuera del área de amenaza por inundación.	Fuera del área de amenaza por inundación.	Fuera del área de amenaza por inundación.
Distancia de áreas protegidas	296 m	1354 m	2235 m
Área mínima para la implementación	4850 m ²	5320 m ²	2185 m ²

Nota. Cuadro comparativo de las características de cada alternativa propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 42.

Localización de alternativa seleccionada



Nota. Fotografía de ubicación de alternativa seleccionada. Obtenido de Google Earth (2022).

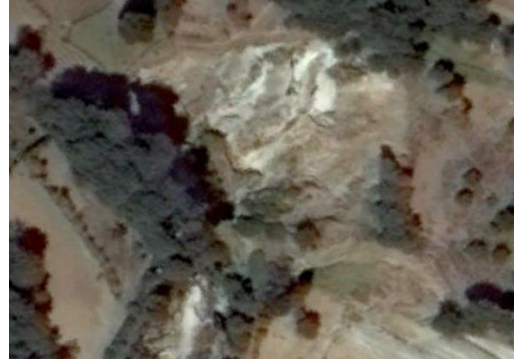
Mapa. (<https://www.google.com/intl/es-419/earth/>), consultado el 10 de marzo de 2022.

Figura 43.

Fotografías aéreas del área seleccionada



Año 2005



Año 2016



Año 2018



Año 2021

Nota. Fotografía de ubicación de alternativa seleccionada a través de los años. Obtenido de Google Earth (2022). Mapa. (<https://www.google.com/intl/es-419/earth/>), consultado el 10 de marzo de 2022

Debido a la topografía de la zona, el tipo de relleno a implementar debe ser un relleno combinado, tipo mecanizado por los volúmenes de desechos sólidos producidos en el municipio.

No existen fallas geológicas determinantes en el área, y la composición es de depósitos piroclásticos y sedimentos aluviales, principalmente depósitos de ignimbritas y pómez esto según el Mapa Geológico General Nacional y la

clasificación realizada por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), por medio de la Unidad de Políticas e Información Estratégica (UPIE).

A los depósitos de los flujos piroclásticos se les conoce también como ignimbritas, el acuífero superior en esta zona se encuentra entre 7 y los 98 metros de profundidad, basándose en lo descrito por Herrera, Manzo y Hernández, (2016). Dentro de la investigación se identificó el pozo más cercano se encuentra a 900 metros de distancia y se encuentra a una altitud de 2520 m, la alternativa seleccionada se encuentra a 2509 m, presentando un nivel estático a los 407 pies.

Ninguna de las alternativas cumple con el criterio de área según la proyección del volumen de desechos sólidos, la alternativa seleccionada puede cubrir la demanda para un tiempo de 2.5 años, se encuentra fuera de las zonas de amenaza por inundación o deslizamiento establecidas por la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres y los mapas de amenazas (deslizamiento, inundaciones, licuefacción, amenaza sísmica y volcánica) de INSIVUMEH (proyecto JICA).

La alternativa seleccionada no se encuentra en un área establecida como protegida, cuenta con acceso directo a una vía de acceso principal y se encuentra a 0.77 kilómetros del centro poblado más cercano la aldea Varsovia, se encuentra fuera del área de influencia del río Naranjo.

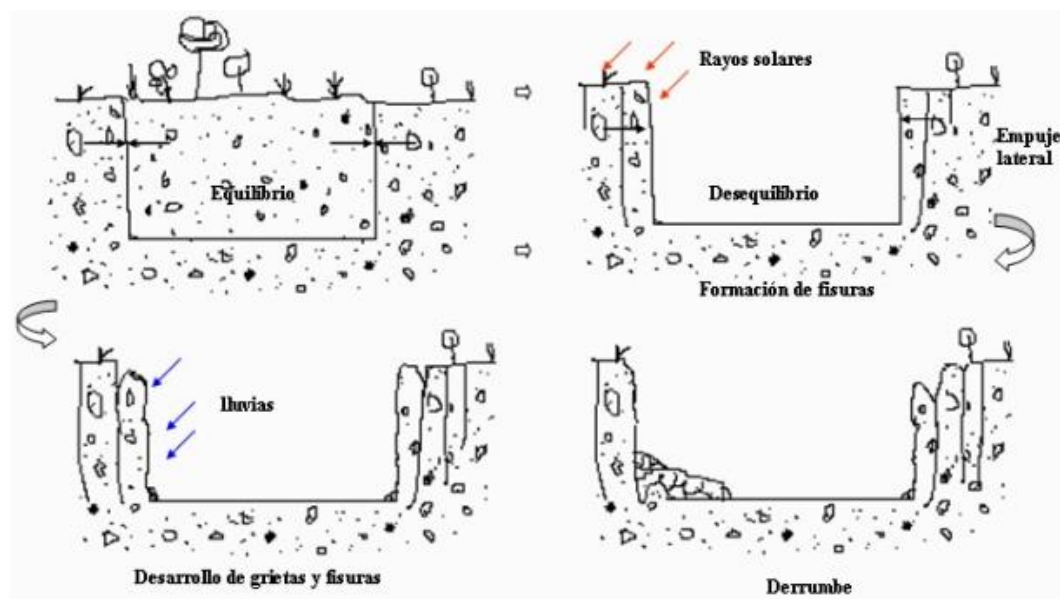
El proceso analítico jerárquico dio como resultado que la alternativa 1 es la que cumple de mejor manera con los criterios evaluados, sin embargo según los criterios analizados existen otras ubicaciones dentro del territorio en los que se puede implementar este tipo de proyectos siendo importante definir la demanda que la Municipalidad de San Juan Ostuncalco puede cubrir según sus

recursos económicos para realizar un replanteo del área proyectada y definir otras alternativas de posibles ubicaciones.

Existe contenido de fragmentos de pómez en las ignimbritas, por las propiedades del suelo los taludes permanecen casi verticales, comportándose como macizos rocosos, en los que las fallas se generan por vuelco cuando el suelo presenta una matriz gruesa en su composición, en los que se separan fracciones paralelas al talud.

Figura 44.

Mecanismo de ruptura en ignimbritas de textura gruesa



Nota. Mecanismo de falla de ignimbritas de textura gruesa. Adaptado de Hernández (2004). *Características geomecánica y vulcanológicas de las tefras de Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango*. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo digital. <https://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00079/doc00079.htm>

5.1. Análisis de los resultados del estudio geotécnico de la ubicación seleccionada

A partir de la visita a la ubicación seleccionada se definieron los análisis a realizar para el estudio geotécnico, estableciendo como análisis principales la clasificación del suelo, el análisis del valor soporte, y la estabilidad del talud adyacente, obteniendo los siguientes resultados:

Del análisis granulométrico practicado a las diferentes muestras se obtuvo que la composición de las muestras presenta un contenido en su mayoría de arenas y finos, clasificándose según el sistema unificado de clasificación de suelo, como arenas, limosas y arcillosas en su mayoría, de las muestras extraídas se intentó obtener los límites de consistencia sin embargo en la mayoría de muestras extraídas incluyendo la muestra obtenida del talud no se pudieron obtener los mismos debido a la inexistencia de finos plásticos. A partir de esta clasificación se definió que el mecanismo de posible falla al tratarse de ignimbritas con contenido de pómez pero con granulometría fina es por posible deslizamiento, por lo que se procedió a verificar la estabilidad del talud que tenía incidencia sobre la ubicación seleccionada.

De los resultados del ensayo de corte directo se obtuvo un ángulo de fricción interna de 50° , una cohesión de 0.26 kg/cm^2 , con una resistencia al corte de 0.936 kg/cm^2 , es importante notar que a pesar de no contar con finos plásticos según el resultado de los límites de consistencia existe una cohesión por las características específicas del suelo.

Se realizó el análisis de estabilidad del talud que tiene incidencia en el área del proyecto utilizando los datos obtenidos del ensayo de corte directo, los resultados de cohesión, ángulo de fricción interna y peso específico del material,

se aplicó el método de Morgenstern y Price, por medio del *software*, SLOPE/W, en el análisis se tomó en cuenta la presión de poro para realizar la evaluación, dando como resultado una superficie crítica con factor de seguridad de 1.786, siendo el mismo superior a 1.5 que es lo solicitado por la Norma de Seguridad Estructural NSE 2.1 referente a estudios geotécnicos, considerando que se trata de un talud estable.

Se realizó el cálculo de asentamiento según lo establecido por la correlación empírica, obteniendo un asentamiento de 0.0096 m/mes, el mismo se considera como un valor bajo por ser un relleno sanitario relativamente pequeño.

Los suelos granulares, especialmente los suelos arenosos saturados, grano fino y graduación uniforme, pueden sufrir del fenómeno denominado licuefacción o licuación del suelo (AGIES, 2018).

Para que se dé el fenómeno de la licuefacción el suelo debe encontrarse saturado o cerca de la saturación, por lo anterior se recomienda la realización de un estudio hidrogeológico detallado con estudios geofísicos para determinar el comportamiento del agua en la unidad de estudio.

Dentro del parámetro de susceptibilidad de licuefacción se indica la edad geológica del terreno, en este caso las formaciones pertenecen al pleistoceno que se consideran menos susceptibles al fenómeno, sin embargo, ya que se cumplen con muchos de los parámetros de susceptibilidad establecidos en la Norma de Seguridad Estructural NSE 2.1, se recomienda realizar la evaluación de potencial licuefacción.

De los resultados correlacionados de los ensayos de penetración estándar en la base donde se busca implementar el relleno sanitario, se estableció que la capacidad soporte del suelo es mayor a la carga proyectada.

Los resultados del estudio geotécnico presentados constituyen la base para la elaboración del estudio geotécnico definitivo, sin embargo, el estudio geotécnico especial IV, debe realizarse según los parámetros establecidos en la Norma de Seguridad Estructural NSE 2.1, y por el equipo de profesionales que se indica en la misma.

5.2. Elementos geotécnicos a evaluar en rellenos sanitarios para el municipio de San Juan Ostuncalco

Se definen los siguientes elementos básicos que deben de evaluarse al analizar una ubicación para relleno sanitario en el municipio de San Juan Ostuncalco:

- Clasificación del suelo por el sistema unificado de clasificación de suelos, se debe incluir la edad geológica del terreno para establecer la susceptibilidad de licuefacción, también es importante establecer si la granulometría es uniforme.
- Análisis amenazas por remociones en masa, definiendo el tipo de análisis dependiendo de la unidad geomorfológica que tenga incidencia en el proyecto, realizando análisis de estabilidad de taludes o análisis de macizo rocoso.
- Evaluación de susceptibilidad a licuefacción, según lo establecido en el artículo 9.2 de la Norma de Seguridad Estructural NSE 2.1, si el suelo es

susceptible debe seguirse lo establecido en el artículo 9.3 para la evaluación del potencial de licuefacción (AGIES, 2018).

- Se debe evaluar las fallas estructurales o tectónicas, detallando sus características según lo establecido en la Norma de Seguridad Estructural NSE 2.1, en el capítulo 8.
- Análisis de la capacidad soporte del suelo.
- Realización de un estudio hidrogeológico completo.
- Análisis de permeabilidad, para diseño del relleno sanitario.

5.3. Actividades recomendadas para el estudio geotécnico

Los rellenos sanitarios no se encuentran especificados dentro de las clasificaciones de la Norma de Seguridad Estructural NSE 1, estableciéndose según la misma norma como obras ordinarias, debiendo realizar el estudio geotécnico especial tipo II como estudio geotécnico definitivo, sin embargo, en este caso, debido a la cercanía del talud debe recategorizarse como un estudio especial tipo IV. Según los resultados obtenidos en el estudio geotécnico inicial se debe verificar el potencial de licuefacción según el procedimiento establecido en la Norma de Seguridad Estructural NSE 2.1, realizar un estudio hidrogeológico detallado, y evaluar la incidencia en los procesos de meteorización en el talud adyacente según el mecanismo de ruptura de las ignimbritas que conforman el mismo.

5.3.1. Análisis de funcionamiento y cierre del relleno

Para el relleno sanitario propuesto deben considerarse otros aspectos importantes a evaluar para la optimización del sistema y la finalización del relleno sanitario:

- Generación y captura del biogás

Los lugares de disposición de residuos sólidos son considerados fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos importantes, como resultado de la degradación de los desechos orgánicos, generando metano, dióxido de carbono y trazas de compuestos orgánicos volátiles, la captura del biogás puede reducir en gran manera los efectos nocivos del relleno sanitario, en combinación con un sistema de clasificación y compostaje.

El biogás capturado puede ser aprovechado debiendo realizar algunos procesos según se destine el aprovechamiento, debiendo aplicar un proceso de filtrado para eliminar el vapor de agua y partículas, para su uso en motores, turbinas, y hornos, para su aprovechamiento como gas natural sintético se requiere un proceso de acondicionamiento, en el que se debe eliminar el amoníaco, el sulfuro de hidrógeno, y separar el dióxido de carbono.

Para el cálculo de la producción del biogás existen modelos desarrollados internacionalmente con los que se puede estimar la producción y así determinar la factibilidad del aprovechamiento del biogás, siendo primordial el diseño y el manejo de los residuos orgánicos.

- Proceso de cierre y recuperación

Para la ejecución de un proceso de cierre, deben ejecutarse las revisiones correspondientes para garantizar la seguridad de relleno sanitario, evaluando la estabilidad del relleno, realizando el tratamiento del biogás y los lixiviados, tomando en cuenta que después de la etapa de aprovechamiento del biogás, deberá seguirse con un monitoreo constante por el gas remanente.

El sitio del relleno al finalizar la etapa del cierre, garantizando su seguridad, puede ser utilizado como un sitio de esparcimiento o recreación, no habitable.

CONCLUSIONES

1. La metodología propuesta se basó en un proceso de selección utilizando el método multicriterio Analítico jerárquico, por su compatibilidad con análisis territoriales, a partir de esta selección se realizó el reconocimiento preliminar, en el que se definieron los elementos que deben evaluarse para la implementación de rellenos sanitarios siendo estos, una clasificación adecuada del suelo incluyendo la edad geológica, un análisis de amenazas que tengan incidencia en el sitio, evaluar los parámetros para verificar la susceptibilidad a licuefacción, una evaluación de fallas estructurales o tectónicas, y un análisis de capacidad de carga del suelo.
2. Los criterios para la selección de ubicaciones de rellenos sanitarios, dependerá primordialmente de los elementos presentes en el área de estudio, la magnitud del proyecto, la normativa aplicable y la demanda requerida, para el caso de San Juan Ostuncalco los criterios para el proceso de selección con mayor incidencia fueron la cercanía a corrientes superficiales y las áreas establecidas como expuestas a deslizamientos o inundaciones, y las áreas forestales establecidas en el plan de ordenamiento territorial.
3. La aplicación del método analítico jerárquico, en la selección de ubicación de rellenos sanitarios, facilita la toma de decisiones y permite evaluar múltiples criterios de forma simultánea, siendo preferible la aplicación de sistemas de información geográfica, puesto que se trata de un análisis territorial, a partir de su aplicación se estableció que existen alternativas

que cumplen con los criterios de selección para la implementación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.

4. Los rellenos sanitarios se clasifican como obras ordinarias según lo indicado en la Norma de Seguridad Estructural NSE 1, para esta clasificación se debe realizar el estudio geotécnico especial tipo II, en este caso se determinó que un talud que tiene incidencia en el área de estudio, por lo que debe recategorizarse el estudio a especial tipo IV. sin embargo, se debe verificar el potencial de licuefacción según el procedimiento establecido en la Norma de Seguridad Estructural NSE 2.1, ya que se cumplen con algunos parámetros de susceptibilidad de licuefacción.

RECOMENDACIONES

1. Aplicar el método multicriterio analítico jerárquico provee de una evaluación a nivel general del territorio, en la que no se pueden evaluar las características específicas, sin embargo, a partir de esta se pueden establecer las posibles ubicaciones que responden a un análisis territorial integrando, y el reconocimiento preliminar proporciona los parámetros que deben evaluarse en el estudio geotécnico definitivo, por lo que deben efectuarse ambos análisis en el proceso de selección.
2. Evaluar los criterios de selección en procesos de ubicación para rellenos sanitarios es primordial para su correcta aplicación, siendo recomendable basarse en la normativa aplicable, geología, geomorfología y en los objetivos planteados en los planes territoriales del área de estudio.
3. Aplicar el método multicriterio, analítico jerárquico para la selección de ubicación para rellenos sanitarios se considera un análisis territorial que depende principalmente de la información georreferenciada y el detalle de la misma, por lo que es necesario mejorar la calidad de la información, para facilitar los procesos de selección.
4. Ejecutar el análisis geotécnico se determinó que, se cumplen con algunos parámetros de susceptibilidad de licuefacción, a pesar de que la edad geológica del terreno pertenece al pleistoceno, que es menos susceptible al fenómeno, debiendo considerar incluir dentro del estudio geotécnico definitivo, la evaluación de potencial licuefacción, y un análisis hidrogeológico.

REFERENCIAS

- Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional & The Nature Conservancy (2016). *Plan Municipal de Adaptación al Cambio Climático del municipio de San Juan Ostuncalco, Quetzaltenango*. <https://nexoslocales.com/wp-content/uploads/2017/01/PMACC-Ostuncalco-1-1.pdf>
- Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (2018). *Estudio de factibilidad de tratamiento de desechos sólidos de manera mancomunada mancomunidad de municipios metrópoli de los altos, MMMA*. <https://nexoslocales.com/wp-content/uploads/2019/01/MMMA-FINAL.pdf>
- Aparicio, F., (2010). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa.
- Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (2010). *Normas Estructurales de Diseño y Construcción Recomendadas para la República de Guatemala Edición 2010*. https://www.agies.org/wp-content/uploads/2019/02/agies_nse-10-indice-general.pdf
- Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (2018). *Normas Estructurales de Diseño y Construcción Recomendadas para la República de Guatemala. Edición 2018*. <https://www.agies.org/biblioteca-agies/normas-de-seguridad-estructural/>
- Braja, D. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cengage Learning.

Care Guatemala. (1998). *Proyecto urbano de manejo de residuos Sólidos y protección ambiental U-sweep*.
<http://habitat.aq.upm.es/dubai/00/bp579.html>

Código de Salud. Decreto 90-97. (3 de noviembre de 1997). Congreso de la República de Guatemala. Diario de Centroamérica, No. 71. Guatemala.
<http://leydeguatemala.com/codigo-de-salud/58/>

Código Municipal. Decreto número 12-2002. (13 de abril de 2002). Congreso de la República de Guatemala, Diario de Centroamérica No. 12 tomo CCLXIX. Guatemala.
https://www.congreso.gob.gt/assets/uploads/info_legislativo/decretos/2002/gtdcx12-2002.pdf

Consejo Nacional de Áreas Protegidas (1999). *Estrategia Nacional para la Conservación y el uso sostenible de la biodiversidad y plan de acción de Guatemala*. <https://www.cbd.int/doc/world/gt/gt-nbsap-01-es.pdf>

Cross, P., Michaud, F., Fourcade, E., & Jacques F. (1998). Sedimentological evolution of the Cretaceous carbonate platform of Chiapas [Evolución sedimentológica de la plataforma carbonatada del Cretácico de Chiapas]. *Journal of South American Earth Sciences*, (11), 311-332.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0895981198000224>

Das, B. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learning.

Giménez, M. y Cardozo, C., (2012). *Localización óptima de relleno sanitario aplicando técnicas multicriterio en sistemas de información geográfica, en el área metropolitana del Alto Paraná.*
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26832>

Helvetas Guatemala (2009). *Parque Regional Municipal San Juan Ostuncalco.*
<https://conap.gob.gt/wp-content/uploads/2019/10/PM-PRM-San-Juan-Ostucalco.pdf>

Hernández, W. (2004). *Características geomecánica y vulcanológicas de las tefras de Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo digital.
<https://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00079/doc00079.htm>

Herrera, I. y Orozco, E. (18 al 21 de octubre de 2016). Hidrogeología del acuífero volcánico del valle de Quetzaltenango, altiplano occidental de Guatemala. [Ponencia]. *XII Conferencia Científica Internacional UNICA 2016*. Cuba. <https://reddolac.org/events/xii-conferencia-cient-fica-internacional-unica-2016>

Herrera, I., Manzo, D. y Hernández, E., (2016). *Estudio Hidrogeológico de los Acuíferos Volcánicos de la República de Guatemala*. Instituto de Investigaciones Agronómicas y Ambientales.
<https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puina/INF-2016-05.pdf>

Instituto Geográfico Nacional (1977). *Mapa Geológico de la República de Guatemala.*
<https://www.ign.es/web/catalogocartoteca/resources/html/001971.html>

Instituto Geográfico Nacional, (2006), *Mapas temáticos y Ortofotos de la República de Guatemala*. <http://ide.segeplan.gob.gt/geoservicios.html>

Jaramillo, J., (1993). *Una solución para la disposición final de residuos sólidos municipales en pequeñas poblaciones*. Universidad de Antioquia, https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/55275/OPSCEPISPUB0293_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Juárez, E. y Rico, A. (2005). *Mecánica de Suelos I: Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. Limusa.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (2001). *Plan de Emergencia para la Prevención y Mitigación de Daños Causados por Desastres Naturales*. <https://www.maga.gob.gt/download/plan-prevencion.pdf>

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2016). *Monitoreo de Residuos Sólidos Municipales 2016*.

Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental. Acuerdo Gubernativo número 137-2016. (11 de julio de 2016), Congreso de la República. Diario de Centroamérica No. 73 tomo CCCXIII. Guatemala.

Saaty, T. (1994) *How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process*. [Cómo tomar una decisión: el proceso de jerarquía analítica]. Interfaces.

Tacam, J. (2011). *Modelo Conceptual del Acuífero Libre del Valle de Quetzaltenango, Ciudad de Quetzaltenango, Guatemala*. [Tesis de maestría, Universidad del Valle]. Archivo digital.

<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7692/1/7720-0445524.pdf>

APÉNDICES

Apéndice 1.

Fotografía 1 del botadero actual



Nota. Fotografía 1 del botadero actual, como referencia del manejo de los residuos sólidos.
Elaboración propia.

Apéndice 2.

Fotografía 1 del botadero actual



Nota. Fotografía 2 del botadero actual, como referencia del manejo de los residuos sólidos.
Elaboración propia.

Apéndice 3.

Fotografía 3 del botadero actual




Nota. Fotografía 3 del botadero actual, como referencia del manejo de los residuos sólidos.
Elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1.

Boleta de seguimiento MARN






BOLETA DE BASUREROS DE LOS MUNICIPIOS
DEL DEPARTAMENTO DE QUETZALTENANGO

TÉCNICO	Fernando Castillo		FECHA LEVANTAMIENTO	07-11-2016		NO BOLETA:	15-2016	
DEPARTAMENTO:	Quetzaltenango		MUNICIPIO:	SAN JUAN OSTUNCALCO				
COMUNIDAD:	Aldea Monrovia							
COORDENADAS: A) GEOGRÁFICAS	LAT		14° 54' 43.2"		LONG	91° 38' 02.8"		
B) UTM	X	0646915		Y	1649135			
ÁREA QUE OCUPA:	7000 M ²		VOLUMEN APROXIMADO:	6.300 ton.				
TONELADAS SEMANALES:	218		TONELADAS DIARIAS:	31				
TIPO DE BASURERO:	MUNICIPAL		TREN DE ASEO ÁREA URBANA:	SI				
TREN DE ASEO ÁREA RURAL:	NO		COBRO POR SERVICIO:	Q. 8.00				
COBERTURA DE RECOLECCIÓN R.S.:	CASCO URBANO							
DÍA DE RECOLECCIÓN D. S.:	DE LUNES A SABADO Y DOMINGO MERCADOS							
RECEPCIÓN DE D.S.:	GRANEL, BOLSAS COSTALES							
TRANSPORTE DE D.S.:	CAMION							
PROPIETARIO DEL BASURERO:	MUNICIPAL							

OBSERVACIONES

Este basurero se inauguró el 16 de febrero del 2015. Alrededor hay casas, escuelas, mal olor, moscas, niños recogiendo juguetes y plásticos. La Municipalidad está gestionando un vertedero de desechos sólidos en este lugar.

[@marngt](#)

[/marngtambiente](#)

www.marn.gov.gt

MINISTERIO DE AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

24 AVENIDA 12-75 ZONA 3, QUETZALTENANGO PBX: 77676001

Quetzaltenango@marn.gov.gt

Nota. Boleta de seguimiento de manejo de desechos sólidos de municipios del departamento de Quetzaltenango. Adaptado del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2016). *Monitoreo de Residuos Sólidos Municipales 2016.*

Anexo 2.

Resultados de laboratorio 1

1. INTRODUCCIÓN

Se realiza el presente informe geotécnico del **PROYECTO:** Estudio Geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco. **UBICACIÓN:** ALDEA VARSOVIA SAN JUAN OSTUNCALCO.

La parcela tiene su topografía podemos indicar que es semi-inclinado.



Fotografía 1 Vista de la topografía del área del proyecto
Fuente: Elaboración propia.

Se pretende con el mismo analizar en el área a construir el proyecto con todos los aspectos que desde el punto de vista geotécnico afecten al proyecto, y más concretamente:

- ☐ Condiciones geológicas generales de la zona.
- ☐ Características geotécnicas del subsuelo, con obtención de los distintos parámetros geotécnicos de los materiales.
- ☐ Características químicas del terreno y el agua
- ☐ Condiciones de cimentación: tipo de cimiento, cargas admisibles.
- ☐ Otras recomendaciones.

Nota. Introducción de informe de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Resultados de laboratorio 2

Nota. Ensayo de penetración estándar de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.

Anexo 4.

Resultados de laboratorio 3



COMENTARIOS

De 0.00 a 0.50 metros de profundidad la compactación relativa es un suelo **MUY SUELTO** con porcentajes de humedad de 46.77 por ciento. Y una resistencia de 0.27 kg/cm². Que equivale a **2.73 Ton/mts² presentando una capacidad de soporte del suelo muy baja. Lo cual presenta licuefacción en presencia de un terremoto. El ángulo de fricción interna** es de: 23 y su ángulo de reposo del material talud^o oscila en: 56.37. El tipo de suelo que presenta es SM: Arenas limosas, mezclas de arena y limo. El índice de plasticidad es de 0.0. **El índice de plasticidad se encuentra bajo.** El peso volumétrico húmedo en Kg/m³ es de 993.09 y su peso volumétrico seco en Kg/m³ es de 676.63. Coeficiente de balasto es de: 0.75 Kg/cm³. El porcentaje de CBR es de 4 por ciento.

De 0.50 a 1.00 metros de profundidad la compactación relativa es un suelo **SUELTO** con porcentajes de humedad de 33.00 por ciento. Y una resistencia de 0.64 kg/cm². Que equivale a **6.37 Ton/mts² presentando una capacidad de soporte del suelo baja. Lo cual presenta licuefacción en presencia de un terremoto. El ángulo de fricción interna** es de: 27 y su ángulo de reposo del material talud^o oscila en: 58.42. El tipo de suelo que presenta es SC: Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla. El índice de plasticidad es de 0.0. **El índice de plasticidad se encuentra bajo.** El peso volumétrico húmedo en Kg/m³ es de 1.136.16 y su peso volumétrico seco en Kg/m³ es de 854.26. Coeficiente de balasto es de: 1.75 Kg/cm³. El porcentaje de CBR es de 7 por ciento.

De 1.00 a 2.50 metros de profundidad la compactación relativa es un suelo **MEDIO DENSO** con porcentajes de humedad de 21.35, 24.48, 17.72 por ciento. Y una resistencia de 1.18, 1.37, 2.18 kg/cm². Que equivale a **11.83, 13.65, 21.84 Ton/mts² presentando una capacidad de soporte del suelo media. Lo cual no presenta licuefacción en presencia de un terremoto de las profundidades de 1.50 a 2.50 metros. El ángulo de fricción interna** es de: 31, 32, 37 y su ángulo de reposo del material talud^o oscila en: 60.56, 61.16, 63.45. El tipo de suelo que presenta es SC: Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla. El índice de plasticidad es de 0.0, 0.0, 0.0. **El índice de plasticidad se encuentra bajo.** El peso volumétrico húmedo en Kg/m³ es de 872.10, 1.237.84, 1.044.99 y su peso volumétrico seco en Kg/m³ es de 718.66, 994.41, 887.69. Coeficiente de balasto es de: 3.31, 3.86, 6.84 Kg/cm³. El porcentaje de CBR es de 13, 14, 23 por ciento.

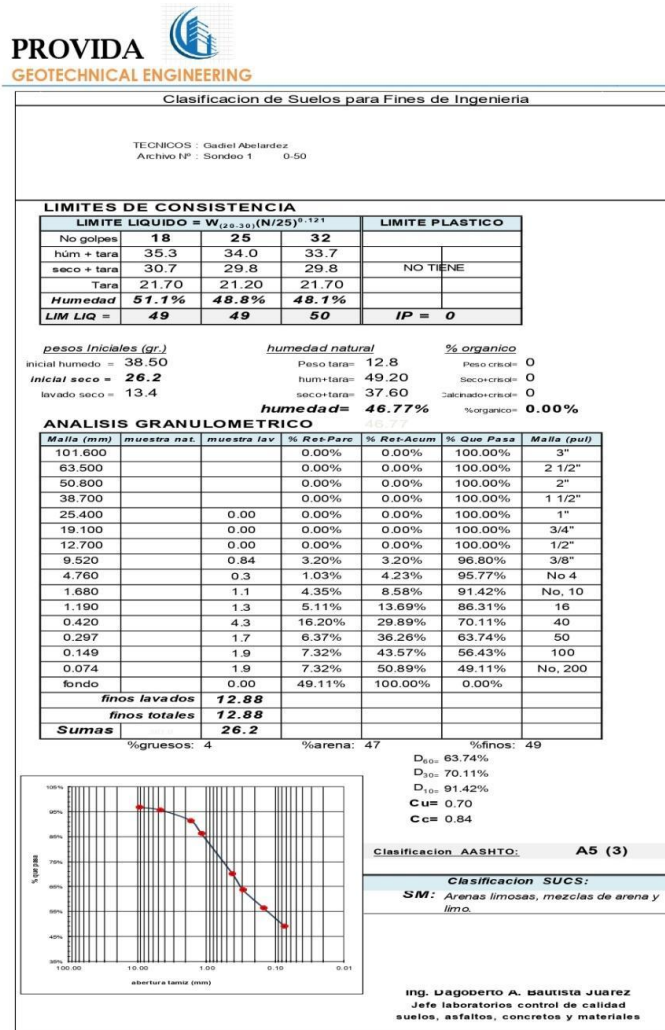
6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es

10

Nota. Resultados de ensayo de penetración estándar de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Anexo 5.

Resultados de laboratorio 4



6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
 Tel: 77613411
 provida_dago@yahoo.es

20

Nota. Resultados de análisis granulométrico y límites de Atterberg, de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Resultados de laboratorio 5

PROVIDA

GEOTECHNICAL ENGINEERING

Clasificación de Suelos para Fines de Ingeniería

TECNICOS : Gadiel Aboladez
Archivo Nº : Sondeo 1 50-100

LIMITES DE CONSISTENCIA

LIMITE LIQUIDO = $W_{(20-30)}(N/25)^{0.121}$			LIMITE PLASTICO	
No golpes				
hum + tara				
seco + tara	NO TIENE		NO TIENE	
Tara				
Humedad				
LIM LIQ =	0	0	IP =	0

pesos Iniciales (gr.)

inicial humedo = 36.80
inicial seco = 27.7
lavado seco = 19.4

humedad natural

Peso tara = 12.8
hum + tara = 63.20
seco + tara = 50.70

% organico

Peso cristal = 0
Seco + cristal = 0
Calculado + cristal = 0
%organico = 0.00%

humedad = 33.0%

ANALISIS GRANULOMETRICO

Malla (mm)	muestra nat.	muestra lav	% Ret-Parc	% Ret-Acum	% Que Pasa	Malla (pul)
101.600			0.00%	0.00%	100.00%	3"
63.500			0.00%	0.00%	100.00%	2 1/2"
50.800			0.00%	0.00%	100.00%	2"
38.700			0.00%	0.00%	100.00%	1 1/2"
25.400			0.00%	0.00%	100.00%	1"
19.100	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	3/4"
12.700	3.26	11.78%	11.78%	11.78%	88.22%	1/2"
9.520	0.86	3.11%	3.11%	14.89%	85.11%	3/8"
4.760	0.8	2.75%	2.75%	17.63%	82.37%	No. 4
1.680	1.3	4.55%	22.19%	77.81%	No. 10	
1.190	1.0	3.43%	25.62%	74.38%	16	
0.420	3.6	12.97%	38.59%	61.41%	40	
0.297	1.5	5.35%	43.94%	56.06%	50	
0.149	3.9	14.17%	58.11%	41.89%	100	
0.074	3.3	11.92%	70.03%	29.97%	No. 200	
fondo	0.00	30.08%	100.11%	-0.11%		
finos lavados	8.32					
finos totales	8.32					
Sumas		27.7				

%grosos: 18

%arena: 52

%finos: 30

D₁₀ = 56.06%

D₃₀ = 61.41%

D₆₀ = 77.81%

Cu = 0.72

Cc = 0.86

Clasificación AASHTO: A2-4 ()

Clasificación SUCS:

SC: Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla

ing. Dagoberto A. Bautista Juarez

Jefe laboratorio control de calidad
suelos, asfaltos, concretos y materiales


6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es

21

Nota. Resultados de análisis granulométrico y límites de Atterberg, de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.

Anexo 7.

Resultados de laboratorio 6



Clasificación de Suelos para Fines de Ingeniería

TÉCNICOS : Gadiel Abelardez
 Archivo IF : Sondas 1 100-150

LIMITES DE CONSISTENCIA

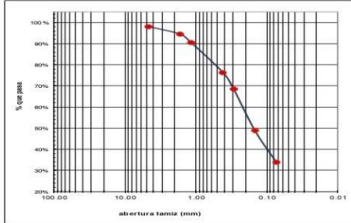
LÍMITE LIQUIDO = $W_{(20-30)}(N/25)^{0.121}$		LÍMITE PLÁSTICO	
No golpes			
hum + tara			
seco + tara	NO TIENE		NO TIENE
Tara			
Humedad			
LIM LIQ =	0	0	IP = 0

pesos Iniciales (gr.) inicial humedo = 35.60 inicial seco = 29.3 lavado seco = 19.5	humedad natural Peso tara= 12.7 hum+tara= 57.60 seco+tara= 49.70 humedad= 21.35%	% organico Peso crisol= 0 Seco+crisol= 0 Calcinado+crisol= 0 %organico= 0.00%
--	--	---

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Malla (mm)	muestra nat.	muestra lav	% Ret-Parc	% Ret-Acum	% Que Pasa	Malla (pul)
101.600			0.00%	0.00%	100.00%	3"
63.500			0.00%	0.00%	100.00%	2 1/2"
50.800			0.00%	0.00%	100.00%	2"
38.700			0.00%	0.00%	100.00%	1 1/2"
25.400	0.00		0.00%	0.00%	100.00%	1"
19.100	0.00		0.00%	0.00%	100.00%	3/4"
12.700	0.00		0.00%	0.00%	100.00%	1/2"
9.520	0.0		0.00%	0.00%	100.00%	3/8"
4.760	0.6		1.91%	1.91%	98.09%	No. 4
1.680	1.1		3.65%	5.56%	94.44%	No. 10
1.190	1.1		3.82%	9.37%	90.63%	16
0.420	4.2		14.28%	23.66%	76.34%	40
0.297	2.3		7.77%	31.43%	68.57%	50
0.149	5.8		19.63%	51.06%	48.94%	100
0.074	4.4		15.13%	66.20%	33.80%	No. 200
fondo	0.00		33.56%	99.76%	0.24%	
finos lavados	9.85					
finos totales	9.85					
Sumas	29.3					

%gruesos: 2 %arena: 64 %finos: 34



D₆₀= 68.57%
 D₃₀= 76.34%
 D₁₀= 94.44%
 Cu= 0.73
 Cc= 0.90

Clasificación AASHTO: A2-4 ()

Clasificación SUCS:
SC: Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla

Ing. Dagoberto A. Bautista Juárez
 Jefe laboratorios control de calidad
 suelos, asfaltos, concretos y materiales

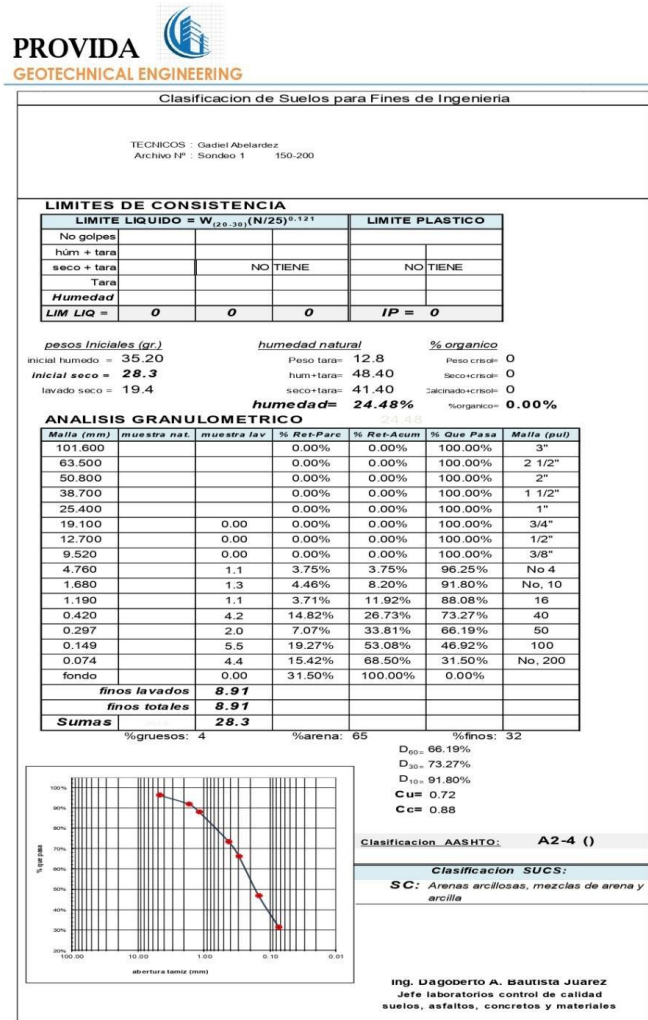
6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
 Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es

22

Nota. Resultados de análisis granulométrico y límites de Atterberg, de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Anexo 8.

Resultados de laboratorio 7



6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es

23

Nota. Resultados de análisis granulométrico y límites de Atterberg, de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Resultados de laboratorio 8



Clasificación de Suelos para Fines de Ingeniería

TECNICOS : Gadiel Abelardez
 Archivo Nº : Sondeo 1 200-250

LIMITES DE CONSISTENCIA

LIMITE LIQUIDO = $W_p(200)/(N/25)^{0.121}$			LIMITE PLASTICO		
No golpes					
hum + tara					
seco + tara	NO TIENE			NO TIENE	
Tara					
Humedad					
LIM LIQ =	0	0	0	IP = 0	

pesos Iniciales (gr.)

inicial humedo = **39.00**
 inicial seco = **33.1**
 lavado seco = **22.2**

humedad natural

Peso tara = **12.9**
 hum+tara = **50.10**
 seco+tara = **44.50**

% organico

Peso crisol = **0**
 Secocrisol = **0**
 Calculadocrisol = **0.00%**
 %organico = **0.00%**

humedad = 17.72%

ANALISIS GRANULOMETRICO

Malla (mm)	muestra nat.	muestra lav.	% Ret-Parc	% Ret-Acum	% Que Pasa	Malla (psi)
101.600			0.00%	0.00%	100.00%	3"
63.600			0.00%	0.00%	100.00%	2 1/2"
50.800			0.00%	0.00%	100.00%	2"
38.700			0.00%	0.00%	100.00%	1 1/2"
25.400		0.00	0.00%	0.00%	100.00%	1"
19.100		0.00	0.00%	0.00%	100.00%	3/4"
12.700		0.00	0.00%	0.00%	100.00%	1/2"
9.520		0.00	0.00%	0.00%	100.00%	3/8"
4.760		1.5	4.65%	4.65%	95.35%	No 4
1.680		2.0	6.04%	10.69%	89.31%	No 10
1.190		1.3	4.01%	14.70%	85.30%	16
0.420		4.8	14.34%	29.04%	70.96%	40
0.297		2.6	7.73%	36.77%	63.23%	50
0.149		5.7	17.30%	54.06%	45.94%	100
0.074		4.1	12.41%	66.47%	33.53%	No. 200
fondo		0.19	33.63%	100.00%	0.00%	
finos lavados	10.92					
finos totales	11.11					
Sumas	33.1					

%gruesos: **5**

%arena: **62**

%finos: **34**

D_{60} 63.23%

D_{30} 70.96%

D_{10} 89.31%

$C_u = 0.71$

$C_c = 0.89$

Clasificación AASHTO: A2-4 ()

Clasificación SUCS:

SC: Arenas arcillosas, mezclas de arena arcilla

Ing. Dagoberto A. Bautista Juarez
 Jefe laboratorios control de calidad
 suelos, asfaltos, concretos y materiales


6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es 24

24

Nota. Resultados de análisis granulométrico y límites de Atterberg, de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.

Anexo 10.

Resultados de laboratorio 9

<div>  </div>					
PESO UNITARIO Y GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA FINES DE INGENIERIA					
TECNICOS : Gadiel Abelardez ARCHIVO No: Sondes 1					
PESO UNITARIO g/cm3					
Profundidad:	0.00-0.50				
Peso Recipiente Grande (WRG)	27.8				
Peso Muestra (Wm)	30.30				
Peso muestra + Cera (Wm+C)	32.60				
Peso Cera (WC)	2.30				
Humedad Peso tara	12.60				
Hum+tara	37.60				
Seco+tara	28.40				
Humedad	58.23%				
Pesos recipientes (WR+WP)	128.8				
Pesos recipientes + H2O (WR+WP+H2O)	358.00				
Pesos recipientes + H2O+ m (WR+WP+H2O+m)	390.60				
Peso recipiente Pequeño (Wr)	101				
Peso agua derramada + Recipiente Grande (WH2Od+WRG)	51.00				
WH2Oderramada (WH2Od)	20.90				
Densidad del H2O	1				
Volumen agua derrada (VH2Od)	20.9				
Ym PESOS UNITARIOS g/cm³	0.76				
Clasificación del suelo	SM				
Peso Humedo= grs	25.00				
Peso Seco= grs	15.80				
Volumen Total (Vtot)= CM³	40.08				
Peso específico del suelo: Kg/m3	755.98				
Peso Unitario	0.76				
Peso Unitario Húmedo	1.20				
Ton/m3	0.83				
GRAVEDAD ESPECÍFICA O PESO ESPECÍFICO RELATIVO NORMA ASTM D854-02					
Profundidad:	0.00-0.50				
Peso muestra en grs. (Ws):	22.9				
Peso Picnómetro (Wp):	157.7				
Peso Picnómetro + agua (Wp+H2O):	699.6				
Temperatura del agua:	18				
Densidad del H2O:	998.68				
Densidad Real del Agua:	0.99868				
Peso Picnómetro + H2O + Muestra+ Aire	694.1				
Gravedad Especifica Gs=	0.81				
<p>Ing. Dagoberto A. Bautista Juarez Jefe laboratorios control de calidad suelos, asfaltos, concretos y materiales</p>					

6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es

25

Nota. Resultados de peso unitario y gravedad específica de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Resultados de laboratorio 10

6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es 26

163

Anexo 12.

Resultados de laboratorio 11

COMENTARIOS

De 0.00 a 0.50 metros de profundidad la compactación relativa es un suelo **MEDIO DENSO** con porcentajes de humedad de 19.09 por ciento. Y una resistencia de 1.09 kg/cm². Que equivale a **10.92 Ton/mts² presentando una capacidad de soporte del suelo media. Lo cual presenta licuefacción en presencia de un terremoto. El ángulo de fricción interna** es de: 30 y su ángulo de reposo del material talud* oscila en: 60.25. El tipo de suelo que presenta es SM: Arenas limosas, mezclas de arena y limo. El índice de plasticidad es de 0.0. **El índice de plasticidad se encuentra bajo.** El peso volumétrico húmedo en Kg/m³ es de 1.280.37 y su peso volumétrico seco en Kg/m³ es de 1075.12. Coeficiente de balasto es de: 3.04 Kg/cm³. El porcentaje de CBR es de 12 por ciento.

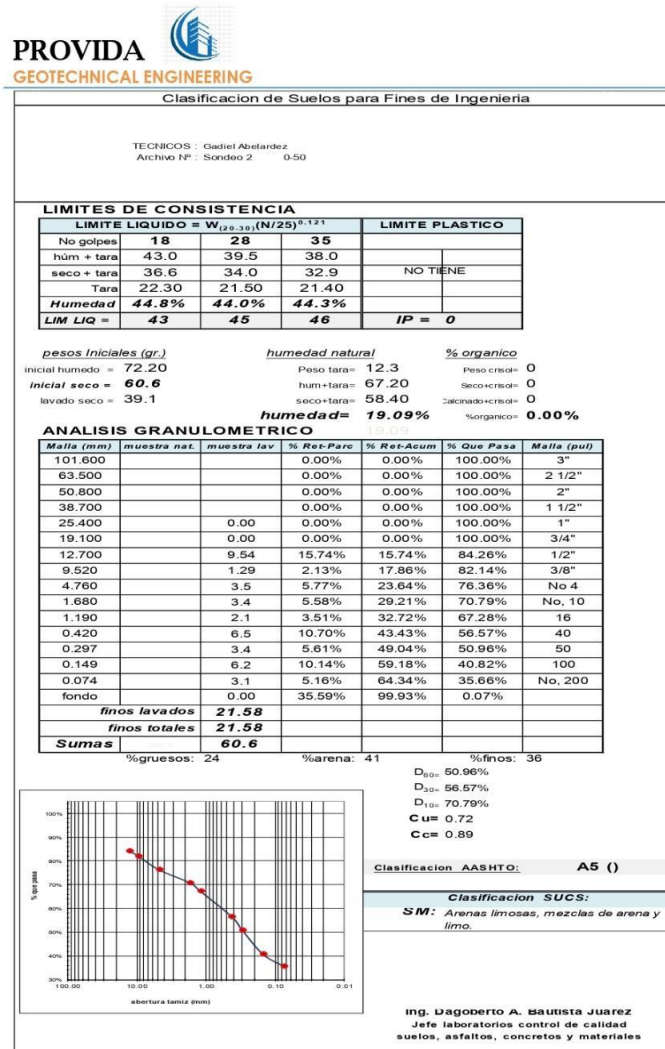
De 0.50 a 1.00 metros de profundidad la compactación relativa es un suelo **SUELTO** con porcentajes de humedad de 18.30 por ciento. Y una resistencia de 0.82 kg/cm². Que equivale a **8.19 Ton/mts² presentando una capacidad de soporte del suelo baja. Lo cual presenta licuefacción en presencia de un terremoto. El ángulo de fricción interna** es de: 28 y su ángulo de reposo del material talud* oscila en: 59.21. El tipo de suelo que presenta es SM: Arenas limosas, mezclas de arena y limo. El índice de plasticidad es de 0.0. **El índice de plasticidad se encuentra bajo.** El peso volumétrico húmedo en Kg/m³ es de 1.536.51 y su peso volumétrico seco en Kg/m³ es de 1298.82. Coeficiente de balasto es de: 2.26 Kg/cm³. El porcentaje de CBR es de 9 por ciento.

De 1.00 a 2.50 metros de profundidad la compactación relativa es un suelo **MUY SUELTO** con porcentajes de humedad de 13.62, 22.47, 33.33 por ciento. Y una resistencia de 0.27, 0.36, 0.36 kg/cm². Que equivale a **2.73, 3.64, 3.64 Ton/mts² presentando una capacidad de soporte del suelo muy baja. Lo cual presenta licuefacción en presencia de un terremoto. El ángulo de fricción interna** es de: 23, 24, 24 y su ángulo de reposo del material talud* oscila en: 56.37, 56.97, 56.97. El tipo de suelo que presenta es SM: Arenas limosas, mezclas de arena y limo. Y MH: Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos. El índice de plasticidad es de 0.0, 0.0, 0.0. **El índice de plasticidad se encuentra bajo.** El peso volumétrico húmedo en Kg/m³ es de 1.455.11, 1.355.00, 1.494.51 y su peso volumétrico seco en Kg/m³ es de 1280.68, 1106.39, 1120.91. Coeficiente de balasto es de: 0.75, 1.00, 1.00 Kg/cm³. El porcentaje de CBR es de 4, 5, 5 por ciento.

Nota. Resultados del segundo ensayo de penetración estándar de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Anexo 13.

Resultados de laboratorio 12



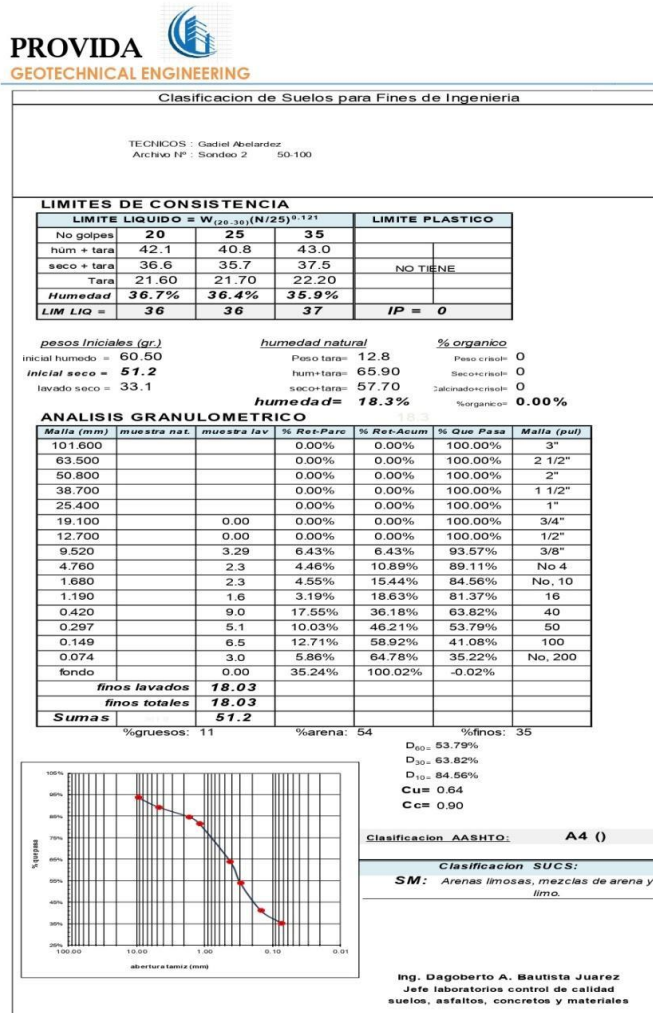
6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es

37

Nota. Resultados de granulometría y límites de Atterberg de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Anexo 14.

Resultados de laboratorio 13



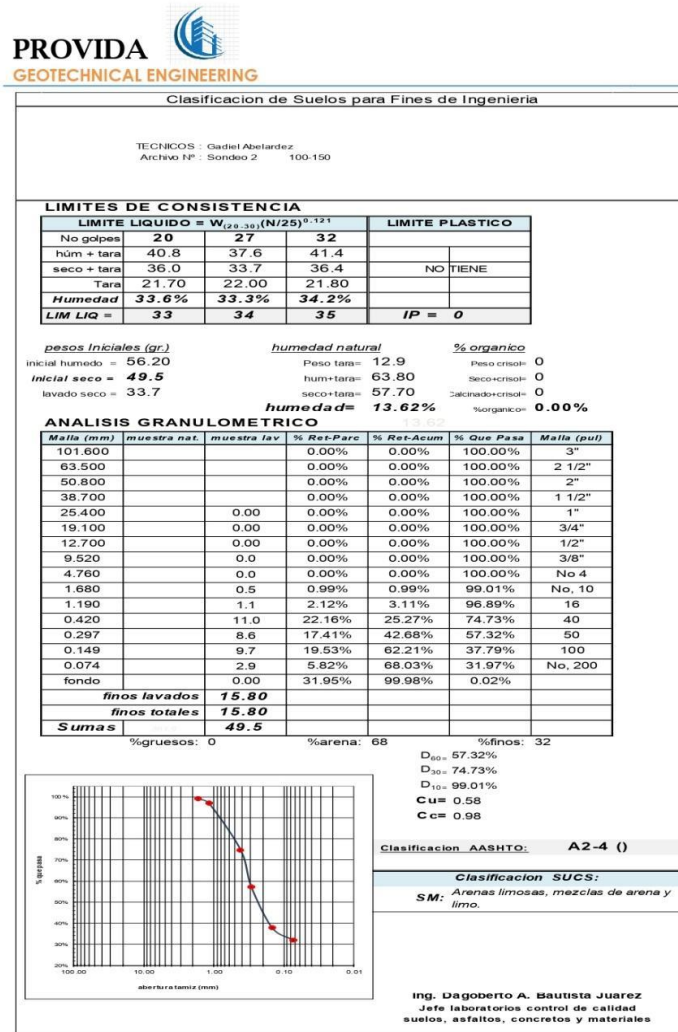
6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es

38

Nota. Resultados de granulometría y límites de Atterberg de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Anexo 15.

Resultados de laboratorio 14

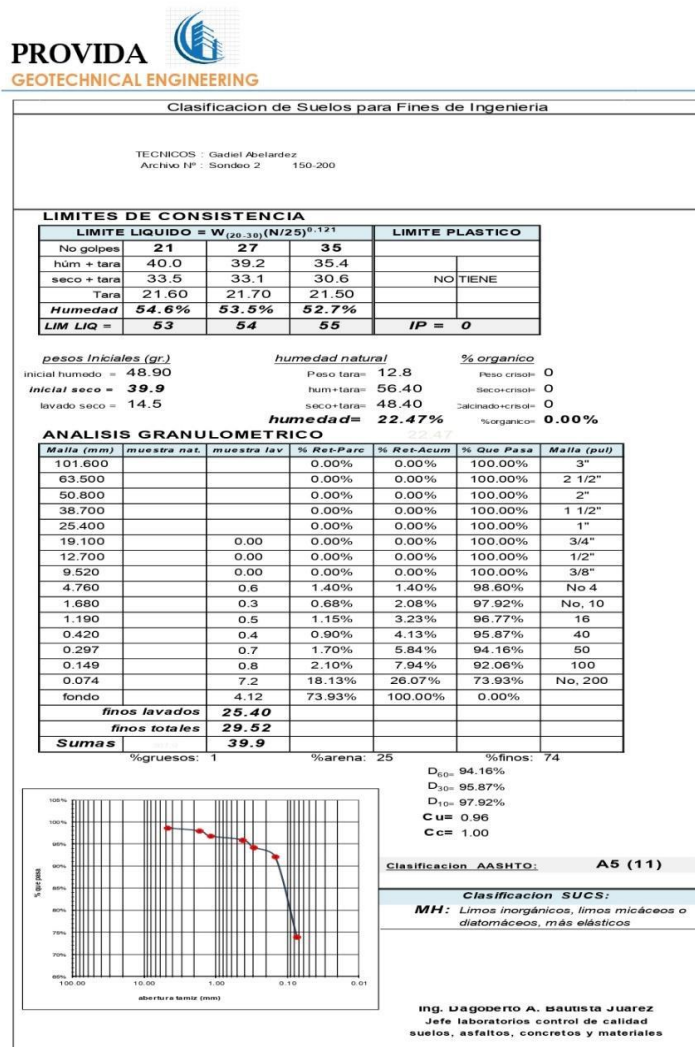


6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es

39

Nota. Resultados de granulometría y límites de Atterberg de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Resultados de laboratorio 15



6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es

40

Nota. Resultados de granulometría y límites de Atterberg de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Resultados de laboratorio 16

6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es

41

169

Anexo 18.

Resultados de laboratorio 17

PROVIDA
GEOTECHNICAL ENGINEERING

PESO UNITARIO Y GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA FINES DE INGENIERIA

TECNICOS : Gadiel Abelardez
ARCHIVO No: Sondeo 2

PESO UNITARIO g/cm3

Profundidad:	0.0-0.50				
Peso Recipiente Grande (WRG)	27.8				
Peso Muestra (Wm)	26.30				
Peso muestra + Cera (Wm+C)	28.10				
Peso Cera (WC)	1.80				
Humedad Peso tara	12.70				
Hum+tara	37.00				
Seco+tara	30.30				
Humedad	38.07%				
Peso: recipientes (WR+WP)	128.8				
Peso: recipientes + H2O (WR+WP+H2O)	359.50				
Peso: recipientes + H2O+ m (WR+WP+H2O+m)	389.50				
Peso recipiente Pequeño (Wp)	101				
Peso agua derramada + Recipiente Grande (WH2O+WRG)	45.00				
WH2Oderramada (WH2Od)	15.40				
Densidad del H2O	1				
Volumen agua derrada (VH2Od)	15.4				
Ym PESOS UNITARIOS g/cm³	1.14				
Clasificación del suelo	SM				
Peso Húmedo= grs	24.30				
Peso Seco= grs	17.60				
Volumen Total (Vtot)= CM³	23.01				
Peso específico del suelo: Kg/m3	1142.86				
Peso Unitario	1.14				
Peso Unitario Húmedo	1.58				
Ton/m3	1.26				

GRAVEDAD ESPECÍFICA O PESO ESPECÍFICO RELATIVO NORMA ASTM D854-02

Profundidad:	0.00-0.50				
Peso muestra en grs. (Ws):	35.9				
Peso Pícnómetro (Wp):	157.7				
Peso Pícnómetro + agua (Wp+H2O):	699.6				
Temperatura del agua:	18				
Densidad del H2O:	998.68				
Densidad Real del Agua:	0.99868				
Peso Pícnómetro + H2O + Muestra+ Aire	703.3				
Gravedad Especifica Gs=	1.11				

Ing. Dagoberto A. Bautista Juarez
Jefe laboratorios control de calidad
suelos, asfaltos, concretos y materiales

6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es

42

Nota. Resultados de peso unitario y gravedad específica de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Resultados de laboratorio 18

2.1.3 ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR SONDEO 3

[illegible]

6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida dago@yahoo.es 43

43

Nota. Resultados del tercer ensayo de penetración estándar de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Anexo 20.

Resultados de laboratorio 19

COMENTARIOS

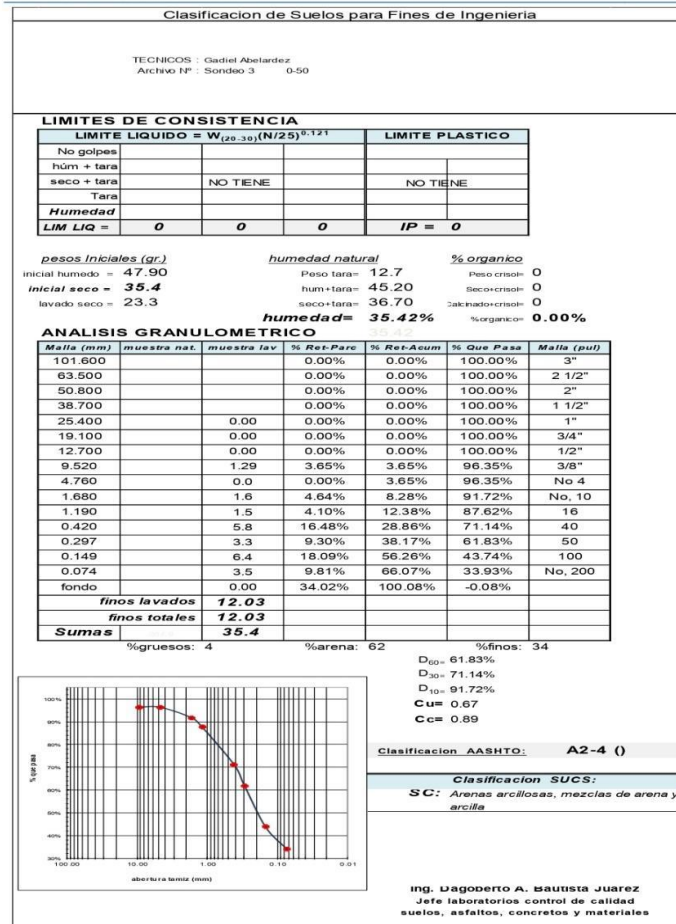
De 0.00 a 1.00 metros de profundidad la compacidad relativa es un suelo **MUY SUELTO** con porcentajes de humedad de 35.42, 16.60 por ciento. Y una resistencia de 0.46, 0.46 kg/cm². Que equivale a **4.55, 4.55 Ton/mts² presentando una capacidad de soporte del suelo muy baja. Lo cual presenta licuefacción en presencia de un terremoto.** El ángulo de fricción interna es de: 25, 25 y su ángulo de reposo del material talud^o oscila en: 57.50, 57.50. El tipo de suelo que presenta es SC: Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla. El índice de plasticidad es de 0.0, 0.0. **El índice de plasticidad se encuentra bajo.** El peso volumétrico húmedo en Kg/m³ es de 1.170.55, 963.39 y su peso volumétrico seco en Kg/m³ es de 864.39, 826.24 Coeficiente de balasto es de: 1.25, 1.25 Kg/cm³. El porcentaje de CBR es de 6, 6 por ciento.

De 1.00 a 1.50 metros de profundidad la compacidad relativa es un suelo **SUELTO** con porcentajes de humedad de 19.66 por ciento. Y una resistencia de 0.91 kg/cm². Que equivale a **9.10 Ton/mts² presentando una capacidad de soporte del suelo baja. Lo cual presenta licuefacción en presencia de un terremoto.** El ángulo de fricción interna es de: 29 y su ángulo de reposo del material talud^o oscila en: 59.57. El tipo de suelo que presenta es SC: Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla. El índice de plasticidad es de 0.0. **El índice de plasticidad se encuentra bajo.** El peso volumétrico húmedo en Kg/m³ es de 975.93 y su peso volumétrico seco en Kg/m³ es de 815.58 Coeficiente de balasto es de: 2.52 Kg/cm³. El porcentaje de CBR es de 10 por ciento.

De 1.50 a 2.50 metros de profundidad la compacidad relativa es un suelo **MEDIO DENSO** con porcentajes de humedad de 19.89, 21.53 por ciento. Y una resistencia de 1.00, 1.00 kg/cm². Que equivale a **10.01, 10.01 Ton/mts² presentando una capacidad de soporte del suelo media. Lo cual presenta licuefacción en presencia de un terremoto.** El ángulo de fricción interna es de: 30, 30 y su ángulo de reposo del material talud^o oscila en: 59.92, 59.92. El tipo de suelo que presenta es SC: Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla. El índice de plasticidad es de 0.0, 0.0. **El índice de plasticidad se encuentra bajo.** El peso volumétrico húmedo en Kg/m³ es de 1.334.55, 957.27 y su peso volumétrico seco en Kg/m³ es de 1113.15, 787.68. Coeficiente de balasto es de: 2.78, 2.78 Kg/cm³. El porcentaje de CBR es de 11, 11 por ciento.

Nota. Resultados de ensayo de penetración estándar de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Resultados de laboratorio 20



54

173

Resultados de laboratorio 21

PROVIDA

GEOTECHNICAL ENGINEERING

Clasificación de Suelos para Fines de Ingeniería

TECNICOS : Gadiel Abelardez
Archivo Nº : Sondreo 3 50-100

LIMITES DE CONSISTENCIA

LIMITE LIQUIDO = $W_{(20-30)}(N/25)^{0.121}$		LIMITE PLASTICO	
No golpes			
húm + tara			
seco + tara	NO TIENE		NO TIENE
Tara			
Humedad			
LIM LIQ =	0	0	IP = 0

pesos Iniciales (gr.)

inicial humedo = 32.80

inicial seco = 28.1

lavado seco = 20.3

humedad natural

Peso tara= 13

hum+tara= 61.40

seco+tara= 54.50

humedad= 16.6%

% organico

Peso crisol= 0

Seco+crisol= 0

Calcinado+crisol= 0

%organico= 0.00%

ANALISIS GRANULOMETRICO

Malla (mm)	muestra nat.	muestra lav	% Ret-Parc	% Ret-Acum	% Que Pasa	Malla (pul)
101.600			0.00%	0.00%	100.00%	3"
63.500			0.00%	0.00%	100.00%	2 1/2"
50.800			0.00%	0.00%	100.00%	2"
38.700			0.00%	0.00%	100.00%	1 1/2"
25.400			0.00%	0.00%	100.00%	1"
19.100	0.00		0.00%	0.00%	100.00%	3/4"
12.700	0.00		0.00%	0.00%	100.00%	1/2"
9.520	0.00		0.00%	0.00%	100.00%	3/8"
4.760	1.0		3.41%	3.41%	96.59%	No 4
1.680	1.7		6.01%	9.42%	90.58%	No. 10
1.190	1.6		5.72%	15.15%	84.85%	16
0.420	5.3		18.81%	33.96%	66.04%	40
0.297	2.0		7.11%	41.07%	58.93%	50
0.149	4.8		17.07%	58.14%	41.86%	100
0.074	3.6		12.80%	70.94%	29.06%	No, 200
fondo	0.32		29.06%	100.00%	0.00%	
finos lavados		7.85				
finos totales		8.17				
Sumas		28.1				

%gruesos: 3

%arena: 68

%finos: 29

D₆₀ = 58.93%

D₃₀ = 66.04%

D₁₀ = 90.58%

Cu = 0.65

Cc = 0.82

Clasificación AASHTO: A2-4 ()

Clasificación SUCS:

SC: Arenas arcillosas, mezclas de arena, arcilla

apertura tamiz (mm)	% que pasa
100.00	100.00
63.50	100.00
50.80	100.00
38.70	100.00
25.40	100.00
19.10	100.00
12.70	100.00
9.52	100.00
4.76	96.59
1.68	90.58
1.19	84.85
0.42	66.04
0.297	58.93
0.149	41.86
0.074	29.06
0.01	0.00

Ing. Dagoberto A. Bautista Juarez

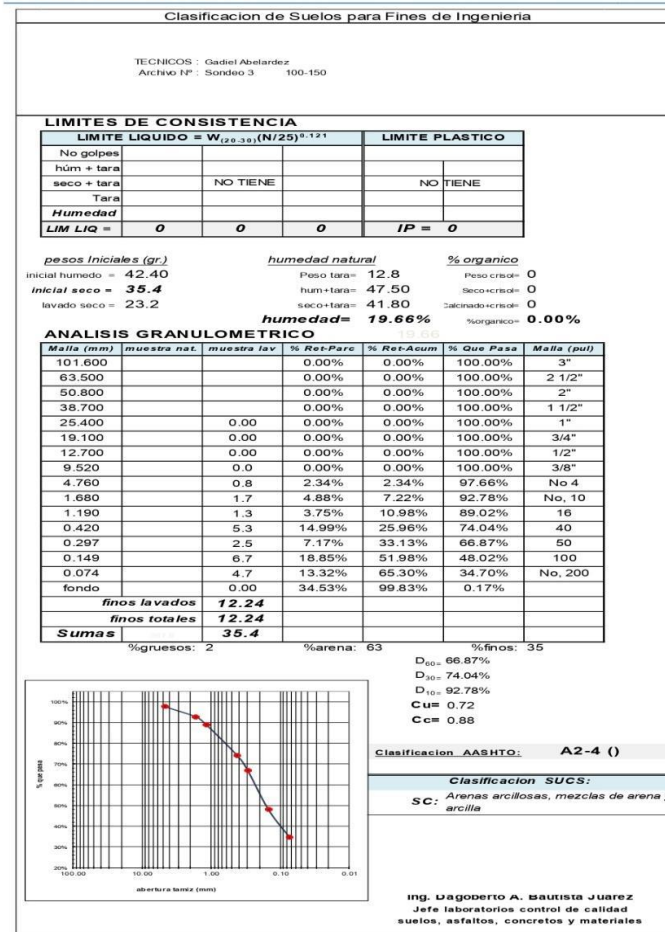
Jefe laboratorio control de calidad
suelos, asfaltos, concretos y materiales

6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es

55

Nota. Resultados de granulometría y límites de Atterberg de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.

Resultados de laboratorio 22

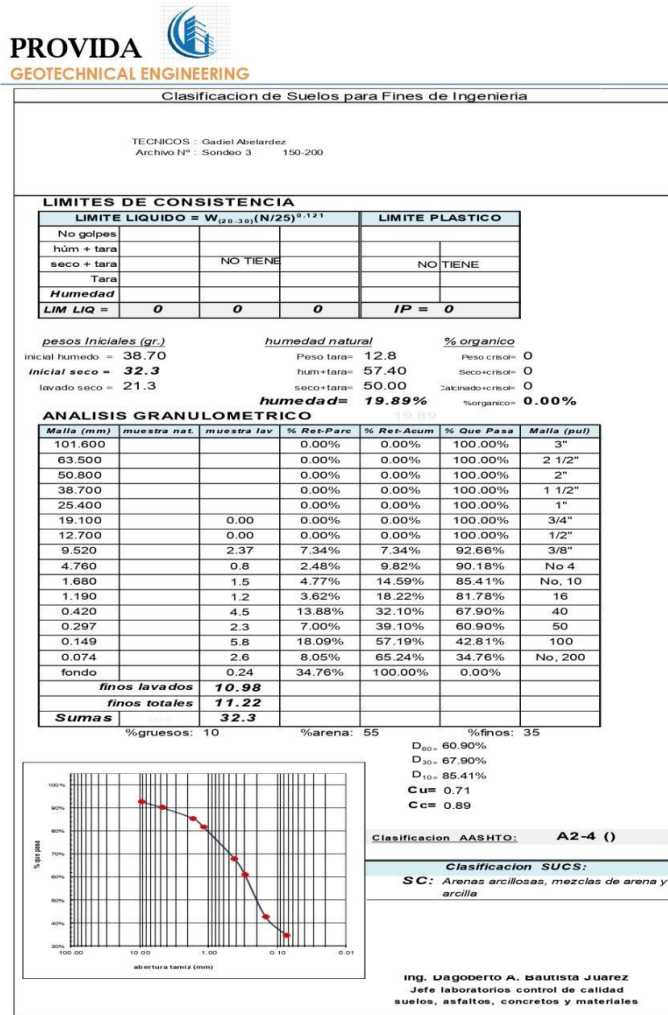


56

175

Anexo 24.

Resultados de laboratorio 23

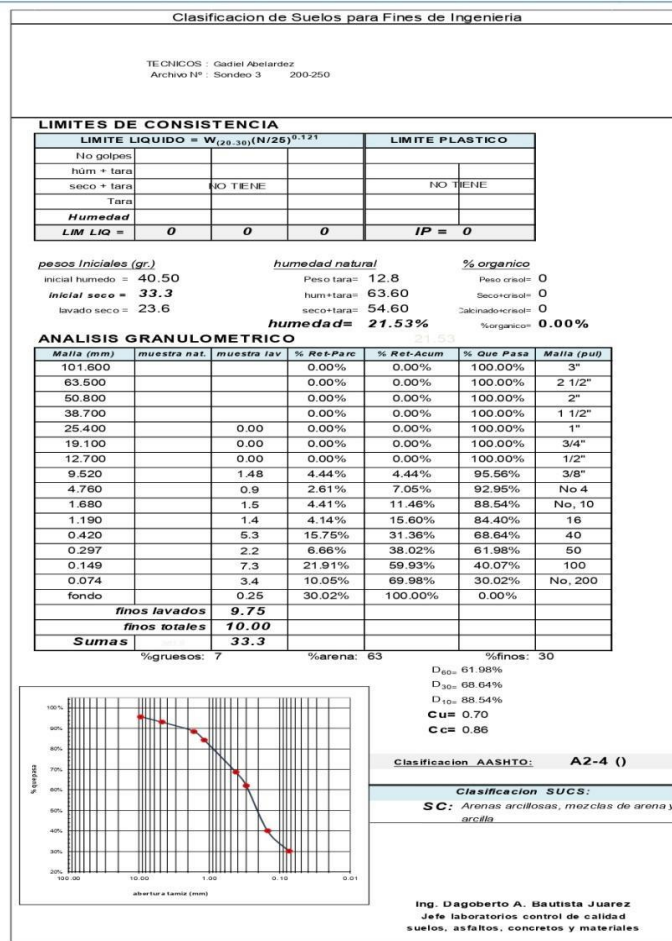


6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es

57

Nota. Resultados de granulometría y límites de Atterberg de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Resultados de laboratorio 24



58

177

Anexo 26.

Resultados de laboratorio 25

PROVIDA

GEOTECHNICAL ENGINEERING

PESO UNITARIO Y GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA FINES DE INGENIERIA

TECNICOS : Gadriel Abelardez
ARCHIVO No: Sonda 3

PESO UNITARIO g/cm3

Profundidad:	0.0-0.50				
Peso Recipiente Grande (WRG)	27.8				
Peso Muestra (Wm)	43.90				
Peso muestra + Cera (Wm+C)	46.90				
Peso Cera (WC)	3.00				
Humedad Peso tara	12.70				
Hum+tara	53.80				
Seco+tara	41.80				
Humedad	41.24%				
Pesos recipientes (WR+WP)	128.8				
Pesos recipientes + H2O (WR+WP+H2O)	357.80				
Pesos recipientes + H2O+ m (WR+WP+H2O+m)	404.70				
Peso recipiente Pequeño (Wr)	101				
Peso agua derramada + Recipiente Grande (WH2Od+WRG)	56.50				
WH2Oderramada (WH2Od)	25.70				
Densidad del H2O	1				
Volumen agua derrada (VH2Od)	25.7				
Ym PESOS UNITARIOS g/cm³	1.13				
Clasificación del suelo	SC				
Peso Húmedo= grs	41.10				
Peso Seco= grs	29.10				
Volumen Total (Vtot)= CM³	38.77				
Peso específico del suelo: Kg/m3	1132.30				
Peso Unitario	1.13				
Peso Unitario Húmedo	1.60				
Ton/m3	1.25				

GRAVEDAD ESPECÍFICA O PESO ESPECÍFICO RELATIVO NORMA ASTM D854-02

Profundidad:	0.00-0.50				
Peso muestra en grs. (Ws):	23.5				
Peso Picnómetro (Wp):	157.7				
Peso Picnómetro + agua (Wp+H2O):	699.6				
Temperatura del agua:	18				
Densidad del H2O:	998.68				
Densidad Real del Agua:	0.99868				
Peso Picnómetro + H2O + Muestra+ Aire	696				
Gravedad Especifica Gs=	0.94				

Ing. Dagoberto A. Bautista Juarez
Jefe laboratorios control de calidad
suelos, asfaltos, concretos y materiales

6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es

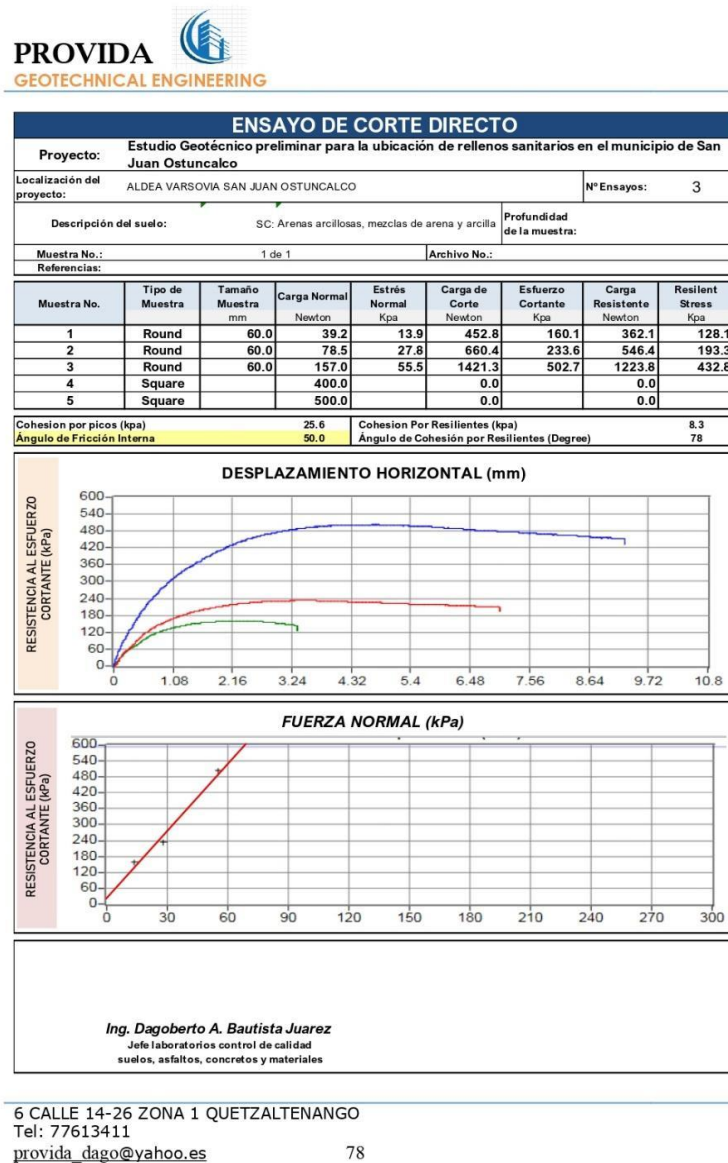
59

Nota. Resultados de peso unitario y gravedad específica de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Resultados de laboratorio 26

Anexo 28.

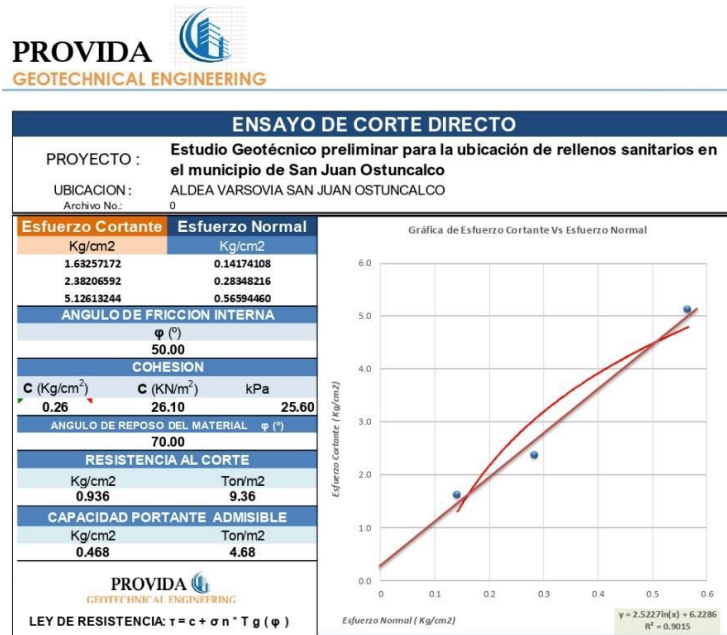
Resultados de laboratorio 27



Nota. Resultados de corte directo de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Anexo 29.

Resultados de laboratorio 28



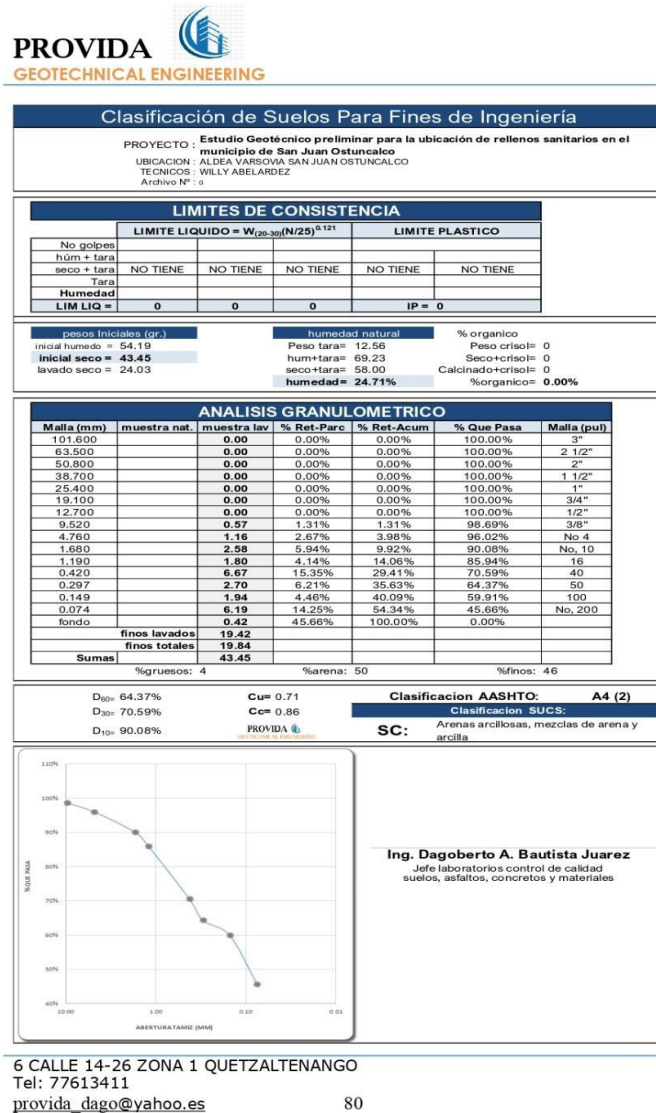
6 CALLE 14-26 ZONA 1 QUETZALTENANGO
Tel: 77613411
provida_dago@yahoo.es

79

Nota. Resultados de corte directo de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*

Anexo 30.

Resultados de laboratorio 29



Nota. Resultados de granulometría y límites de Atterberg, de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.

Anexo 31.

Resultados de laboratorio 30

PESO UNITARIO Y GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA FINES DE INGENIERIA	
PROYECTO : Estudio Geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco UBICACION : ALDEA VARSOVIA SAN JUAN OSTUNCALCO TECNICOS : WILLY ABELARDEZ Archivo N° : 0	
PESO UNITARIO g/cm ³	
Profundidad:	0
Peso Recipiente Grande (WRG)	27.8
Peso Muestra (Wm)	61.83
Peso muestra + Cera (Wm+C)	66.86
Peso Cera (WC)	5.03
Humedad Peso tara	12.8
Hum+tara	58.10
Seco+tara	48.00
Humedad	28.69%
Pesos recipientes (WR+WP)	128.8
Pesos recipientes + H ₂ O (WR+WP+H ₂ O)	360.1
Pesos recipientes + H ₂ O+ m (WR+WP+H ₂ O+m)	426.9
Peso recipiente Pequeño (Wr)	101
Peso agua	75.5
WH ₂ O derramada (WH ₂ O _d)	42.67
Densidad del H ₂ O	1
Volumen agua derrada (VH ₂ O _d)	42.67
Ym PESOS UNITARIOS g/cm³	1.45
Clasificación del suelo	SC:
Peso Húmedo= grs	45.30
Peso Seco= grs	35.20
Volumen Total (Vtot)= CM³	42.67
GRAVEDAD ESPECÍFICA O PESO ESPECÍFICO RELATIVO NORMA ASTM D854-02	
Profundidad:	0
Peso muestra en grs. (Ws):	33.5
Peso Picnómetro (Wp):	157.7
Peso Picnómetro + agua (Wp+H ₂ O):	699.6
Temperatura del agua:	18
Densidad del H ₂ O:	998.68
Densidad Real del Agua:	0.99868
Peso Picnómetro + H ₂ O + Muestra+ Aire	700.5
Gravedad Especifica Gs=	1.03
Ing. Dagoberto A. Bautista Juarez Jefe laboratorios control de calidad suelos, asfaltos, concretos y materiales	

Nota. Resultados de peso unitario y gravedad específica, de laboratorios realizados para el estudio geotécnico en el sitio seleccionado. Obtenido de PROVIDA, Geotechnical Engineering. (2022). *Estudio geotécnico preliminar para la ubicación de rellenos sanitarios en el municipio de San Juan Ostuncalco.*