



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Evaluación de la calidad del suelo en dos Sitios de
Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos en
el estado de Chiapas, México.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Lic. en Ciencias de la Tierra -
Ambientales**

P R E S E N T A:

Eduardo Salazar Becerra



**DIRECTOR DE TESIS:
Dra. Silke Cram Heydrich
Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

“Investigación realizada gracias al **Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT)** de la UNAM, dentro del **proyecto con clave IN105516 titulado:** Modelado espacial del riesgo sanitario-ecológico derivado del manejo de los residuos sólidos urbanos en los municipios que integran la cuenca del cañón del sumidero del estado de Chiapas. Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida”.

Al Instituto de geografía, por permitir realizar mis análisis dentro de su laboratorio y en especial a la Maestra María del Pilar Fernández Lomelín por su apoyo en la investigación y aplicación de los métodos utilizados y su revisión constante del documento.

A la Doctora Silke Cram Heydrich y al Maestro Juan Antonio Araiza Aguilar, por su dedicación y compromiso durante todo el tiempo que duró la elaboración del presente trabajo.

A mis sinodales, por sus comentarios y su disposición para cooperar con la investigación.

Dedicatorias

A mi familia, por siempre apoyarme y estar a mi lado.

A mi padre Ricardo, por su cariño y dedicación, por brindarnos lo mejor, inculcarnos valores y la práctica del deporte.

A mi madre Gloria, por todo su empeño y amor que nos da a diario, porque su ejemplo nos ha permitido crecer y ser mejores personas.

A mis hermanos Daniel Alberto y Osiris Itzel, por todos los momentos vividos, por regalarme tantos momentos bonitos, por todo lo que me enseñan a diario y por darme tantas muestras de cariño.

A mi prometida Tania Gabriela, por el camino recorrido, por estar en los buenos y malos momentos, por su apoyo en cada proyecto que iniciamos y por permitirme planear un futuro a su lado.

A mis suegros Patricia y Juan, por brindarme la confianza y abrirme las puertas de su casa, por permitirme formar parte de su familia.

Índice

I. Introducción	8
1.1 Planteamiento del problema.....	8
1.2 Justificación.....	9
1.3 Objetivos	11
1.3.1 General.....	11
1.3.2 Específicos	11
1.3.3 Preguntas de investigación.....	11
II. Marco teórico	12
2.1 El suelo	12
2.1.1 Suelos en México	13
2.1.2 Suelos de Chiapas.....	15
2.1.3 Funciones de los suelos	15
2.2 Calidad del suelo y sus indicadores	16
2.2.1 Indicadores visuales	18
2.2.2 Indicadores físicos.....	19
2.2.3 Indicadores químicos.....	23
2.2.4 Metales	25
2.3 Residuos sólidos urbanos	28
2.3.1 Sitios de disposición final de RSU en México.....	29
2.3.2 Gestión y normativa de los RSU.....	33
2.3.3 Residuos sólidos urbanos en el estado de Chiapas	34
2.4 Área de estudio	35
III. MÉTODO	37
3.1 Trabajo de campo	38
3.1.1 Muestreo.....	38
3.2 Análisis de variables en campo y laboratorio	39
3.2.1 Indicadores físicos	40
3.2.2 Indicadores químicos.....	42
3.2.3 Metales	43
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44

4.1	Descripción del sitio de estudio	45
4.1.1	Sitio controlado, Villaflores	45
4.1.2	Tiradero a cielo abierto, Berriozábal	50
4.2	Resultados de los indicadores de la evaluación de calidad del suelo	55
4.2.1	Sitio controlado	55
4.2.2	Tiradero a cielo abierto	57
4.3	Análisis de la evaluación de la calidad del suelo	59
4.3.1	Indicadores físicos	59
4.3.2	Indicadores químicos	62
4.3.3	Metales	65
V.	Conclusiones	68
5.1	Generales	68
5.2	Específicas	69
VI.	Bibliografía	71
VII.	Anexos	77
7.1	Conductividad hidráulica	77

Índice de tablas

Tabla 1.- Valores de infiltración de referencia con base a la textura.	22
Tabla 2.- Valores óptimos de densidad aparente para el crecimiento de plantas. 23	
Tabla 3.- Micronutrientes y macronutrientes para el óptimo funcionamiento de los organismos vivos.....	26
Tabla 4.- Concentración de referencia total (CRT) de metales, por uso del suelo.27	
Tabla 5.- Emisiones al ambiente y consecuencias a los seres humanos por el mal manejo de RSU.....	30
Tabla 6.- Categorización de los SDF de RSU.	31
Tabla 7.- Métodos utilizados para los análisis físicos y químicos.....	39
Tabla 8.- Evaluación de la estabilidad de agregados.....	40
Tabla 9.- Clasificación de la porosidad en campo.....	41
Tabla 10.- Descripción de campo de SC ₁ , Villaflores.....	46
Tabla 11.- Descripción de campo de SC ₂ , Villaflores.....	46
Tabla 12.- Descripción de campo de TCA ₁ , Berriozábal.....	51
Tabla 13.- Descripción de campo de TCA ₂ , Berriozábal.....	51
Tabla 14.- Relación entre el crecimiento poblacional y la generación de RSU.	54
Tabla 15.- Resultados de los análisis en campo y laboratorio del sitio de estudio.55	
Tabla 16.- Resultados de los análisis en campo y laboratorio del sitio de estudio.57	
Tabla 17.- Relación de Indicadores físicos.....	60
Tabla 18.- Valores de infiltración (Referencia y Campo).....	61
Tabla 19.- Relación entre la EA y la MO.....	62
Tabla 20.- Metales para el Sitio Controlado de Villaflores.....	65
Tabla 21.- Metales para Tiradero a Cielo Abierto de Berriozábal.....	66

Índice de figuras

Figura 1.- Los suelos de México y los procesos de degradación.	13
Figura 2.- Porcentajes en la composición de los RSU generados en los municipios de estudio.....	35
Figura 3.- Etapas de trabajo para la elaboración del presente trabajo.	37
Figura 4.- Muestra compuesta de suelo en forma de "X".	38
Figura 5.- Ubicación de los SDF: SC de Villaflores y TCA de Berriozábal, Chiapas, México.....	36
Figura 6.- Proceso de trabajo de Resultados y Discusión.....	44
Figura 7.- Puntos de muestreo en el Sitio Controlado del municipio de Villaflores.	46
Figura 8.- Perfil altitudinal entre el punto SC1 y SC2 del Sitio Controlado, municipio de Villaflores.....	47
Figura 9.- Afectación de RSU en el SC.	48
Figura 10.- Comparación de Imágenes de Google Earth de diferentes años del Sitio Controlado.....	49
Figura 11.- Puntos de muestreo en el Tiradero a Cielo Abierto del municipio de Berriozábal.	50
Figura 12.- Perfil altitudinal entre el punto TCA1 y TCA2 en el Tiradero a Cielo Abierto, Berriozábal.....	52
Figura 13.- Comparación de Imágenes de Google Earth de diferentes años del Tiradero a Cielo Abierto.	53
Figura 14.- Condiciones y perfil realizado en SC1.	56
Figura 15.- Condiciones y perfil realizado en SC ₂	56
Figura 16.- Condiciones y perfil realizado en TCA ₁	58
Figura 17.- Condiciones y perfil realizado en TCA ₂	58
Figura 18.- Concentración de metales en SC.....	66
Figura 19.- Concentración de metales en TCA.	67

Acrónimos

CRT. - Concentración de referencia total

ECS. - Evaluación de la Calidad del Suelo

EPA. - Agencia de Protección Ambiental

INEGI. - Instituto Nacional de Estadística y Geografía

LAC. - Ley Ambiental de Chiapas

LGEEPA. - Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.

LGPGIR. - Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos.

NOM. - Norma Oficial Mexicana

PEPGIRSU - Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos

RS. - Relleno Sanitario

RSU. - Residuos Sólidos Urbanos

SC. - Sitio Controlado

SDF. - Sitio de Disposición Final

TCA. - Tiradero a Cielo Abierto

I. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

Las actividades antrópicas han generado problemas de contaminación a los sistemas atmosféricos, hídricos, biológicos y edáficos, lo que ha modificado las propiedades y funciones de los recursos naturales. En este sentido, los residuos, producto del metabolismo de los centros de población, representan una fuente de contaminación grave debido a su mal manejo, generando alteraciones al ambiente por la interacción y emisión de subproductos de descomposición como el biogás y los lixiviados.

La problemática se ha acentuado ya que la generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) ha experimentado un crecimiento constante a nivel mundial y nacional. En México, durante el periodo entre los años 2003 al 2015 la cantidad de RSU se incrementó de 32.9 a 53.1 millones de toneladas al año, es decir, un aumento del 61.2%. Del total de residuos, el 33% se atribuye a tres grandes urbes; la Ciudad de México, Estado de México y Jalisco, mientras que 26 entidades federativas presentan valores de generación menores a las 4,000 toneladas diarias. Sin embargo, muchos de estos estados no cuentan con recursos económicos, técnicos y personales para el manejo adecuado de sus residuos, lo cual genera problemas ambientales aún más graves ([SEMARNAT, 2012](#)).

El manejo de los RSU en México se puede explicar en tres procesos; la recolección, el reciclaje y por último la disposición final. Este último, se lleva a cabo en tres modalidades de Sitio de Disposición Final (SDF): los rellenos sanitarios, los sitios controlados y los tiraderos a cielo abierto. Los Rellenos Sanitarios (RS) cuentan con las mejores especificaciones para la protección del ambiente, ya que se debe controlar la fuga de lixiviados y la generación de gases; por otra parte, los Sitios Controlados (SC) solo cumplen con especificaciones referentes a las obras, infraestructura y operación, pero no así con las de impermeabilización. Por último, son los sitios denominados Tiraderos a Cielo Abierto (TCA), en los cuales no se cuenta con especificaciones y reglamentación alguna ([SEMARNAT, 2013](#); [INEGI, 2011](#)).

Los SDF son clave en el proceso de manejo de residuos ya que su objetivo principal es prevenir la contaminación al ambiente y la afectación a los seres vivos, pero en la actualidad es el punto más endeble del proceso, ya que la mayoría de los sitios no cumplen con las especificaciones que establece la normativa existente o se encuentran rebasados en su capacidad ([Bernache, 2012](#)).

Cuando los SDF no cumplen con las normas de protección al ambiente, se encuentran rebasados o son inexistentes, los residuos se suelen depositar directamente al suelo, en espacios de depresiones naturales del terreno como lotes baldíos, cañadas, barrancas y cauces de río, iniciando así el proceso de

modificación del ecosistema; afectando a los subsistemas agua, atmosfera, biota y suelo.

En varios estudios se han reportado los impactos ambientales negativos relacionados con el mal manejo de los RSU; [Acurio et al., \(1997\)](#) menciona la contaminación a los recursos hídricos superficiales y subterráneos; contaminación atmosférica; la contaminación del suelo y el impacto sobre el paisaje. Por otra parte, en [Cruz et al., \(2002\)](#) se calculó la cantidad de lixiviados que se generan anualmente en un TCA y el tiempo en el que estos entraran en contacto con el acuífero, aunado al cálculo de generación de biogás anual y su composición. En este mismo sentido [Pérez et al., \(2002\)](#) hace un estudio de 20 pozos alrededor de un basurero con más de 15 años de actividad, donde se encuentran valores de coliformes fecales y nitratos superiores a los límites de la normativa vigente ([NOM-127-SSA1-1994](#)). [Kiss y Encarnación \(2006\)](#), hacen un listado de las consecuencias del inadecuado manejo en la disposición de la basura entre los que resalta: la contaminación de aguas freáticas y del suelo, el aumento en la producción de gases de efectos invernadero y el alto riesgo de la población de contraer infecciones transmitidas por aire, agua y vectores de fauna nociva.

En los estudios anteriores el tema central se basa en las afectaciones a la atmósfera y los recursos hídricos, producto de la interacción con los RSU. Sin embargo, pocos de ellos analizan las afectaciones ambientales sobre el suelo en los SDF de RSU. En este sentido, y debido a la importancia del suelo en el buen funcionamiento del ecosistema, es necesario conocer todas las afectaciones que generan los RSU al ambiente y entender cómo es el comportamiento general del sistema. Aunado a lo anterior, cabe mencionar que uno de los objetivos para la protección del medio ambiente en la “Declaración del Milenio” del año 2000, de la cual México retoma puntos importantes, se incluye como punto importante a trabajar la conservación del recurso suelo, haciendo hincapié en su importancia para las funciones ecológicas de los ecosistemas ([ONU, 2000](#)).

En el presente trabajo se busca generar información de las afectaciones a las propiedades y características del suelo, originadas por la interacción con los residuos y los subproductos de su descomposición en dos sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en el estado de Chiapas.

1.2 Justificación

Los casos de contaminación de los diferentes sistemas de la Tierra son cada vez más frecuentes, lo que se origina, muchas veces, por las actividades antropogénicas, las cuales generan subproductos que son emitidos a los cuerpos de agua, a la atmosfera, al suelo y que desencadenan efectos adversos en el ambiente.

En este sentido, la contaminación se puede generar por distintos factores, sin embargo, el presente trabajo abordará la suscitada por la inadecuada disposición

de RSU y las consecuencias en las propiedades del suelo. Éste último es un recurso clave para el funcionamiento del ecosistema, es decir, la infiltración, el ciclo del agua, ciclo de nutrientes, función amortiguadora y transformadora de contaminantes (Siebe *et al.*, 1996).

Para esta investigación se pretende utilizar indicadores visuales (*comparación de imágenes satelitales de diferentes años*), físicos (estabilidad de agregados, porosidad, infiltración, densidad aparente y real) y químicos (conductividad eléctrica, pH, materia orgánica y fósforo) para evaluar la calidad del suelo y determinar sus cambios en las características ecológicas. Los indicadores que se utilizan han sido estudiados y evaluados por distintas investigaciones como las de Cantú *et al.*, (2007), Cruz *et al.*, (2004), García *et al.*, (2012), Ferreras *et al.*, (2009) en donde se argumentan las posibilidades y la viabilidad para la utilización de éstos como una herramienta que permite obtener información sobre las propiedades, los procesos y las características del suelo (Astier *et al.*, 2002).

Como se mencionó anteriormente, en el país existen estados con recursos escasos para el manejo correcto de los RSU, tal es el caso del sitio de estudio, el Estado de Chiapas, el cual cuenta con 118 SDF, de los cuales sólo uno corresponde a la modalidad de RS y 117 a TCA. De estos últimos, 37 cumplen con criterios de ubicación correspondientes a la normativa vigente aplicable y 80 sitios deben ser clausurados para ser construidos de nueva cuenta. La situación es alarmante ya que los TCA no tienen las condiciones de seguridad y protección necesarias para prevenir la contaminación y se estima que para el año 2020 en el estado haya un incremento en la producción de RSU de alrededor de un 13 % (PEPGIRSU, 2010).

Bajo este contexto, es primordial presentar información de la afectación que provoca el depósito inadecuado de RSU, haciendo hincapié en la importancia de implementar la normativa vigente y generar sistemas de manejo de residuos más eficientes. Aunado a lo anterior, es importante mencionar que el presente trabajo es un análisis descriptivo de las afectaciones al suelo por RSU, ya que se necesita tener un primer acercamiento a este proceso debido a que no se ha reportado investigaciones similares.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

- Evaluar la calidad del suelo en dos sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos: en un sitio controlado y un tiradero a cielo abierto.

1.3.2 Específicos

- Identificar, mediante trabajo de campo, el funcionamiento de los SDF y las afectaciones sobre el paisaje circundante.
- Evaluar las propiedades del suelo por medio de indicadores físicos y químicos en puntos con y sin influencia de residuos: en el SC de Villaflores y el TCA de Berriozábal.
- Cuantificar el contenido de metales, en el suelo, asociados al depósito de residuos en los SDF de estudio.

1.3.3 Preguntas de investigación

- ¿Cuál es el funcionamiento de los sitios de depósito de residuos, y su afectación sobre el paisaje circundante?
- ¿Cuál es el cambio en las propiedades del suelo debido al depósito de RSU?
- ¿Cómo se modifican las concentraciones de metales en el suelo asociados al depósito de RSU?

II. Marco teórico

2.1 El suelo

El suelo es el soporte principal de la vegetación, la infraestructura, y el hábitat de la biodiversidad, participa de manera esencial en el funcionamiento de cualquier ecosistema.

Distintas disciplinas han intentado definir a este recurso basándose en sus necesidades y en las funciones donde contribuye el suelo dentro de su área. Pero, sin importar el enfoque desde donde se defina, todos concuerdan en que es indispensable para el mantenimiento de las actividades en el planeta.

En sentido más estricto, se reconoce al suelo como la capa más superficial de la corteza terrestre, conformado por minerales, materia orgánica, organismos vegetales y animales, aire y agua. Es un cuerpo natural tridimensional que está en contacto con los sistemas atmosféricos, acuáticos y bióticos, los cuales le dan características típicas en cada región (Siebe *et al.*, 2003; SEMARNAT, 2007; FAO, 2015).

Estas características también se atribuyen a la interacción de los diferentes factores formadores, entre los que se encuentran; la topografía, el gradiente altitudinal, el clima, el material parental, los organismos vivos y todos se encuentran en función del tiempo (Porta *et al.*, 2003; García *et al.*, 2012). Debido a todos los procesos que deben ocurrir para su formación, se denomina al suelo como un recurso irrecuperable o no renovable, esto porque la regeneración del suelo es tan difícil y tardada que después de 2,000 años solo se forman 10 cm de este recurso (FAO, 2015).

La formación de la capa edáfica es un proceso bastante complejo que involucra cambios físicos, químicos y biológicos de la roca madre. Los procesos físicos contribuyen a la reducción del tamaño de partículas sin alterar su composición. Los procesos químicos se deben a la separación, alteración y resíntesis de las partículas minerales de las rocas, debido a la interacción con el agua, oxígeno, dióxido de carbono y compuestos orgánicos (Budhu, 2008). Los procesos biológicos son el resultado de la actividad llevada a cabo por la comunidad de flora, macro, meso y microfauna que habitan en el suelo (Porta *et al.*, 2003).

En todo el proceso de formación, el suelo provee servicios ambientales de manera directa o indirecta a la población, estos beneficios permiten tener recursos como agua, aire, alimentos, materia prima. Sin embargo, y a pesar de la importancia para la vida, este recurso no ha recibido la atención y conservación que merece, ya que más del 33% del suelo en el mundo se encuentra degradado. Lo anterior, debido a múltiples factores entre los que resaltan la erosión, salinización, acidificación,

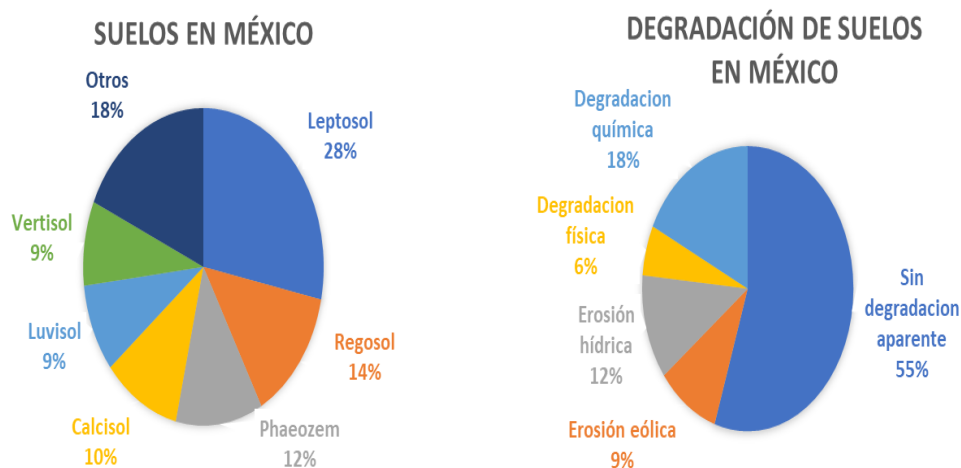
contaminación química y agotamientos de nutrientes, agricultura, tala excesiva, expansión de la mancha urbana, por mencionar solo algunos (FAO, 2015).

2.1.1 Suelos en México

México cuenta con una gran diversidad de suelos, de los 32 grupos que reporta el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS, 2007), se concluye la existencia de 26 de estos en el país.

Dicha diversidad de suelos se debe a la conjunción particular de los factores formadores como su compleja topografía, el amplio gradiente altitudinal, la presencia de una gran variedad de climas, litologías, fauna, tipos de vegetación y el tiempo.

En este sentido, el 81.7% de la superficie terrestre del territorio nacional se encuentra cubierto por los siguientes tipos de suelos; los Leptosoles, con un 28.3 % de superficie, seguidos por los Regosoles, que abarcan el 13.7%. Los Phaeozems, cubren 11.7%, Calcisoles el 10.4%, los Luvisoles el 9 % y los Vertisoles que abarcan el 8.6 % (Ver figura 1a). Sin embargo, se reporta que el 44.9 % de los suelos se encuentran en un nivel de degradación (Ver figura 1b), lo que afecta directamente a los procesos que se llevan a cabo en cada ecosistema (SEMARNAT, 2007).



a) Suelos presentes en el México.

b) Degradación de los Suelos.

Figura 1.- Los suelos de México y los procesos de degradación.

Fuente: Elaboración propia, con datos de SEMARNAT (2007).

De acuerdo con SEMARNAT (2007) y IUSS (2007), se presentan las características de los principales tipos de suelos en el país.

- Los Calcisoles son suelos en los cuales hay una acumulación sustancial de material calcáreo. Están extendidos en ambientes áridos y semiáridos, con frecuencia asociados con materiales parentales altamente calcáreos. Se desarrollan preferentemente en matorrales xerófilos con arbustos y pastos

efímeros. En México se encuentran en el Desierto Chihuahuense, y en los estados de Aguascalientes, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, San Luis Potosí, Sonora y Zacatecas.

- Los Leptosoles son suelos muy someros sobre roca continua, pedregosos y poco desarrollados, pueden contener una gran cantidad de material calcáreo. Son suelos azonales y particularmente comunes en regiones de montaña y planicies de calizas, asociados a sitios con compleja orografía. Se encuentra en climas secos, templados y húmedos. En México, son comunes en la Sierra Madre Oriental, Occidental y la del Sur, península de Yucatán y Baja California.
- Los Luvisoles se encuentran sobre una gran variedad de materiales no consolidados. Son suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo, debido a procesos pedogenéticos (migración de arcilla) que lleva a un horizonte subsuperficial árgico. Son muy comunes en climas templados y fríos o cálidos y húmedos. Se encuentran entre los suelos más fértiles, sobre todo en producción de granos pequeños y caña de azúcar. En México se encuentran, principalmente, en la Sierra Madre Occidental, Guerrero, Oaxaca.
- Los Phaeozems se localizan en pastizales relativamente húmedos y regiones forestales en clima moderadamente continental. Tienen horizonte superficial oscuro, rico en humus, pueden o no tener carbonatos secundarios, pero tienen alta saturación de bases en el metro superior del suelo. En México se distribuyen en partes del Eje Neovolcánico, la Sierra Madre Occidental, la Península de Yucatán, Guanajuato y Querétaro, principalmente.
- Los Regosoles forman parte de un remanente taxonómico que contienen un conjunto de suelos que no pueden ser agrupados dentro de alguno de los grupos reconocidos por el IUSS. Son suelos muy jóvenes que se desarrollan sobre material no consolidado, con colores claros y pobres en materia orgánica. No son muy someros ni muy ricos en gravas (*Leptosoles*), arenosos (*Arenosoles*) o con materiales flúvicos (*Fluvisoles*). Se encuentran en todos los climas y en todas las elevaciones. En México las mayores extensiones se encuentran en la Sierra Madre Occidental y del Sur.
- Los Vertisoles son suelos muy arcillosos que se mezclan con alta proporción de arcillas expandibles. Forman grietas anchas y profundas desde la superficie hacia abajo cuando se secan. Localizados en climas semiáridos a subhúmedos. La vegetación natural que se desarrolla es de sabanas, pastizales y matorrales. En México se encuentran en colores negros y gris oscuro en la zona centro y oriente, y el café rojizo hacia el norte. Se utilizan para la producción de caña, cereales, hortalizas y algodón en los principales distritos de riego en Sinaloa, Sonora, Guanajuato, Tamaulipas y Veracruz.

2.1.2 Suelos de Chiapas

La superficie terrestre del estado de Chiapas se compone de 15 tipos de suelos (de los 25 reportados para México), de los cuales los Leptosoles, Phaeozems y Acrisoles son los 3 principales, cubriendo el 53% del territorio. La diversidad edafológica se debe, entre otros muchos factores formadores, a las siete regiones fisiográficas y a los terrenos geológicos paleozoicos, terciarios, cuaternarios del cretácico inferior, terciarios oligocenos, triásico y jurásico. Estos factores dan pie a la formación de suelos tales como; Leptosoles, Cambisoles, Phaeozems, Acrisoles, Regosoles, Andosoles, Luvisoles, Vertisoles y Nitisoles ([INAFED, 2010](#)).

Las características de los principales tipos de suelos del estado se describen a continuación ([POT, SF](#)):

- Leptosoles: es el tipo de suelo que predomina en Chiapas con el 20 %, se caracteriza por tener profundidades menores de 10cm, los cuales se presentan, principalmente, sobre las sierras, laderas y barrancas.
- Phaeozems: se presentan como el segundo tipo más predominante en el territorio chiapaneco (17 %), son típicos de matorrales, bosques tropicales. Posee una capa superficial abundante de humus muy fértil, se caracteriza por estar sobre roca caliza o material rico en cal, son poco profundos y generalmente arcillosos.
- Acrisoles: se encuentran con extensión del 16.2 %, existen tres subunidades; Acrisol hémicos, plínticos y órticos. Son típicos de regiones templadas y lluviosas, son comúnmente rojos, amarillos o amarillos claros con manchas rojas y se caracterizan por tener mayor cantidad de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial.

2.1.3 Funciones de los suelos

Los suelos cumplen funciones vitales en la dinámica de los ecosistemas; soporte y abastecimiento de agua, oxígeno y nutrimentos para las plantas, hábitat de numerosos organismos, regulador del ciclo hidrológico y procesos biogeoquímicos. También, son primordiales para el mantenimiento de la vida humana; soporte de las actividades agrícolas, pecuarias, forestales, infraestructura urbana y de depósito de desechos producto de las diversas actividades humanas ([Siebe et al., 2003](#)).

De acuerdo con [SEMARNAT \(2007\)](#), los servicios ambientales son las funciones que realizan los ecosistemas y que producen beneficios a la población, se clasifican en servicio de soporte, regulación, provisión y culturales. Al ser el suelo parte importante de cada uno de los ecosistemas, contribuye de manera significativa a los servicios ambientales en las siguientes categorías:

- **Servicios de soporte:** Servicio relacionado con la heterogeneidad del suelo y a la capacidad de proveer una gran variedad de microambientes para las bacterias, protozoarios, artrópodos y nematodos que se ven involucrados en el reciclaje de materia orgánica y en la continuidad de los principales ciclos biogeoquímicos. También, a la propiedad de fijar nitrógeno atmosférico a través de las bacterias y para después ser utilizado por las plantas.

Además, es este recurso el principal reservorio de carbono de los ecosistemas terrestres, con aproximadamente el doble de carbono que se encuentra en la atmósfera. Es importante mencionar, que este gas es uno de los principales causantes del efecto invernadero, por lo que se reduce su liberación a la atmósfera manteniendo las características del suelo.

- **Servicios de Regulación:** Son aquellos que modulan y/o mantienen los procesos que requiere el ecosistema para permanecer funcional. Estos servicios se asocian con la capacidad del suelo para filtrar o retener compuestos potencialmente tóxicos, que pudieran afectar a las aguas superficiales y subterráneas o a la biota de los diferentes ecosistemas. Lo anterior se favorece debido a la interacción entre las partículas de arcilla y la materia orgánica, lo que ayuda a degradar o desactivar los compuestos tóxicos. Aunado a lo anterior, este recurso tiene la posibilidad de absorber y posteriormente emitir calor, lo que funciona como un regulador climático.
- **Servicios de provisión:** Estos servicios se obtienen de forma indirecta y hacen alusión a la capacidad de producción de alimentos del suelo para satisfacer las necesidades de los humanos y animales. También de los productos primarios que se obtienen para las actividades productivas del ser humano, así como la extracción de materiales como arenas, gravas, piedras, metales.
- **Servicios Culturales:** Son los beneficios no materiales que las personas obtienen de los ecosistemas, disfrute de la belleza escénica: Los paisajes proporcionan espacios importantes para la recreación, cuyas vertientes distintas se relacionan con el estado de conservación del ecosistema ([Merino y Robinson, 2006](#)). Estos servicios comprenden la inspiración estética, la identidad cultural, el sentimiento de apego al terruño y la experiencia espiritual relacionada con el entorno natural. Los servicios culturales a menudo están relacionados con los de abastecimiento y regulación: la agricultura en pequeña escala no solo tiene que ver con los alimentos y la producción, sino también con la forma de vida de los agricultores y su forma de relacionarse con el suelo, teniendo varias formas de interconexión (rituales) con este recurso.

2.2 Calidad del suelo y sus indicadores

Debido a la constante degradación y falta de conocimiento de la situación de los sistemas naturales de la Tierra, en la conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente y Desarrollo de RIO 1992, se comenzó a desarrollar diferentes métodos para monitorear los cambios ocurridos en el ambiente. Los métodos que se desarrollaron determinaron el uso generalizado de indicadores para la evaluación de la calidad ambiental; sustentabilidad, riesgo, vulnerabilidad, planificación, **calidad del suelo**, etc.

La calidad de un bien o servicio está dada por la capacidad para satisfacer las necesidades o requerimientos propios a través de sus propiedades y funciones de este. Para el caso de la calidad de los recursos naturales, en este caso el suelo, se puede abordar desde diferentes ámbitos, debido a la importancia para la vida de los seres vivos y a la relación que mantiene con los demás recursos naturales ([Singer et al., 2000](#)).

En un principio, la definición de la calidad del suelo se traducía, preponderantemente, como el potencial que tenía este recurso para la productividad agrícola, haciendo hincapié en la constante demanda de alimento de la población. Es a partir de los años 50's que el concepto toma otro contexto, adquiriendo una mayor importancia para la comunidad científica, comenzando a poner en contexto la productividad potencial, fertilidad, calidad ambiental y la sostenibilidad del suelo. Todo esto debido a la constante preocupación por la degradación del suelo en gran parte del mundo ([Cruz et al., 2004](#)).

Es importante notar que las definiciones han evolucionado y ahora no se concibe al suelo solo como un medio de producción agrícola y proveedor de recursos al humano, sino que se ha conformado una definición holística, en donde el suelo cumple con distintas funciones dentro del ecosistema y que es parte de una interacción simbiótica con todos los actores que tienen un vínculo con él.

En general, el término de calidad del suelo engloba funciones y propiedades físicas, químicas y biológicas, como lo es la capacidad de atenuación de contaminantes, la recarga de mantos acuíferos a través de la infiltración, la provisión de nutriente a las plantas y biota que sustenta, además de todos los beneficios que otorga a los seres humanos ([Doran y Parkin, 1994](#)). En este sentido, la IUSS define a la calidad del suelo como “la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat” ([Karlen et al., 1997](#)).

Cabe mencionar que la calidad del suelo debe adaptarse a las condiciones del ecosistema en el que se encuentra, con el objetivo de incluir los tres principios fundamentales que engloba este concepto ([Astier, 2002](#)).

- Productividad del suelo: capacidad de producción de alimentos sanos para los seres vivos que consuman productos provenientes de él.

- Calidad del medio ambiente: mantenimiento de la calidad del ambiente, cumpliendo funciones como amortiguación de contaminantes, ciclo hidrológico, ciclos biogeoquímicos y cumplir con los servicios ambientales.
- Salud del suelo: estabilidad y mantenimiento de las propiedades y funciones, conservando de manera óptima sus actividades en el ecosistema

La evaluación de la calidad del suelo representa un proceso dinámico que refleja las condiciones de las propiedades edáficas en un momento y condición específica. Esta evaluación debe identificar funciones y propiedades críticas del suelo, seleccionando indicadores que muestren información útil para los objetivos del estudio. Los indicadores pueden ser las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, los cuales se vuelven una herramienta útil para conocer y verificar información de los procesos y características de este recurso, con la intención de, posteriormente, monitorear, planificar y evaluar (Astier *et al.*, 2002; Sequeda *et al.*, 2011).

Al realizar la evaluación de la calidad del suelo con indicadores que se asocian con los aspectos físicos, químicos y biológicos es posible tener un panorama completo de lo que sucede en el suelo, conociendo cómo las variables se interrelacionan entre sí, además, al ser una herramienta rápida y eficiente para estimar la calidad del suelo de cada sitio representa las características del lugar y el manejo (Doran y Parkin, 1994)

El presente trabajo retoma características físicas y químicas del suelo, las cuales son un indicador de procesos y funciones dentro del ecosistema, tales como el nivel de compactación, destrucción de agregados y/o su estructura, cambio en la infiltración y la escorrentía, pérdida de nutrientes y materia orgánica y contaminación potencial por metales.

Los indicadores de la calidad del suelo se pueden clasificar en cuatro grupos generales: visuales, físicos, químicos y biológicos (NRCS, 2010). A continuación, se hace una contextualización de la importancia de cada indicador utilizado, así como su vinculación con los objetivos de la presente investigación.

2.2.1 Indicadores visuales

Los indicadores visuales se obtienen por medio del monitoreo de los cambios en características observables a simple vista del paisaje, con base en esto es posible identificar situaciones como encharcamiento, escurrimiento, la alteración del terreno como desplazamiento o disturbios de la superficie suelo y/o remoción de vegetación.

La evaluación por medio de estos indicadores se hace a través de una interpretación fotográfica o de imágenes, en donde se analizan los cambios en el paisaje, así como la presencia y estado de la cubierta vegetal, colocación de infraestructura y/o

residuos (Page *et al.*, 2013). Ello ayuda a tener un primer acercamiento al sitio de estudio y poder observar su comportamiento en el tiempo, teniendo en cuenta que se necesita un análisis detallado para poder llegar a una conclusión.

2.2.2 Indicadores físicos

Las características físicas son parte indispensable para la evaluación de la calidad del suelo, ya que no se pueden mejorar fácilmente y su periodo de consolidación puede durar hasta décadas. Estos se asocian con la disposición de partículas sólidas, la dinámica e infiltración del agua en el suelo, así como las limitaciones que pueden tener la vegetación y microorganismos para establecerse y desarrollarse.

Aunado a lo anterior, es importante mencionar que tanto la textura como la densidad real no son tomadas como indicadores, sin embargo, es necesaria su determinación para poder obtener la evaluación de otras propiedades del suelo, en este sentido se hace una breve explicación de su relevancia como una propiedad del suelo y su relación en el correcto funcionamiento del sistema edáfico.

Profundidad del suelo: La profundidad de desarrollo se expresa por el espesor en centímetros del suelo desde el inicio del primer horizonte hasta el lecho de roca no intemperizada, o hasta el horizonte cementado. El suelo está delimitado en la parte superior por la superficie del terreno, su límite inferior en ocasiones es más complejo de distinguir, pero es delimitado por la roca madre.

Es importante mencionar que cada tipo de suelo tiene una profundidad característica, dependiendo de las condiciones y factores formadores en los que se desarrolle, ya que se encuentran suelos desde, aproximadamente, los 10 cm y hasta los 100 cm (IUSS, 2007).

Cada suelo se divide en horizontes y se conoce con el nombre de Solum a los horizontes A y B que forman parte superior de este. La cantidad de horizontes, su nivel de desarrollo y profundidad es una propiedad que se relaciona con la posición en el paisaje: suelos en superficies altas tienen más tiempo para desarrollarse comparados con los de los valles que continuamente están recibiendo material o en laderas que están siempre expuestos a la erosión, con el desarrollo de las plantas y biota: ya que condiciona el desarrollo radical y el volumen de agua disponible para la vegetación (Aguiló *et al.*, 1998; Siebe *et al.*, 1996).

Textura: La textura está en función de la distribución de tamaños de las partículas sólidas que constituyen el suelo. Es una característica física de los suelos con menos cambio a lo largo del tiempo. Como se mencionó anteriormente, no es considerado como un indicador para la presente investigación, sin embargo, su determinación es necesaria, ya que indicadores como la porosidad, la retención de agua, la infiltración, la capacidad de intercambio catiónico del suelo, la toman como parámetro para determinar sus valores (Aguiló *et al.*, 1998; Siebe *et al.*, 1996). El sistema de clasificación textural que se utilizó en el presente estudio fue el

establecido en 1951 por el Departamento de Agricultura (U.S.D.A.), el cual es muy utilizado y aceptado para estudios con relación con la productividad agrícola y forestal.

Como parte de los indicadores utilizados en el presente trabajo se encuentra la estabilidad de agregados, densidad aparente, infiltración y la porosidad, los cuales son características físicas que se han estudiado en diferentes trabajos de investigación (García *et al.*, 2012; Cruz *et al.*, 2004, USDA, 2008; Orellana, 2004; Urricariet *et al.*, 1999) y que se ha demostrado que son de gran utilidad como indicadores de la calidad del suelo.

2.2.2.1 Estabilidad de agregados

La estabilidad de agregados y la estructura del suelo son dos propiedades que están íntimamente vinculadas. De acuerdo con Rucks (2004), la estructura del suelo se define como el arreglo espacial de sus partículas y la porosidad. Las partículas se refieren tanto a las fracciones granulométricas; arena, arcilla y limo, así como las estructuras que se forman de la agregación de las fracciones granulométricas, es decir, las unidades primarias (arena, arcilla y limo) y las secundarias (agregados) componen las partículas del suelo.

La estructura es producto de las interacciones de los procesos físicos, químicos y biológicos, es decir, se necesita la presencia de coloides floculados (iones y arcillas e iones) que actúan como cementantes entre las partículas primarias, además, es indispensable la materia orgánica, la cual produce una alta cementación por unidad de masa e incrementa significativamente el almacenamiento de agua, a la vez que confiere cierta resistencia a la intemperización y a la liberación de elementos. Por otra parte, la cobertura vegetal juega en un papel clave con este indicador ya que no sólo aporta residuos orgánicos, sino que sus raíces influyen en la estabilidad de agregados y su dosel protege al suelo del efecto erosivo de la lluvia y el viento que ocurren en el suelo. En este sentido la estructura se divide en macro y microestructura:

- La macro estructura; es el arreglo de las partículas primarias y secundarias visibles a simple vista y es posible describir en campo. La descripción de agregados en campo se hace mediante la forma y disposición (tipo), tamaño (clase) y su desarrollo o agregación.
- La micro estructura; es el arreglo de las partículas primarias para formar las secundarias, con componentes coloidales como cemento de los granos y se describe por medio de láminas delgadas en laboratorio.

La estructura del suelo y la estabilidad de agregados juegan un papel fundamental en los procesos para sostener la productividad, la infiltración y drenaje del agua, la aireación, el almacenamiento de nutrientes, la penetración de raíces (el potencial que tienen las plantas para que sus raíces puedan penetrar una cierta distancia en

el Solum). También, nos indica la resistencia que tiene el propio suelo a la destrucción y consecuentemente a la erosión por viento o agua. (Siebe *et al.*, 1996).

La **Estabilidad de Agregados** está supeditado a que exista alto contenido de coloides floculados y que actúen como cemento entre las partículas primarias. Entre mayor es la saturación del complejo coloidal con cationes de alto potencial como el Calcio, la estructura del suelo es más alta. Cuando el complejo coloidal es saturado con una alta proporción de cationes de bajo potencial iónico como el sodio, la estructura es baja. Esta propiedad está en función de la textura del suelo, la materia orgánica y factores biológicos (Rucks *et al.*, 2004).

La afectación a la estructura del suelo propicia la poca infiltración, lo que provoca escorrentía, erosión y la reducción de la calidad del suelo debido a la turbidez, sedimentación y el enriquecimiento de nutrientes (USDA, 2008).

La evaluación en campo de la estabilidad de los agregados es un reflejo de la estructura del suelo y la capacidad que tienen estos para resistir la desintegración de sus partículas al aplicar una fuerza externa, ya sea por fenómenos meteorológicos o acciones antropogénicas (Nichols y Toro 2011).

Las pruebas de la estabilidad de agregados en agua indican que tan capaz es el suelo para resistir a fuerzas de erosión por agua y se asocian con la cantidad de materia orgánica del Suelo (Orellana *et al.*, 1997; USDA, 2008).

2.2.2.2 Porosidad

El espacio poroso se encuentra determinado por el número de poros de distintos diámetros (micro y macro poros) presentes en un determinado volumen de suelo. Dicha característica depende de la textura, densidad aparente y contenido de materia orgánica (Rucks *et al.*, 2004).

Debido a que la retención del agua en los suelos respeta las leyes de la capilaridad y de adsorción, entre más estrecho sea un capilar, más alto subirá el agua dentro de él y más grande será la fuerza de retención. Es decir, en los macro poros, de diámetro mayor a 50 nm, el agua se drena fácilmente por gravedad, y por lo tanto son los responsables del drenaje y la aireación del suelo, además, es en este espacio donde se desarrollan las raíces de las plantas. Para poros menores de 50 nm y mayores de 2nm (microporos) el agua es retenida con mayor fuerza y puede ser absorbida por las plantas y en poros de diámetros menores a 2nm el agua es fuertemente retenida y es imposible que sea aprovechada por las plantas, es denominada “agua muerta” (Siebe *et al.*, 1996).

2.2.2.3 Infiltración

La infiltración es el proceso a través del cual el agua de riego o de lluvia ingresa al suelo a través de la superficie, hacia sus capas inferiores. Este proceso varía respecto a la textura y humedad, es decir, la infiltración será más rápida en suelos

arenosos y más lenta en los arcillosos, y a medida que el suelo se va saturando de agua la velocidad de infiltración va disminuyendo hasta alcanzar un valor prácticamente constante, denominado velocidad de infiltración básica.

Tabla 1.- Valores de infiltración de referencia con base a la textura.

Relación entre la textura e infiltración	
Textura	Velocidad de Infiltración (mm/h)
Arcilloso	< 5
Franco - Arcilloso	5 - 10
Franco	10 – 20
Franco arenoso	20 – 30

Fuente: Adaptado de [CITRA \(2009\)](#).

El agua puede comportarse de dos maneras; la primera, almacenarse temporalmente y estar disponible para las raíces de las plantas. La segunda, escurrir debido a que se excede la capacidad de infiltración, transportando partículas del suelo y con ellas nutrientes y productos químicos que pueden provocar la contaminación de cuerpos de agua subterráneos y superficiales ([USDA, 2008](#)).

La textura, la compactación del suelo, la materia orgánica y la posición en el relieve del sitio, son variables que influyen sobre **este indicador**. La posición en el relieve es sobresaliente debido a la fuerza gravedad, es decir, la pendiente va determinar la cantidad de tiempo de contacto del agua con la fracción edáfica y los procesos que se puedan llevar a cabo. La compactación origina una capa impermeable que impide la entrada de agua al suelo, favoreciendo la escorrentía. La materia orgánica mantiene la porosidad del suelo durante periodo largos de tiempo, lo que hace que la velocidad de infiltración no se altere y, más aún, pueda aumentar ([CITRA, 2009](#)).

2.2.2.4 Densidad aparente

La densidad aparente es la medida en peso del suelo seco por una unidad de volumen. Difiere de la densidad real, ya que este indicador incluye las partículas del suelo y al espacio poroso entre estas. Este indicador refleja la capacidad del suelo para el movimiento de agua, aire y solutos, además, es una medida de la compactación del suelo ([BLANCO, 2009](#)).

Una densidad aparente elevada, dependiendo de los valores respecto a su textura, indica baja porosidad y alta compactación del suelo, lo que causa restricciones al crecimiento de las plantas. Al tener una mayor compactación se aumenta la escorrentía y la erosión de los terrenos en pendientes y/o suelos saturados de agua en zonas planas. Asimismo, una densidad demasiado baja es indicador de una baja estructura y estabilidad de agregados, lo que también impide el desarrollo óptimo

del suelo (USDA, 2008). Por ende, hay valores en los cuales el crecimiento de vegetación se encuentra dentro de los adecuados (Ver tabla 2).

Tabla 2.- Valores óptimos de densidad aparente para el crecimiento de plantas.

Textura del Suelo	Densidad para el crecimiento de las plantas (g/cm ³).	Densidad que restringe el crecimiento de la raíz (g/cm ³).
Arenoso	< 1.60	> 1.80
Limoso	< 1.40	> 1.65
Arcilloso	< 1.10	> 1.47

Fuente: Adaptado de USDA (2008).

2.2.3 Indicadores químicos

Los indicadores químicos están asociados a condiciones que afectan la relación suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo y la disponibilidad de nutrimentos para las plantas y los microorganismos. La materia orgánica, el pH, la conductividad eléctrica, los cationes como el fósforo, son algunos de los indicadores más utilizados (García *et al.*, 2012).

2.2.3.1 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es una medida de la concentración de las sales solubles en la solución del sustrato del suelo. Es una medida de la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica, entre más alto el valor más fácil se mueve la corriente eléctrica y mayor concentración de sales (Bárbaro *et al.*, 2014).

Esta propiedad está influenciada por la combinación de otras como la textura, el contenido de materia orgánica, humedad del suelo, capacidad de intercambio catiónico, salinidad, pH, tipos de suelo, entre otras (Simón *et al.*, 2013).

2.2.3.2 Potencial de hidrógeno

El potencial de Hidrogeno (pH) es una medida de la acidez o alcalinidad del medio. Los valores de pH del suelo controlan las reacciones químicas que determinan si los nutrientes están o no disponibles y sobre todo controla procesos pedogénéticos (Siebe *et al.*, 1996; Bárbaro *et al.*, 2014).

Los valores de pH del suelo ayudan a identificar los procesos que ocurren en el sistema edáfico. Por ejemplo, cuando se encuentra en el rango óptimo (depende del tipo de vegetación y suelo, la mayoría encuentra su estabilidad en valores cercanos a pH = 7) la mayoría de los nutrientes mantienen su máximo nivel de solubilidad. Por otro lado, cuando está debajo de este rango, se presentan

deficiencias de nitrógeno, potasio, calcio y magnesio; mientras que, por encima, puede disminuir la solubilidad del hierro, fósforo, manganeso, zinc y cobre. Y cuando el pH es menor de 5, lo cual puede resultar tóxico, los óxidos metálicos de hierro, manganeso, cobre y zinc se hacen más soluble (Bárbaro *et al.*, 2014).

2.2.3.3 Materia orgánica (carbono y nitrógeno)

El principal constituyente de la materia orgánica es el carbono (C), que llega a representar entre el 40 y el 60 % de esta, dependiendo del grado de descomposición. El C es uno de los componentes más importantes de los suelos ya que permite realizar una identificación y cuantificación para estimar la fertilidad y el riesgo de degradación. El C total se compone del C inorgánico y el orgánico. En el caso del C orgánico se puede encontrar en forma de residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos, en forma de humus (Martínez *et al.*, 2008; Kloster *et al.*, 2016).

La reserva de C en el suelo representa un importante regulador del dióxido de carbono de la atmosfera y de esta manera mitigar la creciente concentración de CO₂, ayudando a la lucha contra los gases de efecto invernadero (Robert, 2002). Aunado a lo anterior, juega un papel importante como fuente de carbono, nitrógeno y energía para los microorganismos del suelo, como cohesión para las partículas del suelo, mejora la capacidad de aireación y transmisión de agua en el suelo (Kloster *et al.*, 2016).

El nitrógeno también juega un papel significativo en el suelo, ya que es uno de los elementos esenciales para la nutrición de plantas y organismos que habitan en este sistema. Debido a su importancia se le considera como un macronutriente, junto con el fósforo y el potasio.

Del N total en el suelo, el 98% se encuentra formando compuestos orgánicos, y dependiendo del contenido de materia orgánica del suelo su contenido puede variar en los primeros 20 centímetros de entre 1 y 10 Kg de N por hectáreas. El N presente en el suelo bajo formas orgánicas no es disponible para las plantas, ya que para ser absorbido primero debe pasar a las formas inorgánicas. El nitrógeno inorgánico se encuentra en formas de nitratos (NO₃⁻), amonio (NH₄⁺) y nitrito (NO₂⁻), los cuales representan el 2 % del N total del suelo. Debido a que la mayoría del N del suelo es orgánico, existe una estrecha asociación entre los contenidos de materia orgánica del suelo y el N total del suelo (Perdomo *et al.*, 2005).

En cuanto al contenido de materia orgánica, es más importante la velocidad y el equilibrio entre procesos de mineralización y humificación, que está condicionado por la actividad microbiana en el suelo, que el contenido total de esta. En este sentido, es importante mencionar la relación C/N, la cual nos arroja la calidad del sustrato orgánico del suelo. Nos indica la tasa de nitrógeno disponible para las plantas; valores altos (mayor a 15) implica que la materia orgánica se descompone lentamente, ya que los microorganismos inmovilizan el nitrógeno, por lo que no

puede ser utilizado por los vegetales; en cambio valores entre 10 y 14 corresponden a una mineralización y ruptura de tejido óptima ([Gamarra et al., 2018](#)).

2.2.3.4 Fósforo intercambiable

El Fósforo (P) en el suelo está asociado con la fracción mineral. Es un macronutriente esencial para las plantas y microorganismos, además, es un nutrimento limitante, ya que es componente de los ácidos nucleicos y de los fosfolípidos. La cantidad y disponibilidad de este elemento depende de la composición mineralógica, la humedad, las características físicas y químicas del propio suelo, estas últimas influyen en la solubilidad de las distintas formas del P, su disponibilidad y el potencial para que este elemento pase de las zonas de alta concentración hacia las raíces de las plantas ([Fernandez, 2007](#); [Sanzano, 2003](#)).

De acuerdo con [Sanzano \(2003\)](#), para fines edafológicos es importante clasificarlo por su disponibilidad mediata o inmediata, es decir, fósforo soluble, insoluble e intercambiable:

- **Fósforo Soluble:** formas aprovechables para las plantas en forma inmediata, fosfatos en la solución del suelo. Su concentración es muy baja, de 200 a 400 gr/ha en los primeros 30 centímetros de espesor.
- **Fósforo intercambiable:** es el llamado fósforo lábil o adsorbido, su disponibilidad es más lenta que el anterior. Su adsorción depende del pH, es decir, a pH ácidos aumenta la adsorción.
- **Fósforo insoluble:** es el que forma parte de los minerales primarios y secundarios, constituye la gran reserva de fósforo del suelo.

2.2.4 Metales

Los metales pesados están presentes en la corteza terrestre, los suelos y las plantas, pero se encuentran en bajas concentraciones, es decir, como elementos traza. En este mismo sentido, se encuentran los llamados elementos mayores (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti y P), los cuales constituyen alrededor del 99% del total de elementos que contiene la corteza terrestre, el resto de los elementos llamados “traza” no exceden el 0.1%. Muchos de ellos son indispensables para el crecimiento y desarrollo de los seres vivos. Sin embargo, si se supera cierto umbral, su efecto pasa a ser tóxico ([Ver tabla 3](#)) ([Gálan et al., 2008](#)).

Los elementos traza en suelos pueden ser de origen geogénico o antropogénico, los primeros, proceden de la roca madre, actividad volcánica, lixiviación de mineralizaciones. Los metales pesados antropogénicos derivan de residuos peligrosos y sólidos urbanos, procedentes de actividades industriales, minería, industria agrícola, y residuos de la población. Para el caso de la contaminación de suelos por metales se suele considerar un análisis de la contaminación por elementos traza, así se incluyen todos los metales presentes. Los más comunes en el suelo y que se consideran como tóxicos también se encuentran fácilmente

disponible en muchos suelos, en concentraciones que superan los niveles de toxicidad.

Tabla 3.- Micronutrientes y macronutrientes para el óptimo funcionamiento de los organismos vivos.

Funciones esenciales para el organismo.	Metales y micronutrientes.
Metales pesados que son micronutrientes esenciales (mg o µg/día)	As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Se, V, Zn.
Otros micronutrientes esenciales	F, L, Si.
Macronutrientes (100 mg o más/día)	Ca, Cl, Mg, P, K, Na, S.
Metales pesados no esenciales	Be, Cd, Hg, Pb, Sb, Ti.

Fuente: Adaptado de [Gálan et al., \(2008\)](#).

La presencia de concentraciones anómalas en los suelos es debido a una degradación denominada contaminación. De acuerdo con la EPA ([US Environmental Protection Agency](#)), se considera contaminantes al antimonio, arsénico, berilio, cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y zinc. La toxicidad de estos compuestos se debe a la capacidad que tienen de afectar adversamente alguna función biológica.

Los contaminantes pueden movilizarse del suelo por volatilización, disolución, lixiviación y posteriormente pasar a los organismos que pueden asimilarlos, lo que normalmente ocurre cuando se encuentran en forma más o menos soluble. Cuando estos contaminantes se encuentran disponibles para los organismos (Biodisponibilidad) pueden bioacumularse y su efecto suele ser negativo ([Gálan et al., 2008](#)).

En el caso de los RSU, los metales que se encuentran en los SDF están directamente relacionados con los residuos que se depositen en el sitio, ya sea por residuos industriales, orgánicos y metálicos como pilas, recipientes de lata, plásticos y lixiviados.

En contexto con lo anterior, los metales propuestos en la presente investigación se seleccionaron con base a distintos trabajos en los que se mencionan y analizan los metales más representativos de SDF de RSU. Por ejemplo, [Bernache \(2012\)](#) hace un estudio del riesgo por contaminación en un SDF, tomando en cuenta las principales afectaciones que se generan por los lixiviados, los cuales traen consigo metales pesados como Cd, Pb, Cr, Ni, y As. Caso similar es el expuesto por [Méndez \(2002\)](#), donde se menciona el alto contenido de metales que contienen los lixiviados

en los SDF. En [Puerta \(2004\)](#), se menciona que los metales característicos de los RSU son el Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni, Hg, Co.

El análisis de metales permite tener un mayor acercamiento a la situación de los sitios de estudio y su grado de contaminación. Aunado a lo anterior, la dinámica y comportamiento de los metales está en función de indicadores como el pH, la MO, la textura, carbonatos ([Galán et al., 2008](#)). Lo que confiere particularidades a cada sitio, debido a las características propias del suelo del sitio.

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 se establecen las concentraciones por encima de las cuales se considera existe riesgo de que se generen efectos adversos para la salud:

Tabla 4.- Concentración de referencia total (CRT) de metales, por uso del suelo.

Metal	Uso Agrícola/ Residencial/ comercial (mg/Kg)	Uso industrial (mg/Kg)
Arsénico	22	260
Bario	5,400	67,000
Berilio	150	1,900
Cadmio	37	450
Cromo	280	510
Mercurio	23	310
Níquel	1,600	20,000
Plata	390	5,100
Plomo	400	800
Selenio	390	5,100
Talio	5.2	67
Vanadio	78	1,000

Fuente: Adaptado de [NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004](#).

Nota: La CRT es la masa del elemento químico regulado, expresada en mg, por unidad de masa de suelo en estudio, expresada en kg, base seca, por encima de la cual se considera existe riesgo de que se generen efectos adversos para la salud ([NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004](#)).

2.3 Residuos sólidos urbanos

De acuerdo con la normativa mexicana, los RSU se definen como:

“Los generados de la eliminación de materiales que se utilizan en las actividades domésticas, de los productos que se consumen y de sus envases generados de las casas habitación; son también los que provienen de establecimientos o la vía pública, o los que resultan de la limpieza de las vías o lugares públicos y que tienen características como los domiciliarios” (DOF, 2014).

Los RSU se han incrementado constantemente durante las últimas décadas, lo que ha causado impactos ambientales negativos a nivel mundial, ocasionados por su disposición incorrecta, el exceder la capacidad de almacenamiento de los SDF, a los pocos procesos de transformación industrial, la poca supervisión para el cumplimiento de las normas y a los hábitos de consumo de las personas (Puerta, 2004).

El depósito incorrecto de los residuos y el contacto directo (sin ningún tipo de protección) con el ambiente afecta a los cuerpos de agua, el aire, el paisaje y el suelo. Siendo en los SDF y áreas circundantes donde se ven reflejados, en mayor medida, todos los impactos negativos.

Como parte de la descomposición de los RSU se emiten al ambiente dos productos; los lixiviados y el biogás. Los lixiviados, son líquidos originados por los desechos en proceso de descomposición, resultado de la percolación de agua de lluvia y del líquido proveniente de los propios residuos. Este último contiene material disuelto y suspendido que arrastra gran parte de contaminantes, en ocasiones a concentraciones muy elevadas. Los lixiviados al entrar en contacto con el suelo comienzan un proceso de filtración y modificación de las propiedades del sitio, pudiendo alcanzar mantos acuíferos y/o cuerpos de agua que estén cerca de ellos, así como afectar la biota propia del lugar (Aziz *et al.*, 2012; Roble-Martínez, 2008).

El biogás se trata, igualmente, de una consecuencia del contacto de los RSU con la atmósfera y los microorganismos, lo que activa un proceso de descomposición, que depende principalmente de la materia orgánica presente en los RSU, generando malos olores y gases. Estos gases están compuestos, en gran parte, por metano (45% a 50%), dióxido de carbono (50 a 55 %) y otros constituyentes trazas como Ácido Sulfhídrico (H₂S), Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), los cuales son gases de efecto invernadero y contribuyen al cambio climático (Aziz *et al.*, 2012; Roble-Martínez, 2008).

Una gestión integral de los RSU obedece a contar con acciones normativas, operativas, financieras, administrativas, sociales, educativas, de planeación, de monitoreo, de supervisión y de evaluación, para el adecuado manejo de los residuos, desde su generación, pasando por la recolección, traslado, tratamiento, y hasta su disposición final (SEMARNAT, 2013; PEPGIRSU, 2010).

De acuerdo con [SEMARNAT \(2017\)](#), la gestión y manejo de los RSU debe tener las siguientes etapas:

- **Recolección y traslado:** es una de las actividades de mayor importancia, debido a los costos y disponibilidad de infraestructura que le corresponde, así como por su prevención de la dispersión de los residuos en el ambiente. Esta actividad consiste en recolectar los residuos domiciliarios y de pequeños establecimientos mercantiles, así como aquellos recolectados por los servicios de limpieza de los municipios para su traslado a las estaciones de transferencia. El traslado consiste en llevar los residuos del área de recolección hasta los destinos establecidos para algún tratamiento o su disposición final.

En el país, se recolectan un total de 83.93% del total de RSU producidos, teniendo estados con un 100% de cobertura para esta actividad como Quintana Roo, Nayarit, Ciudad de México, Chihuahua, Aguascalientes, Colima. Sin embargo, hay otros estados, como el caso de Chiapas, que se encuentran cercanos a la media nacional con un 76% de recolección.

- **Tratamiento y reciclaje:** en esta actividad se incluye la separación física de los residuos y los tratamientos de tipo biológico, así como los que se usan para generar composta. También, la selección de ciertos tipos de residuos para ser reutilizados por la industria como materia prima para la producción de nuevos artículos. Cabe mencionar que solo se recicla el 9.63% del total de residuos producidos y que solo se cuenta con 98 plantas de composta en todo el país. Es importante resaltar que dicho porcentaje de residuos reciclados podría elevarse en los próximos años, esto debido a la gran cantidad de RSU que son susceptibles de ser ocupados.
- **Disposición final:** esta etapa hace referencia al depósito o confinamiento permanente de los RSU en sitios e instalaciones que eviten las afectaciones a los diferentes sistemas de la biosfera y posibles daños a la población humana. Como se mencionó anteriormente, en México se cuenta con tres modalidades de SDF; los RS, los SC y los TCA.

Las limitaciones para el mejoramiento y vigilancia de este proceso se retoman desde instancias institucionales, con falta de legislación ambiental, escasos recursos económicos y técnicos y la poca o nula vigilancia en la aplicación de las normativas existentes. Teniendo en claro que la parte más significativa e importante para evitar daños a los recursos naturales es mejorando el manejo de los RSU, en especial en las especificaciones y cumplimiento de los SDF.

2.3.1 Sitios de disposición final de RSU en México

Los SDF son el punto más débil en la gestión de los RSU, ya que es el lugar donde se presenta, en mayor proporción, la contaminación ambiental, la cual afecta de

forma directa o indirectamente los recursos hídricos, el aire, la biota y en ocasiones, a los seres humanos (Ver tabla 5) (Bernache, 2012).

Tabla 5.- Emisiones al ambiente y consecuencias a los seres humanos por el mal manejo de RSU.

Emisiones y consecuencias en la gestión de los RSU			
	Transporte	Incineración	Disposición final
Aire	Emisión de polvos, NO _x , SO ₂ , sustancias peligrosas por derrames.	Emisión de polvos, NO _x , SO ₂ .	Emisiones de CH ₄ , CO ₂ y olores.
Agua	Contaminación al manto freático y cuerpos superficiales por derrames	Deposición de sustancias tóxicas en la superficie del agua.	Lixiviados, metales pesados, compuestos orgánicos permanentes.
Suelo	Contaminación por derrames	Depósito de cenizas y chatarra en SDF.	Acumulación de sustancias peligrosas.
Ecosistema laderas y barrancas	Contaminación por derrames.	Contaminación por sustancias tóxicas en la cadena alimenticia.	Contaminación por sustancias tóxicas en la cadena alimenticia.
Paisaje	Trafico.	Intrusión visual, cambio de uso de suelo.	Cambio de uso de suelo.
Áreas urbanas	Exposición a sustancias peligrosas.	Exposición a sustancias peligrosas.	Exposición a sustancias peligrosas.
Consecuencias a la salud del Ser humano			
Consecuencias directas.	Laceraciones por el mal manejo de los RSU mezclados con objetos punzocortantes.	Exposición a gases peligrosos.	Exposición a sustancias peligrosas como lixiviados y polvos irritantes.
Consecuencias indirectas.	Olores desagradables y polvos en las cercanías a los SDF, que derivan en irritación de vías respiratoria, principalmente.		

Fuente: adaptado de Strange (2002).

De acuerdo con [LGPGIR \(2015\)](#), la disposición final de los RSU se debe realizar en sitios e instalaciones cuyas características permitan acoger los residuos de forma permanente, previniendo su liberación al ambiente y, consecuentemente, evitar afectaciones a la salud de la población y a los ecosistemas ([DOF, 2014](#)).

De acuerdo con Norma Oficial Mexicana [NOM-083-SEMARNAT-2003](#), se establecen las especificaciones para la selección, diseño, construcción, operación y monitoreo de un SDF de RSU. Estos requerimientos toman en cuenta afectaciones a obras civiles, distancias mínimas a poblaciones, cuerpos de agua, zonas de inundación, fallas geológicas, taludes inestables e hidrogeología. Cabe mencionar, que para efectos de esta ley la categorización se hace conforme a las toneladas recibidas por día ([Ver tabla 6](#)).

Tabla 6.- Categorización de los SDF de RSU.

Categoría de los sitios de disposición final	
TIPO	TONELADAS RECIBIDAS POR DÍA (Ton/día)
A	Mayor de 100
B	50 hasta 100
C	10 y menor a 50
D	Menor a 10

Fuente: Tabla elaborada con datos tomados de la [NOM-083-SEMARNAT-2003](#).

Los sitios, sin importar su categoría, deben de contar con los siguientes requerimientos:

- No se debe colocar en Áreas Naturales Protegidas
- Alejado más de 500 m de localidades mayores de 2500 habitantes.
- Fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años.

Se debe tener estudios:

- Geológicos: descripción estratigráfica, identificación de fallas y fracturas.
- Hidrológicos: uso de agua subterránea, identificación de acuíferos, análisis del sistema de flujo.
- Topográficos: planimetría y altimetría a detalle del sitio.
- Geotécnicos: elementos de diseño que garantizan la protección del suelo, subsuelo, agua superficial y subterránea.

Todos los SDF deben contar con una barrera geológica natural o equivalente, con un espesor de un metro y un coeficiente de **conductividad hidráulica**, de al menos **1 x 10⁻⁷ cm/s**. Además, se debe garantizar la extracción, captación y control del biogás y lixiviados. También, se deben realizar obras complementarias en todos los sitios; caminos de acceso, camino perimetral, bascula, caseta de vigilancia para el control del acceso de personal y camiones, servicio de sanitario y franja de amortiguamiento de mínimo 10 metros.

Es importante mencionar, que sin importar la categoría en la que sean depositados los residuos, existen procesos de descomposición, que propician la generación y

emisión de lixiviados y biogás. En concordancia con lo anterior, la relevancia de contar con SDF que traten de manera adecuada a los RSU, controlando las emisiones que estos provocan y evitando la contaminación del ambiente (SEMARNAT, 2013).

2.3.1.1 Rellenos sanitarios

Los RS, constituyen la mejor opción para la disposición final de los RSU, esta modalidad incluye infraestructura, métodos, y obras de ingeniería para controlar la fuga de lixiviados y gases (NOM-083-SEMARNAT, 2003).

El depósito de RSU, bajo estos términos, es uno de los más utilizados en América Latina y el Caribe, sin embargo, la gran mayoría no cumple con todas las especificaciones técnicas. Durante los últimos años, los RS han ido mejorado sus condiciones, aunque gran parte de estos no tratan los lixiviados que se generan, ni se utilicen membranas de impermeabilización (Acuario *et al.*, 1997).

En México, 64% de los residuos son depositados en 88 rellenos sanitarios, de los cuales 49% son municipales, 18% regionales y 33% son de la iniciativa privada. En este contexto, gran parte de los RS cumplen con la reglamentación de forma parcial y solamente el 34% del total cuentan con laguna de evaporación. En el resto, los lixiviados escurren sin ningún tipo de protección, lo que puede resultar en la contaminación de aguas, suelo y biota circundante.

2.3.1.2 Sitios controlados

Estos sitios no cumplen con especificaciones de infraestructura y operación de un RS, no obstante, cumple con requerimientos mínimos de compactación y cobertura diaria de los residuos y cuenta de forma parcial con inspección, vigilancia y aplicación de las disposiciones legales y sanitarias (NOM-083-SEMARNAT-2003). De acuerdo con SEMARNAT (2012), del total de residuos que se generan en el país, 78% de disponen en sitios controlados y rellenos sanitarios.

2.3.1.3 Tiraderos a cielo abierto

Este sistema consiste en verter los residuos directamente al suelo de forma diaria sin cubrirlos con tierra. Esta práctica es inadecuada ya que genera graves problemas sanitarios y ambientales, pero es la más utilizada en el país debido a que es la más económica y la de más fácil operación para los municipios. La mayoría de estos sitios son clandestinos y para su establecimiento, generalmente, se ocupan cañadas, caminos, lotes baldíos, los cuales pueden ser de propiedad privada o pública. Por esta irregularidad no se tiene un registro exacto de los sitios (NOM-083-SEMARNAT-2003).

En contexto con lo anterior, hay estados en donde la cantidad de residuos dispuestos en TCA es mayor que en RS y SC. Tal es el caso de Oaxaca, que dispuso 798,000 Ton/año en TCA y solo 12,000 Ton/año en SC. Caso similar para

el estado de Chiapas, que cuenta con 118 sitios para la disposición de residuos, siendo el 95% TCA (INEGI, 2010; Nájera *et al.*, 2010).

2.3.2 Gestión y normativa de los RSU

2.3.2.1 Legislación ambiental en México

El manejo integral de los RSU tiene fundamento en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos; la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA); la LGPGIR y su reglamento; la Ley de Residuos Sólidos (de cada estado y/o municipio); el Programa de Gestión de RSU (de cada estado), así como diversos instrumentos normativos a nivel federal y local.

Con base en la LGPGIR (1998), es facultad de la federación; formular, conducir y evaluar la política nacional en materia de residuos. Así como elaborar el programa nacional para la prevención y gestión de residuos, el programa nacional de remediación de sitios contaminados y coordinar su instrumentación con las entidades federativas para la remediación de sitios contaminados.

Es importante mencionar, que en la normativa se hace hincapié en la necesidad de hacer investigación, en fomentar la aplicación de tecnologías, en formular y evaluar el manejo ambiental. Lo anterior, por medio de indicadores que permitan hacer una evaluación, para obtener resultados que se integren al sistema nacional de información ambiental y de recursos naturales.

2.3.2.2 Normativa ambiental de los RSU en Chiapas

En la cuestión de la normativa ambiental, el estado de Chiapas fundamenta sus actividades a través de la Constitución Política del Estado de Chiapas; la Ley ambiental de Chiapas (LAC); y, en el caso particular de los RSU, el Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y Manejo Especial (PEPGIRSU). Estos instrumentos tienen como objetivo principal mantener el equilibrio ecológico y prevenir la contaminación de los recursos naturales del estado.

En la LAC, con relación a la gestión de los RSU, esta ley tiene por objeto la conservación de la biodiversidad, la protección al medio ambiente estableciendo bases para:

- Prevenir, controlar y mitigar la contaminación del aire, agua y suelo, así como el manejo integral de los residuos del territorio estatal.
- Regular el manejo y disposición final de los RSU y de Manejo Especial, conforme a la legislación vigente de la materia.

2.3.3 Residuos sólidos urbanos en el estado de Chiapas

En materia de generación de residuos, se tiene una gran diferencia entre los municipios, desde la generación, los recursos materiales y humanos, la infraestructura para la gestión de estos. Por ejemplo, existen municipios que generan menos de 2 toneladas al día y otros, como el caso de Tuxtla Gutiérrez, que genera más de 600 toneladas (SEMAHN, 2018). Aunado a lo anterior, y debido a la distribución tan dispersa sobre el territorio chiapaneco de las localidades pequeñas, a la abrupta topografía y a la lejanía de las cabeceras municipales, se dificulta que los servicios básicos, específicamente la recoleta de residuos y disposición final, sean proporcionados de manera eficiente (Araiza *et al.*, 2015).

De acuerdo con cifras del SEMAHN (2017), se estima que se producen un total de 5,188 ton/día de RSU. Los cuales, entran en el sistema de manejo, que para la mayoría de los municipios se basa en el barrido manual, la recolección y la disposición final.

Referente a las estaciones de transferencia del estado, en las cuales se lleva a cabo el transbordo de los residuos de vehículos recolectores a vehículos de carga para el transporte a los SDF, solo se cuenta con una estación en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Aunado a lo anterior, también la única planta de tratamiento del estado se encuentra en este municipio.

En el caso de la disposición final, solo llegan a esta etapa 52.70 % de los residuos. Recordando, que solo el 5% de los SDF cuentan con las especificaciones indicadas en la normativa (Nájera *et al.*, 2010).

2.3.3.1 Contexto de los municipios de estudio

El municipio de Berriozábal, Chiapas, México, se ubica en la región socioeconómica denominada metropolitana. Es el segundo municipio más grande de la región, con una extensión territorial de 353.23 km². Cuenta con 306 localidades, donde sólo la Cabecera Municipal y la localidad de Ciudad Maya son de tipo urbana, ya que viven en estas el 65.1 % de la población total, la cual es de 52 675 habitantes (PEPGRSU, 2010).

En relación con los RSU, se tiene una producción de 37.82 de Ton/día, de las cuales el 78.7 % se recolectan y llegan a la etapa de disposición final. Esta gestión está a cargo del gobierno del municipio, bajo el reglamento de “Bando de policía y buen gobierno”, contando con etapas de barrido, recolección y disposición final, esta última en el TCA de estudio (SEMAHN, 2017).

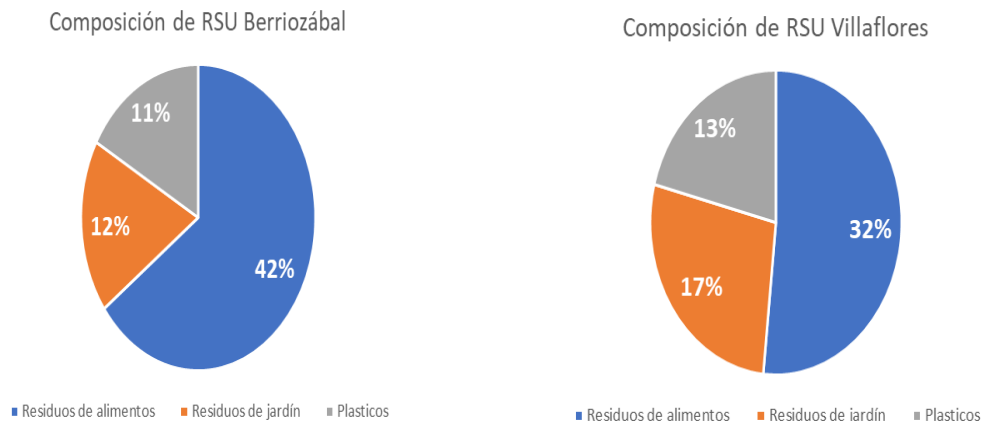
El municipio de Villaflores, Chiapas, México, se ubica en la región socioeconómica denominada Frailesca, en las coordenadas geográficas 16° 14' N y 93° 16' O. Es el tercer municipio más grande de la región, con una extensión territorial de 1,901.82 km². Su población en el año 2010 fue de 98,618 habitantes, distribuidas en 1,058 localidades, donde solo la Cabecera Municipal y 8 localidades más son de tipo

urbanas, habitando en ellas el 68.28% de la población (PEPGRSU, 2010; SHCP, 2011).

En este municipio el “Departamento de Servicios Públicos” (DSP) es quien tiene en sus responsabilidades llevar a cabo las etapas de gestión de RSU, con base en el “Reglamento de limpia y recolección de basura”. Teniendo una generación de RSU de 97.63 Ton/día, de las que se recolectan y se disponen en el SC un total de 67.3 % (PEPGRSU, 2010; SEMAHN, 2017).

En la composición de los RSU, la fracción orgánica se presenta en mayor medida en ambos municipios, es decir, los residuos de alimentos y los residuos de jardín y, en segundo lugar, se presentan los subproductos de plástico (PET, HDPE, LDPE) (Ver figura 2). Es importante mencionar que el 78 % de estos materiales son susceptibles de reutilizar, esto porque las cifras de producción están aumentando, como consecuencia del crecimiento de su población, la edificación de nuevos conjuntos habitacionales, el aumento de establecimientos comerciales y de servicios, lo que vuelve imperante la gestión adecuada y el mayor reciclaje de los residuos (PEPGRSU, 2010).

Figura 2.- Porcentajes en la composición de los RSU generados en los municipios de estudio.



a) Composición de RSU en el TCA. b) Composición de RSU en el SC.
Fuente: Elaborado con datos tomados de PEPGRSU (2010).

2.4 Área de estudio

Los sitios de estudio se encuentran ubicados en los municipios de Berriozábal (Tiradero a Cielo Abierto) y Villaflores (Sitio Controlado), ambos en estado de Chiapas, México. Estos municipios tienen una relativa cercanía entre ellos (Ver figura 5), sin embargo, presentan características sociales, económicas, políticas y ambientales muy diversas, lo que resulta en una gran complejidad en el momento de abordar los problemas sociales y ambientales, debido a que las soluciones deben ser más específicas. Además, cada municipio cuenta con SDF con características

diferentes en cuanto a Infraestructura, funcionamiento y condiciones físico-geográficas.

El TCA se encuentra ubicado en las coordenadas 16°46'27.21" N, 93°15'05.52" W, clasificado como de tipo C (de 10 a 50 Ton/día), donde, específicamente, se depositan 37.82 Ton/día de RSU con un área de 2.2 hectáreas de superficie (SEMAHN, 2017; PEPGRSU, 2010).

El SC donde se realiza la disposición final de los RSU del municipio de Villaflores se encuentra clasificado como tipo C, con una extensión de 11.2 ha y recibe diariamente 97.63 Toneladas. Está ubicado en las siguientes coordenadas 16°13'45.7" N, 93°18'32.3" W (Ver figura 5). Recientemente Araiza *et al.*, (2017) reporta que el SDF tiene aproximadamente 9 años en operación y se pretende siga operando por 10 años más.

La descripción de las condiciones físico-geográficas de los sitios, así como la del funcionamiento de los SDF, se realizará dentro del apartado 4: Resultados y Discusión.

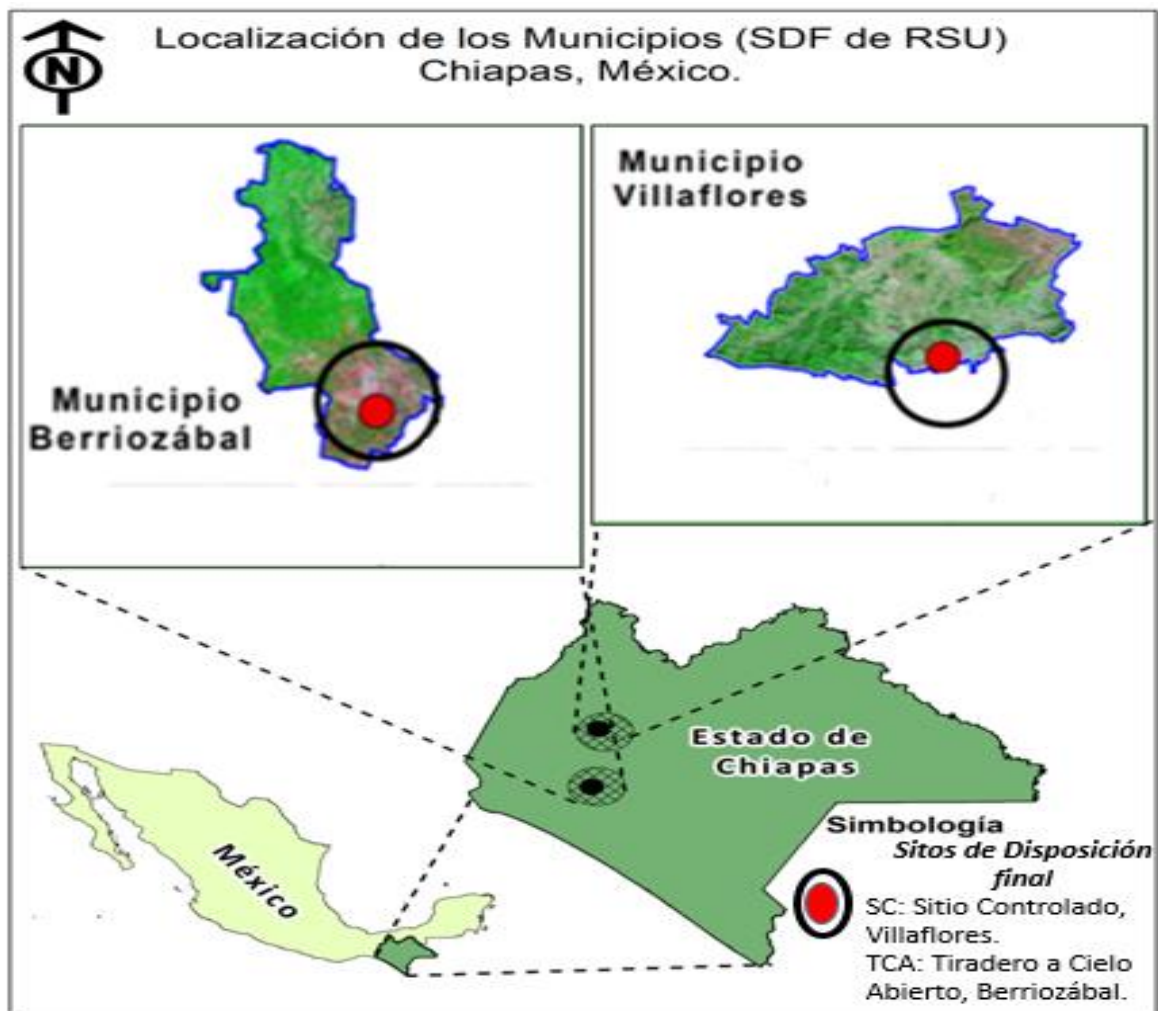


Figura 3.- Ubicación de los SDF: SC de Villaflores y TCA de Berriozábal, Chiapas,

III. MÉTODO

En el presente capítulo se describe el método de trabajo que se siguió para la realización de esta investigación, así como las especificaciones técnicas utilizadas para evaluar cada indicador. El trabajo se dividió en 4 etapas, las cuales se ilustran en el esquema (Ver figura 3) y se describen en párrafos siguientes.



Figura 4.- Etapas de trabajo para la elaboración del presente trabajo.

Planeación

Dentro de la planeación se delimitó el área de estudio, se eligieron los SDF (de acuerdo con los objetivos del trabajo), se buscó información cartográfica y bibliográfica sobre los sitios de estudio. Se escogieron los indicadores y los análisis que se realizarían para la Evaluación de la Calidad del Suelo (ECS), con base en estudios previos de diferentes autores.

La elección de los sitios de estudio se realizó con base a dos objetivos:

- 1.- El primero, analizar el funcionamiento y características de un SC (Sitio Controlado) y un TCA (Tiradero a Cielo Abierto), observando el impacto al paisaje circundante y al sistema edáfico de estas modalidades de SDF de RSU.
- 2.- El segundo, evaluar las propiedades del suelo en dos condiciones físico-geográficas diferentes y en puntos con y sin RSU.

3.1 Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió, inicialmente, en un recorrido a los dos SDF de RSU del área de estudio. Posteriormente, se realizó una descripción del relieve (pendiente del sitio), propiedades del suelo; profundidad, estabilidad de agregados, porosidad, textura al tacto, infiltración y pH (por medio de tiras y potenciómetro portátil). También, se analizó el funcionamiento de los SDF de RSU seleccionados; dinámica de entrada y salida (personas y camiones), sistema de control de los residuos, la infraestructura que se tiene y la seguridad para el control de gases, lixiviados y de los propios residuos. Aunado a lo anterior, se realizaron calicatas para la descripción de perfiles de suelo y se tomaron muestras.

3.1.1 Muestreo

Para analizar las propiedades del suelo en cada SDF se eligieron dos puntos de muestreo; el primero, pendiente abajo del sitio, donde se pudo visualizar el contacto de los residuos y lixiviados con el suelo. El segundo, un punto donde la presencia de RSU era nula y el ecosistema se apreciaba sin perturbación, este punto es para las muestras control.

En cada uno de estos puntos se hizo una calicata (un hoyo) para describir el perfil, además, se recolectó alrededor de 1 Kg de muestra compuesta de suelo superficial y de cada horizonte, las cuales fueron almacenadas en bolsas, etiquetadas y selladas para evitar su contaminación.

Para el análisis de metales, en cada sitio (SC y TCA) se realizó una toma de muestras compuesta para el punto con y sin presencia de residuos. Esta muestra consistió en combinar suelo de cinco diferentes puntos continuos (Ver figura 4), juntando un total de 1 Kg de suelo por cada punto.

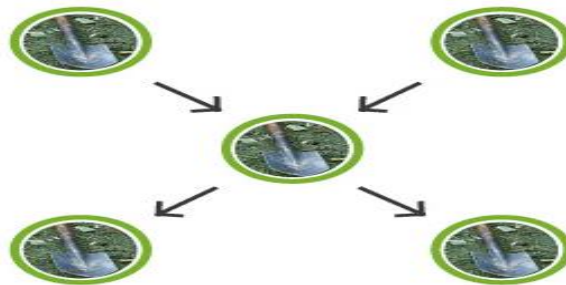


Figura 5.- Muestra compuesta de suelo en forma de "X".

3.2 Análisis de variables en campo y laboratorio

El análisis de los indicadores para la ECS se realizó en campo y/o en el laboratorio, dependiendo de las especificaciones del método que se utilizó para su determinación (Ver tabla 7).

Tabla 7.- Métodos utilizados para los análisis físicos y químicos.

<i>Indicadores de la Calidad del suelo</i>	<i>Análisis en Campo</i>	<i>Análisis en Laboratorio</i>
Indicadores físicos		
Estabilidad de Agregados	SEKERA, en Schlichting y Blume, 1966, citado en (Siebe <i>et al.</i> , 1996).	No Aplica.
Porosidad	Manual de descripción de suelos en campo (Siebe <i>et al.</i> , 1996).	Relación mediante densidad aparente y real.
Densidad aparente	No Aplica.	Método del Cilindro.
Infiltración	Método de permeámetro de doble anillo.	No Aplica.
Indicadores Químicos		
Conductividad Eléctrica	No Aplica.	Conductímetro (Suelo) 1: 2.5 (Agua).
pH	Tiras y Potenciómetro de campo.	Potenciómetro (Suelo) 1: 2.5 (Agua).
Metales	No Aplica.	Método de la EPA 3051A Ácido Nítrico – Ácido Clorhídrico.
C y N totales	No Aplica.	Método de combustión con un detector de conductividad térmica.
Fosforo intercambiable	No Aplica.	Método de Bray-Kurtz, con ácido ascórbico como reductor.

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta una descripción del método utilizado para el análisis de los indicadores físicos y químicos utilizados, así como de la profundidad del suelo, la textura la densidad real, las cuales son propiedades del suelo necesarias para la determinación de otros indicadores. Cabe señalar que en cada uno de los análisis de laboratorio se tomaron controles de calidad: muestras por duplicado, muestras

patrón y muestras de referencia, esto para una mayor confiabilidad de los resultados.

3.2.1 Indicadores físicos

3.2.1.1 Profundidad del suelo

La descripción del perfil del suelo se hizo con base en el manual de descripción para la evaluación ecológica de suelos en campo (Siebe *et al.*, 1996).

Para conocer el número y espesor de cada uno de los horizontes del suelo se excavó una calicata hasta el material parental, en la parte superficial se colocó una cinta métrica para indicar el punto cero de la medición. Se tomaron medidas de la profundidad de desarrollo del suelo y del espesor de cada uno de los horizontes.

3.2.1.2 Estabilidad de agregados

La estabilidad de agregados se llevó a cabo en campo, mediante el método de SEKERA, en Schlichting y Blume, 1966, citado en (Siebe *et al.*, 1996).

Se depositaron 10 agregados de diámetros entre 3 y 10 mm en una cápsula de porcelana y se le agregó agua, la capsula se colocó en la palma mano y se hicieron giros suaves durante 30 segundos. La medición se determinó mediante la descomposición de los agregados y la turbidez del agua (Ver tabla 8).

Tabla 8.- Evaluación de la estabilidad de agregados.

Grado de descomposición	Evaluación
<i>No hay descomposición o solo fragmentos grandes.</i>	<i>Muy alta</i>
<i>Dominan los fragmentos grandes sobre los pequeños.</i>	<i>Alta</i>
<i>Igual número de fragmentos grandes y pequeños.</i>	<i>Mediana</i>
<i>Dominan los fragmentos pequeños sobre los grandes.</i>	<i>Moderada</i>
<i>Solo fragmentos pequeños y turbidez notable en el agua.</i>	<i>Baja</i>
<i>Descomposición total y alta turbidez del agua.</i>	<i>Muy baja</i>

Fuente: modificada de SEKERA, en Schlichting y Blume, 1996.

3.2.1.3 Porosidad

Para la porosidad se realizaron dos determinaciones. La primera en campo, en la cual se tomó en cuenta la cantidad de poros, grietas y canales. Con ayuda de una lupa se observó directamente cada uno de los horizontes del suelo y se determinó

el tamaño dominante, distribución y forma (Ver tabla 9). Después, se clasificó de acuerdo con Siebe *et al.*, (1996).

Tabla 9.- Clasificación de la porosidad en campo.

Abundancia	Tamaño	Forma
Pocos 1 a 50 por dm ²	Micro (< 0.075mm)	Vesiculares
Comunes 51 a 200 por dm ²	Muy finos (0.075-1mm)	Intersticiales
Muchos Más de 200 por dm ²	Finos (1-2 mm)	Tubulares
	Medianos (2-5 mm)	
	Gruesos (>5 mm)	

Fuente: Modificada de Siebe *et al.*, (1996).

La segunda, por medio de una medición cuantitativa utilizando la ecuación para determinar el volumen de poros:

Ecuación (3.1). Volumen de Poros = $1 - (\text{Densidad aparente} / \text{Densidad real})$.

Los valores que se reportan en este documento son los obtenidos mediante la ecuación de volumen de poros, esto por ser un método más exacto.

3.2.1.4 Infiltración

La velocidad de infiltración se midió usando el método del doble anillo (ASTM D 3385-88). Esta es una prueba de campo donde se utiliza 2 anillos concéntricos, a ambos se les agrega agua, para luego medir como varía la altura de ésta en el cilindro más pequeño respecto al tiempo. El procedimiento anterior se repitió en 3 puntos adyacentes dentro de los puntos con y sin RSU, en cada medición se agregó agua hasta alcanzar un valor constante (Ver anexo 7.1), es decir, la velocidad de infiltración básica.

3.2.1.5 Densidad aparente

Para la toma de muestra se utilizó un cilindro de acero inoxidable con volumen conocido (100 cm³), con el cual se sustrajo el suelo de cada horizonte, se colocó en una bolsa de plástico y se selló herméticamente, para posteriormente hacer las mediciones en el laboratorio.

En el laboratorio, las muestras se secaron mediante una estufa a 105°C durante 48 horas, esto para terminar de quitar la mayor humedad posible. Después, se cuantificó la masa sólida del suelo en una balanza con una precisión de 0.1g. El cálculo de la densidad se realizó relacionando la masa del suelo con el volumen del cilindro.

3.2.1.6 Textura

La determinación de Textura del suelo se realizó por medio del método de Bouyoucos modificado.

Se determinó la distribución de tamaños de partículas que componen la fracción mineral del suelo menor a 2mm de diámetro; arcillas(<0.002mm), limos (0.002 a 0.05mm) y arenas (0.005 a 2.0 mm).

Las muestras de suelo se metieron en frasco de vidrio de un litro, posteriormente se sometieron a un pretratamiento para eliminar sustancias cementantes (carbonatos, materia orgánica, óxidos, y sales solubles) y exponer las fracciones minerales. La determinación del porcentaje de fracciones se llevó a cabo por medio del método de sedimentación, basado en la ley de Stokes.

Determinación de la Textura

El suelo de los frascos, sin sustancias cementante, se traspasó a una probeta de 1 L, se aseguró de lavar y pasar todo el contenido del frasco a la probeta con agua desionizada y después aforar a un 1L. Se midió la temperatura de la suspensión y se procedió a agitar durante un minuto (manualmente por medio de una varilla con un pequeño disco en la parte inferior lo que permite remover toda la fracción mineral que queda debajo de la probeta), al parar de agitar, se dejó reposar 20 s y se introdujo el hidrómetro, se dejó que se estabilizara 40 s, y se tomó la primera medición. Se dejó reposar la suspensión durante 2 horas exactamente y se volvió a introducir el hidrómetro y se tomó la segunda medición y la temperatura.

3.2.2 Indicadores químicos

3.2.2.1 Conductividad eléctrica

Para este indicador se pesaron 10g de suelo de cada muestra y se depositaron en frascos de Nalgene de 50mL. Posteriormente se adicionaron 25 mL de agua destilada y se agitaron durante 30 minutos. Después, se dejaron reposar para que el suelo se precipitara y poder medir la conductividad eléctrica en el sobrenadante. Se hicieron mediciones de calibración cada 5 muestras para verificar que los datos que arrojará el conductímetro fueran correctos. También, se utilizaron 2 blancos, es decir, agua destilada para verificar, de nueva cuenta, la calidad en la medición.

3.2.2.2 Potencial de Hidrógeno

Se pesaron 10g de suelo de cada muestra y se depositaron en frascos de Nalgene de 50mL. Se adicionaron 25 mL de agua destilada y se agitaron durante 30 minutos. Después, se dejaron reposar para que el suelo se precipitara y poder medir el pH en el sobrenadante. Cada 5 muestras se verificó que el potenciómetro estuviera calibrado correctamente, lo cual consistió en introducir el potenciómetro a las soluciones estándar con pH establecido.

3.2.2.3 Materia orgánica (Carbono y Nitrógeno)

Para obtener los contenidos de C y N totales cada muestra de suelo se analizó por duplicado, estas se introdujeron en un analizador elemental CHNS/O Perkin Elmer modelo 2400 series II, utilizando un método de combustión con un detector de conductividad térmica, con material de referencia: LECO soil calibration simple for CNS part 502-309. Este estudio se realizó en el laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología de la UNAM.

3.2.2.4 Fósforo intercambiable

Para la determinación de fósforo intercambiable se utilizó el método de Bray-Kurtz, usando ácido ascórbico como reductor. Cada muestra se analizó por duplicado e introduciendo blanco y muestra patrón (Control interno: Muestra Xico con contenido de P disponible (Bray): 17.5 mg /kg) como controles de calidad.

3.2.3 Metales

La concentración de metales se realizó con base en el método de la EPA 3051A: Digestión con Ácido Nítrico – Ácido Clorhídrico, con el cual se prepararon las muestras. Posteriormente, se analizaron por medio de un ICP-OES. Para la determinación de los 30 elementos, esta etapa se hizo en el Instituto de Geología de la UNAM, contando con muestra patrón, 2 blancos y cada muestra se analizó por duplicado.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la calidad del suelo que se presentan a continuación se hace dividido en tres componentes (Ver figura 6):

- **Descripción de los Sitios de Estudio:** Identificando los procesos del depósito de los RSU, considerando la ubicación geográfica, posición en el relieve, el funcionamiento de los SDF de RSU y la influencia que ejerce este sobre el paisaje circundante.
- **Resultados de los Indicadores de Calidad del Suelo:** Análisis de los valores obtenidos respecto a los indicadores físicos, químicos y metales. En la [Tabla 15 y 16](#) se encuentran los valores para cada uno de los indicadores medidos y en los párrafos siguientes una descripción de cada variable por SDF de RSU.
- **Análisis de la Calidad del Suelo:** Relación de los cambios en las propiedades del suelo entre los puntos con y sin presencia de RSU, en cada sitio de estudio.

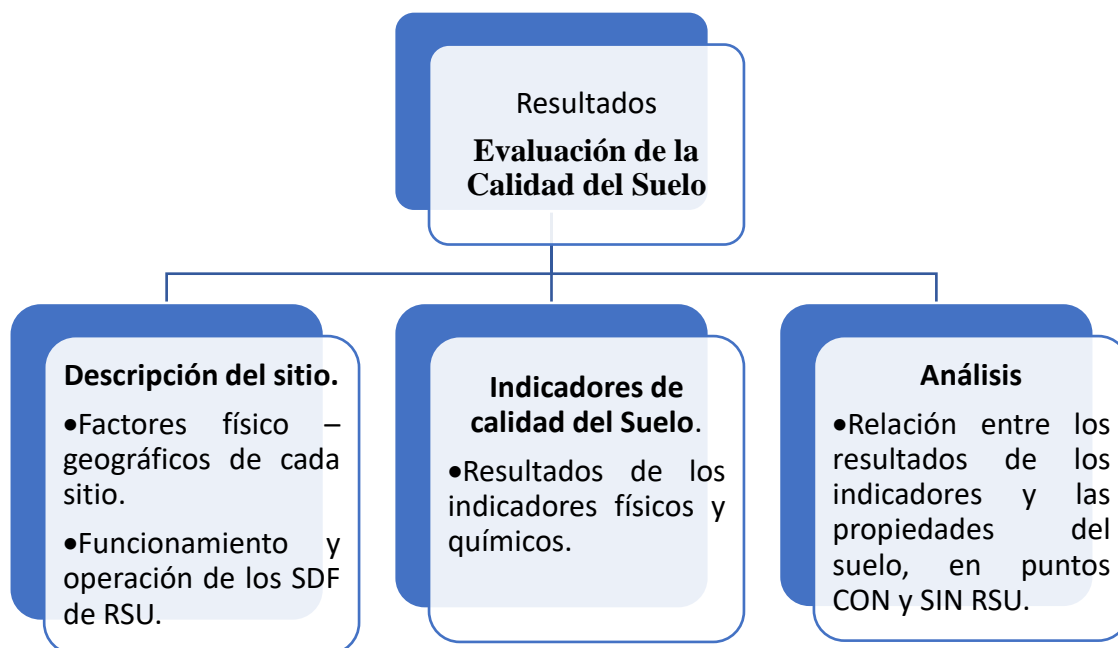


Figura 6.- Proceso de trabajo de Resultados y Discusión.

4.1 Descripción del sitio de estudio

4.1.1 Sitio controlado, Villaflores

El SC de Villaflores se encuentra a 620 m de altitud, predomina el clima cálido subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual promedio es de 24.3°C y tiene una precipitación pluvial al año de 1,209mm (INAFED, 2010).

El SDF está localizado sobre la provincia geológica del Batolito de Chiapas, con suelos de tipo Luvisol y con roca ígnea subyacente de tipo metagranito. La estratigrafía se caracteriza por estar formada de dos unidades principales: basamento granítico y sedimentos areno-arcillosos; este último particularmente sobre los pequeños valles formados por la topografía accidentada (CEIEG, 2011).

El SDF se encuentra cercado por malla ciclónica con una entrada principal delimitada por una pluma de seguridad; está localizado en medio de barrancas y pendientes muy pronunciadas. Cabe mencionar que en los terrenos contiguos hay presencia de cultivos, los cuales solo están separados del sitio por la malla ciclónica. El ingreso al SDF se hace por medio de una petición a las autoridades pertinentes, ya que se encuentra personal registrando la entrada (2 personas). También, se encargan de indicar a los camiones recolectores la celda correspondiente para el depósito de los residuos. Este vaciado y acomodo se hace con ayuda de una excavadora, con la que también se realiza la excavación y carga de material de cobertura (suelo) de los RSU.

Cabe mencionar que durante el trabajo de Campo se observó que el acceso no solo es para los camiones oficiales, sino también para gente con camiones pequeños que traen sus residuos particulares a tirar (residuos de todo tipo; animales vivos y muertos, residuos orgánicos, hospitalarios, industriales) y para grupos de personas que se dedican a pepenar. Es importante decir que estas personas ingresan al sitio sin ningún tipo de autorización, depositando estos residuos en cualquier parte, sin ninguna medida de prevención y cuidado al ambiente.

Como se mencionó anteriormente, se eligieron dos puntos de muestreo, en el caso de este sitio; **el primer punto** se encontraba pendiente abajo del sitio (610 m s. n. m.), donde se pudo visualizar el contacto de los residuos y lixiviados con el suelo, este punto se definió como **SC₁**. **El segundo**, un punto donde la presencia de RSU era nula y el ecosistema se apreciaba sin alteración antropogénica, a este punto se le denominó **SC₂** y se localizaba a 623 m s. n. m. (Ver figura 7).

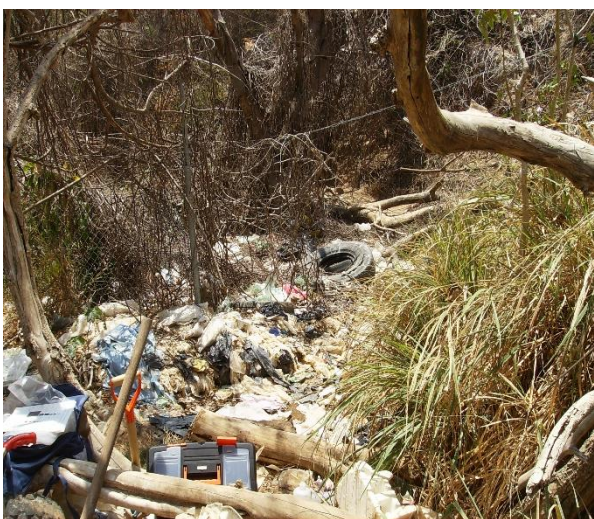
En la evaluación de campo se midieron varias propiedades del suelo, las cuales tienen que ser descritas en el terreno, ello para conservar de mejor manera las propiedades del suelo y no provocar una alteración en los resultados (Ver tabla 10 y 11). Además, los valores de estas propiedades ayudan a interpretar de mejor manera los procesos del suelo.

Tabla 10.- Descripción de campo de SC₁, Villaflores.

SC₁ (CON RSU) Villaflores							
Prof (cm)	Textura	Pedregosidad (Vol.%)	Color	pH (tiras)	CaCO ₃	Humedad	Estabilidad de Agregados
0 - 30	AC	10 - 25	7.5YR 5/6 Café brillante	5.5	0	Seca	Muy baja

Tabla 11.- Descripción de campo de SC₂, Villaflores.

SC₂ (sin RSU) Villaflores							
Prof (cm)	Textura	Pedregosidad (Vol.%)	Color	pH (tiras)	CaCO ₃	Humedad	Estabilidad de Agregados
0 - 30	CA	10 - 25	10YR 2/2 Negro parduzco	5.5	K1 0 - 0.05 %	Seca	Baja
31 - 50	AC	10 - 25	10 YR 4/3 Café amarilloso	6	K1 0 - 0.05 %	Seca	Muy baja



a) Punto de muestreo SC₁

b) Punto de muestreo SC₂

Figura 7.- Puntos de muestreo en el Sitio Controlado del municipio de Villaflores.

Los puntos SC₁ y SC₂, se encuentran separados alrededor de 500m, con una diferencia de altitud de 10 m s. n. m. El SC₂ se encuentra separado del SDF por una

carretera, lo que evita que los residuos hagan contacto con esta zona y permita tener el análisis de comparación deseado (Ver figura 8).

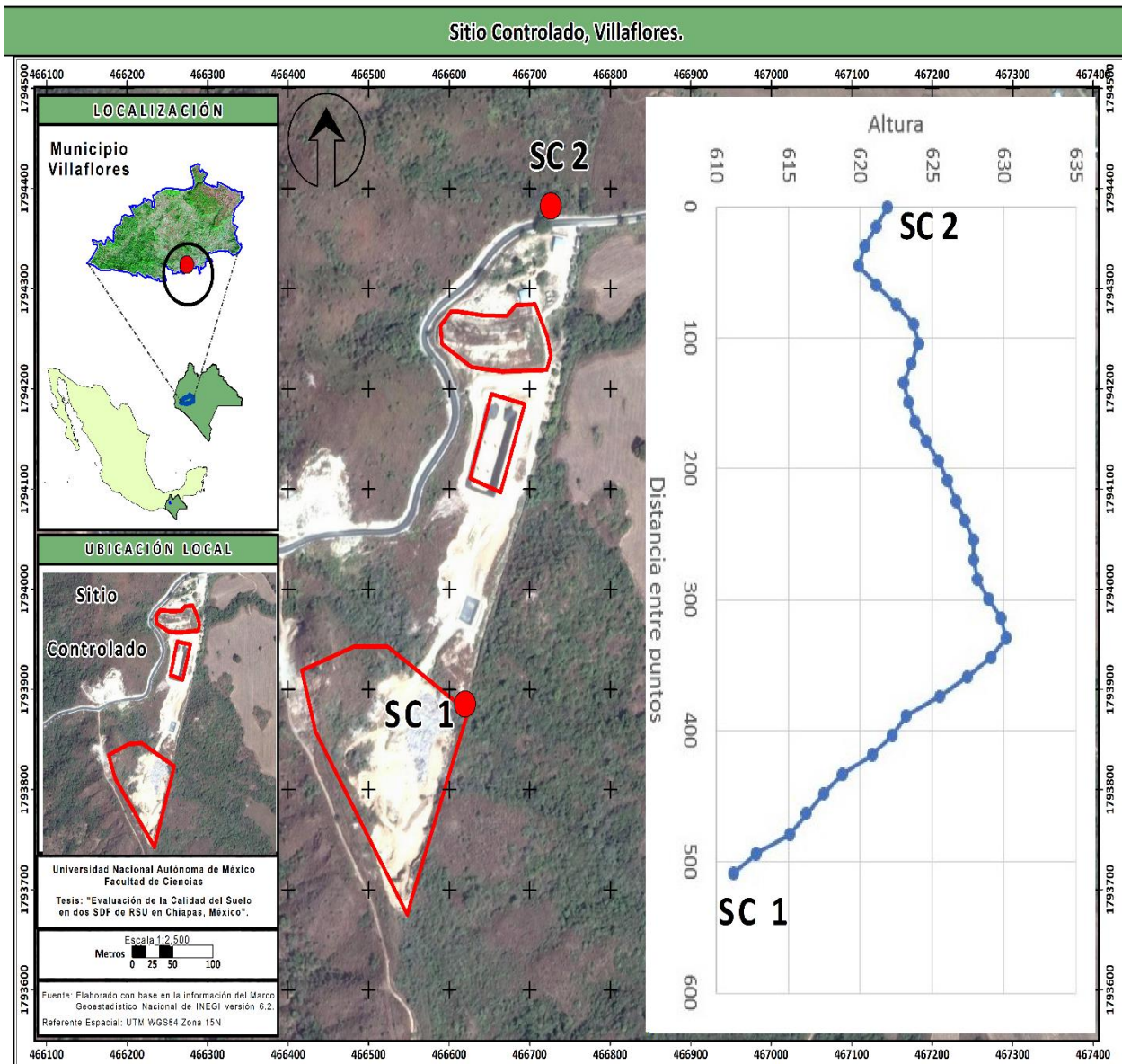


Figura 8.- Perfil altitudinal entre el punto SC₁ y SC₂ del Sitio Controlado, municipio de Villaflores.

El sitio presenta varias celdas de depósito de diferentes tamaños. Sin embargo, gran parte de las celdas se encontraban clausuradas, con afectaciones a la infraestructura; rotura de la geomembrana de protección, mal tratamiento de las lagunas de evaporación, residuos en los canales de desagüe y en las cañadas del sitio, También se puede apreciar como los lixiviados salen de las celdas, desplazándose pendiente abajo, formando ríos de este líquido (Ver figura 9).



a) Barrancas con RSU.



b) Canales de desagüe con RSU.

Figura 9.- Afectación de RSU en el SC.

Los canales de lixiviados se originan, principalmente, de las celdas de depósito saturadas, que al entrar en contacto con el agua de lluvia generan una gran cantidad de líquido que se desborda y se dispersa por los alrededores del sitio.

La situación es preocupante, ya que el SC está localizado sobre un uso de suelo destinado para agricultura y vegetación, predominantemente, de selva baja caducifolia, sin embargo, este sitio no cuenta con algún permiso de cambio de uso de suelo o análisis de riesgo para prevenir posibles afectaciones a las poblaciones circundantes, al manto freático y/o a los cultivos que se encuentran alrededor de este SDF.

Aunado a lo anterior, el SC ha tenido un crecimiento notorio en los últimos años, lo que se refleja al comparar imágenes de Google Earth de diferentes años ([Ver figura 10](#)). Por ejemplo, en el año 2007 se observa una vegetación más abundante y con tonos más fuerte ([Ver figura 10a](#)) con respecto a la imagen del año 2015 ([Ver figura 10b](#)), además, en esta última imagen se observa la aparición de una celda de depósito de RSU, la cual es la más grande que tiene el sitio en la actualidad. Lo cual resulta congruente con la información reportada por el municipio, quien afirma un crecimiento poblacional, lo que genera una mayor demanda de bienes e influyen en el incremento de la generación de RSU.



a) Imagen del SC del año 2007.



b) Imagen del SC del año 2015.

Figura 10.- Comparación de Imágenes de Google Earth de diferentes años del Sitio Controlado.

4.1.2 Tiradero a cielo abierto, Berriozábal

El TCA se encuentra ubicado sobre la provincia geológica del Cinturón Chiapaneco de Pliegues y Fallas, sobre litología de tipo roca sedimentaria, con una formación mayoritaria caliza-lutita. Encima de esta litología se encuentra una capa edáfica bastante somera de tipo Vertisol, de textura fina, que se caracteriza por tener altos contenidos de arcilla y roca continua en los primeros 25 a 50 cm de la superficie del suelo (CEIEG,2011). Es importante mencionar, que debido al manejo que se le da a los RSU en el SDF, el suelo se ha mezclado con distintos materiales, lo que ha ido modificando su estructura.

El SDF presenta nulas medidas de seguridad, ya que el ingreso se hace de manera informal y sin ningún tipo de restricción. La prevención de la contaminación es nula, esto porque los RSU son depositados directamente en el suelo y el sitio solo es acordonado con palos y alambre de púas para la división con los otros predios. Después del depósito de los residuos se hace una remoción de suelo para ir cubriéndolos, sin embargo, el sitio se ve superado en su capacidad y muchos de los RSU se encuentran al aire libre.

Los dos puntos de muestreo para el TCA se determinaron con base al contacto de los RSU con el suelo, es decir: **El primer punto**, tiene contacto con los residuos y lixiviados, se denominó **TCA₁**. Para el **segundo punto**, el suelo se encontraba sin perturbación por los residuos, el cual se nombró **TCA₂** (Ver figura 11).



a) Punto de muestreo TCA₁



b) Punto de muestreo TCA₂

Figura 11.- Puntos de muestreo en el Tiradero a Cielo Abierto del municipio de Berriozábal.

Como se mencionó en los resultados del sitio anterior, hay propiedades del suelo que se tiene que evaluar forzosamente en campo, para el TCA se encontraron los siguientes valores (Ver tabla 12 y 13). Estos permiten evaluar las condiciones del sitio sin alteración del suelo por manipulación en el muestreo, además, hay variables como el color, la cantidad de raíces y el porcentaje de CaCO₃, que indican una situación particular del suelo.

Tabla 12.- Descripción de campo de TCA₁, Berriozábal.

TCA₁ (con RSU) Berriozábal							
Prof (cm)	Textura	Pedregosidad (Vol.%)	Color	pH (tiras)	CaCO₃	Humedad	Estabilidad de Agregados
0 – 30	RA	10 – 25	5Y2 5/1 Café grisáceo	6	K3 2 – 10 %	Seca	Muy baja
30 – 60	CR	< 2	10 YR 3/2 Negro parduzco	6	K3 2– 10 %	Seca	Muy baja

Tabla 13.- Descripción de campo de TCA₂, Berriozábal.

TCA₂ (sin RSU) Berriozábal							
Prof (cm)	Textura	Pedregosidad (Vol.%)	Color	pH (tiras)	CaCO₃	Humedad	Estabilidad de Agregados
0 – 10	CA	7	5Y2 5/1 Café grisáceo	5.5	K3 2– 10 %	Seca	Alta
10 – 25	L	20	2.5 Y2 5/1 Café amarilloso	6	K4 10– 25 %	Seca	Muy alta

Tiradero a Cielo Abierto, Municipio de Berriozábal.

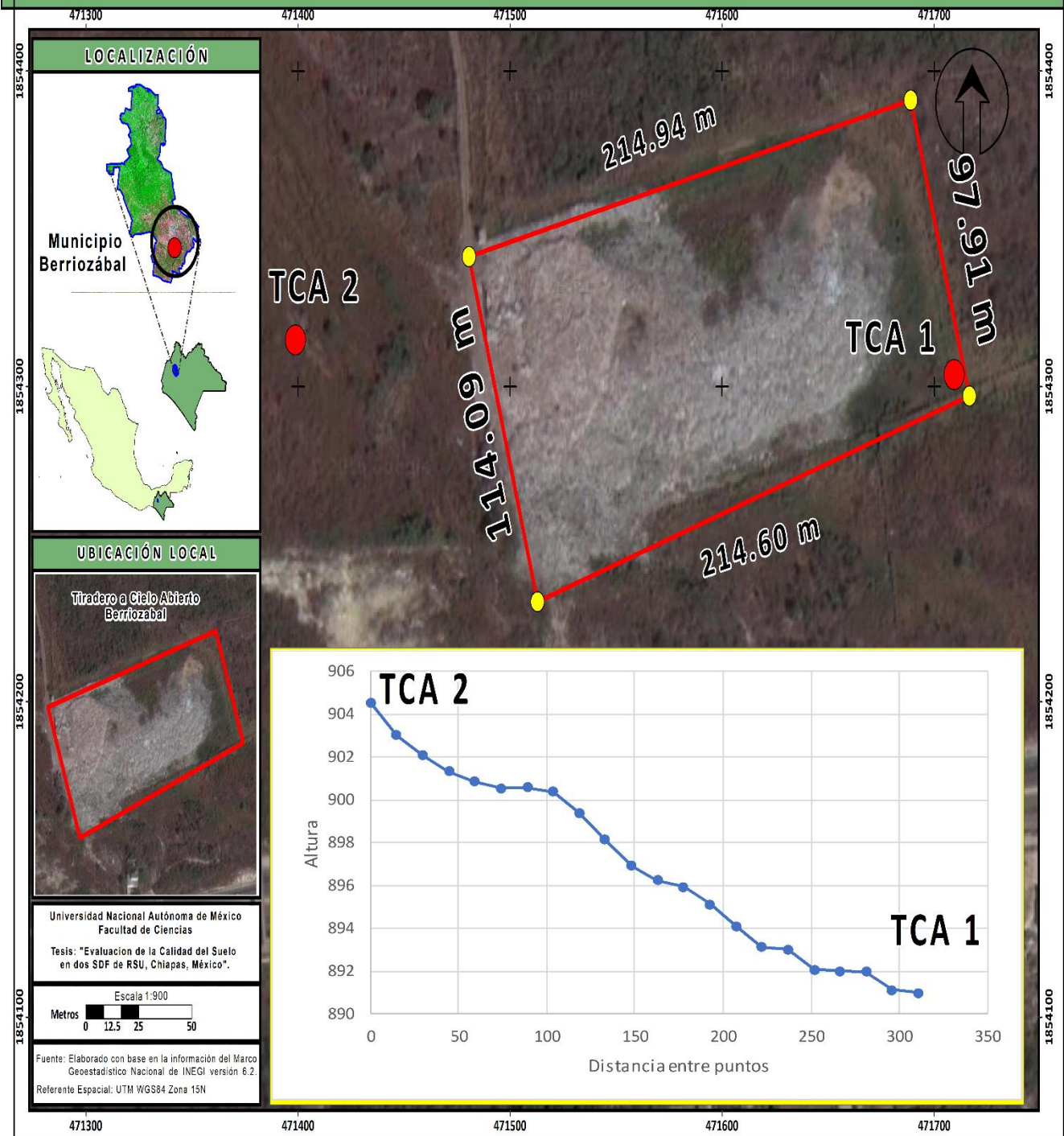
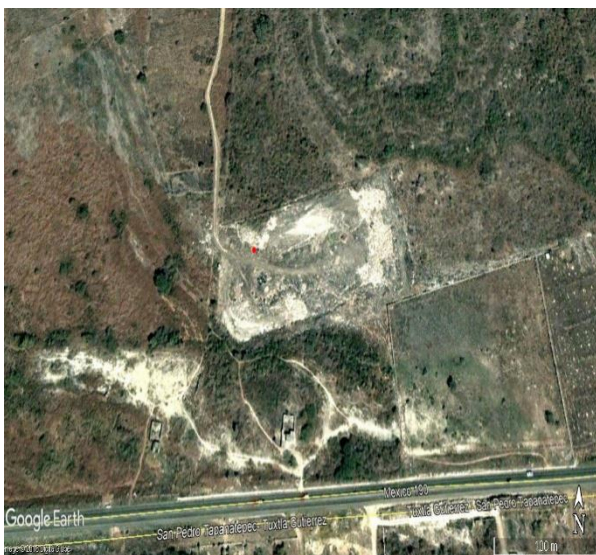


Figura 12.- Perfil altitudinal entre el punto TCA₁ y TCA₂ en el Tiradero a Cielo Abierto, Berriozábal.

Entre los dos puntos de muestro existe una diferencia de altitud de 14 m s. n. m., esta condición permite que los residuos y lixiviados desemboquen pendiente abajo y hagan contacto con TCA₁, y lo que es favorable para que el punto TCA₂ esté sin contacto con los RSU (Ver figura 12).

De acuerdo con Araiza *et al.*, (2017), este sitio cuenta con 2.2 ha desde su apertura, sin embargo, no toda el área estaba siendo utilizada. Lo que se puede apreciar en imágenes de Google Earth del año de apertura (2007) y del año 2013, donde se observa que la vegetación (Selva baja caducifolia) de los alrededores y las áreas de cultivo siguen prácticamente sin modificaciones aparentes (Ver figura 13). Es importante mencionar, que el área donde se encuentra este sitio está catalogada como de uso agrícola, lo que vuelve más grave la situación ya que no hay estudios para realizar el cambio de uso de suelo para llevar a cabo la practica el depósito de RSU.

En la imagen del 2007, se observa que en el área de depósito aún hay puntos sin presencia de RSU y todavía se alcanza a percibir manchones de suelo con vegetación dentro del sitio. Mientras que en la imagen del 2013 se encuentra el área totalmente cubierta por los residuos, marcando muy específicamente el polígono de depósito, con vegetación nula dentro de este.



a) Imagen del TCA del año 2007.



b) Imagen del TCA del año 2013.

Figura 13.- Comparación de Imágenes de Google Earth de diferentes años del Tiradero a Cielo Abierto.

En los dos SDF se puede corroborar las premisas antes citadas, es decir, que el número de habitantes se ha acrecentado en ambos municipios, lo que se ha reflejado en el incremento de la generación de RSU y consecuentemente en el aumento de tamaño de los sitios de depósito (Ver tabla 14). Es importante

mencionar que el análisis de imágenes solo es una ayuda para entender y explicar de mejor manera la situación.

Tabla 14.- Relación entre el crecimiento poblacional y la generación de RSU.

Municipio	Número de habitantes		Toneladas de RSU / día	
	2010	2015	2010	2017
Villaflores	98, 618	104, 833	83.97	97.63
Berriozábal	43, 179	51, 722	27.52	37.82

Fuente: elaboración propia con datos de [PEPGIR \(2010\)](#) y [SEMAHN \(2017\)](#).

4.2 Resultados de los indicadores de la evaluación de calidad del suelo

4.2.1 Sitio controlado

Los resultados de la evaluación de la calidad de suelo para el SC se presentan por separado para cada punto (**SC₁** y **SC₂**) y cada horizonte (**h₁** y **h₂**), haciendo referencia al primer y segundo horizonte evaluados, respectivamente. Cabe mencionar que en el punto SC₁ solo existe un horizonte, por lo que solo aparece **SC₁h₁** (Ver tabla 15).

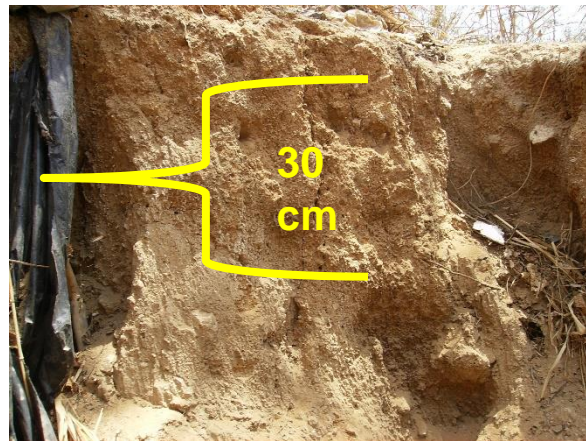
Tabla 15.- Resultados de los análisis en campo y laboratorio del sitio de estudio.

SC Villaflores			
Indicador de Calidad del Suelo / SDF	SC₁ (con RSU)	SC₂ (sin RSU)	
	Horizonte 1 (SC₁h₁)	Horizonte 1 (SC₂h₁)	Horizonte 2 (SC₂h₂)
Profundidad (cm)	0-30	0-30	31-50
Estabilidad de agregados	Muy baja	Baja	Baja
Volumen de Poros (%)	54 %	65 %	59 %
Infiltración (mm/h)	10.7	15.2	
Densidad aparente (g/cm³)	1.4	1.0	1.09
Densidad real (g/cm³)	3.07	2.93	2.67
Textura	Franco arcilloso arenoso	Arcilloso arenoso	Franco arcilloso arenoso
Conductividad eléctrica (μS)	167.0	141.0	68.5
pH	5.80	6.15	6.00
% de Carbono	0.24	2.71	0.92
% de Nitrógeno	0.05	0.21	0.09
Relación C/N	4.8	10.33	10.22
P Intercambiable (mg / Kg)	2.4	1.2	1.3

En el caso del punto SC₁, se tiene una gran presencia de RSU, los cuales se situaron por encima y alrededor del perfil realizado. La vegetación, hierbas y pasto, se encuentra seca, aplastada y afectada por los residuos (Ver figura 14a). El único horizonte presente contaba con 30 cm de profundidad y una textura Franco Arcilloso Arenoso (CRA). La textura, dureza y color se analizó a lo largo del horizonte, concluyendo que las características tenían un alto grado de homogeneidad y que efectivamente solo se trataba de un horizonte (Ver figura 14b).



a) Condiciones en el punto SC₁.



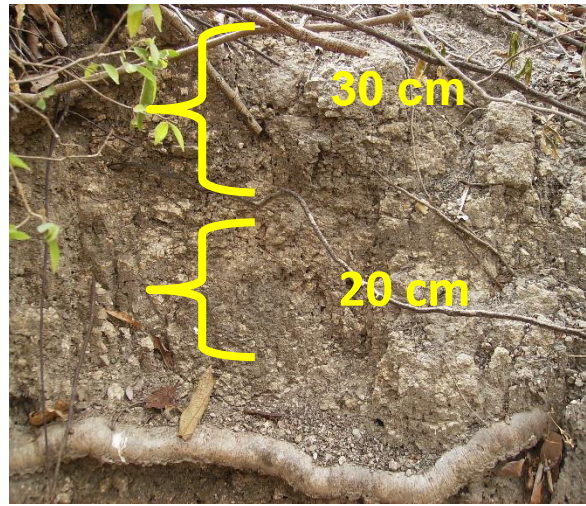
b) Perfil en el punto SC₁.

Figura 14.- Condiciones y perfil realizado en SC₁.

En el punto de muestreo SC₂ no hay presencia de RSU y la vegetación se encuentra sin perturbación. Además, hay presencia de árboles y un desarrollo de raíces a lo largo del perfil realizado (Ver figura 15a). En el perfil se detectó dos horizontes; el primero, de 30 cm y textura Arcilloso Arenoso (RA). El segundo, de 31 a 50 cm, con textura Franco Arcilloso Arenoso (Ver figura 15b).



a) Condiciones en el punto SC₂.



b) Perfil en el punto SC₂.

Figura 15.- Condiciones y perfil realizado en SC₂.

4.2.2 Tiradero a cielo abierto

En la tabla 4.2 se presentan los resultados de las propiedades del suelo evaluadas para los puntos **TCA₁** y **TCA₂**. Al igual que para el SC, se indica con **h₁** y **h₂** al primer y segundo horizonte, respectivamente (Ver tabla 16). Es importante notar que los horizontes del punto TCA₁, los cuales están en contacto con los RSU, tiene el doble de tamaño con respecto al punto TCA₂.

Tabla 16.- Resultados de los análisis en campo y laboratorio del sitio de estudio.

TCA Berriozábal				
Indicador de Calidad del Suelo / SDF	TCA₁ (con RSU)		TCA₂ (sin RSU)	
	Horizonte 1 (TCA₁ h₁)	Horizonte 2 (TCA₁ h₂)	Horizonte 1 (TCA₂ h₁)	Horizonte 2 (TCA₂ h₂)
Profundidad (cm)	0-30	31-60	0-10	11-25
Estabilidad de agregados	Muy baja	Muy baja	Alta	Muy alta
Volumen de Poros (%)	46 %	36 %	59 %	64 %
Infiltración (mm/h)	8.1		3.3	
Densidad aparente (g/cm³)	0.99	1.35	1.24	1.15
Densidad real (g/cm³)	1.83	2.12	3.05	3.25
Textura	Franco arcilloso arenoso	Franco arcilloso arenoso	Franco arcilloso	Arcilla
Conductividad eléctrica (μS)	1460.0	1317.0	215.7	221.8
pH	8.11	8.02	7.35	7.74
% de Carbono	0.83	2.60	10.83	10.49
% de Nitrógeno	0.06	1.19	0.68	0.66

Relacion C/N	13.83	2.18	15.92	15.59
P Intercambiable (mg / Kg)	4.0	0.6	0.5	0.2

Lo anterior, debido al manejo del sitio, que utiliza suelo de los alrededores para ir tapando los residuos, lo que va dando lugar a la formación de suelo mezclado con RSU (Ver figura 16a). En este punto se presentaron 2 horizontes, ambos con un espesor de 30 cm y textura CRA (Ver figura 16b).



a) Condiciones en el punto TCA₁.



b) Perfil en el punto TCA₁.

Figura 16.- Condiciones y perfil realizado en TCA₁.

En el caso de TCA₂ se encontraron dos horizontes; el primero, de 10 cm y con textura Franco Arcilloso (CR). El segundo, de textura Arcillosa (R) con una dimensión de 15 cm.



a) Condiciones en el punto TCA₂.



b) Perfil en el punto TCA₂.

Figura 17.- Condiciones y perfil realizado en TCA₂.

4.3 Análisis de la evaluación de la calidad del suelo

4.3.1 Indicadores físicos

El análisis de esta investigación se hace con base en los datos y condiciones reportados durante los recorridos de campo en los SDF de RSU, en los valores obtenidos en las pruebas de laboratorio y en lo que se reporta en la bibliografía respecto al tema.

En los SC₁ y TCA₁ (con RSU) existe una gran cantidad de residuos, sin ningún tipo de protección, en contacto directo con el suelo. Lo anterior se pudo apreciar tanto en el trabajo de campo, como en la comparación de imágenes de diferentes años entre los puntos con y sin presencia de RSU. En los puntos con presencia de residuos, en primer lugar, hay una remoción total de la vegetación en las zonas donde se depositan estos y, en segundo lugar, en las áreas circunvecinas la vegetación se encuentra pisoteada, seca y alterada, esto por los procesos del mismo sitio (paso con camiones, excavaciones, remoción de suelo) y por la misma acción de los desechos y los lixiviados sobre el ambiente.

En los puntos SC₂ y TCA₂ (sin RSU), la situación es totalmente distinta a la reportada anteriormente, la vegetación se percibe sin alteración, con tonos verdes, presencia de árboles y una gran cantidad de hojarasca en el suelo. Ello permite tener un primer acercamiento a las alteraciones que causa el depósito incorrecto de los RSU.

En contexto con lo anterior, es importante considerar las condiciones y diferencias en la vegetación de cada sitio, debido a que es un indicador de la perturbación de un sitio e influye directamente en la presencia de hojarasca, la cual favorece la regulación del ciclo de nutrientes, así como el mantenimiento de las condiciones productivas del suelo. Por otro lado, la descomposición y liberación de nutrientes de la hojarasca constituyen procesos clave para garantizar el adecuado funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos, las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos (Castellanos *et al.*, 2011).

Por otra parte, la vegetación es primordial para la estructura del suelo, ya que contribuye a la generación de hojarasca y ésta a la producción de humus, que a su vez influye en la formación de agregados, y, además, la cubierta vegetal protege a los agregados superficiales contra la erosión hídrica y eólica (Rucks *et al.*, 2004). En este sentido, la estabilidad de agregados es un indicador muy utilizado para evaluar la calidad de un suelo, ya que se encuentra relacionado con el porcentaje de porosidad, infiltración de agua y el porcentaje de carbono orgánico, lo que permite un primer acercamiento a la situación del suelo (Orellana *et al.*, 1994).

En el caso de la presente investigación, se observó que en los sitios con presencia de RSU (SC₁ y TCA₁), la EA está clasificada como **muy baja**, es decir, que los agregados están muy poco consolidados. Aunado a lo anterior, los porcentajes de volumen de poros está en un intervalo del 36% al 45%, con tamaño de poros **muy**

finos y finos, los cuales no permiten que el agua sea aprovechada por las plantas y la filtración sea mínima, favoreciendo la escorrentía y erosión, lo que es congruente si se considera que la vegetación se encuentra muy alterada o es inexistente en estos puntos (Ver tabla 17).

Los valores encontrados para la EA en SC₂ y TCA₂ es de **baja a muy alta** con porcentajes de volumen de poros mayores al 59%, el valor indicado como normal o adecuado para esta variable, aunado a esto, estos sitios tienen tamaño de poros de mediano a finos, lo que favorece la dinámica de drenaje, aireación del suelo, la captación de agua para las plantas y biota (Siebe *et al.*, 1996; FAO, 2018).

Tabla 17.- Relación de Indicadores físicos.

Sitio / Indicador	Sitio Controlado			Tiradero a Cielo Abierto			
	SC ₁ h ₁	SC ₂ h ₁	SC ₂ h ₂	TCA ₁ h ₁	TCA ₁ h ₂	TCA ₂ h ₁	TCA ₂ h ₂
Estabilidad de Agregados	Muy baja	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja	Alta	Muy alta
Volumen de poros	54 %	65 %	59 %	46 %	36 %	59 %	64 %
Tipo de poros	Muy finos	Finos	Finos	Finos	Finos	Medianos	Medianos
% de C	0.24	2.71	0.92	0.83	2.60	10.83	10.49

Relacionando con lo antes expuesto, la infiltración es otro indicador que refleja la situación del sitio, ya que uno de los efectos de la degradación es la compactación del suelo o la falta de estructura de este, lo que originaría la nula infiltración o la poca retención de agua, respectivamente.

De acuerdo con valores de infiltración medidos en campo, en los dos sitios se encontraron valores cercanos a los reportados en (CITRA, 2009), en la cual se relaciona cada tipo de textura con su velocidad de infiltración básica o estabilizada. Sin embargo, hay una diferencia de infiltración de hasta 5 mm/h entre los puntos con y sin RSU (Ver tabla 18).

Por ejemplo, SC₁ tiene una infiltración menor que SC₂, lo cual podría estar indicando un proceso de compactación y/o formación de una costra en el suelo a raíz de la nula vegetación y la interacción con los residuos y lixiviados. Por otro lado, TCA₁ presenta una mayor infiltración que TCA₂, lo cual es, en cierta medida, congruente con la dinámica del sitio, ya que en el punto donde son depositados los RSU (TCA₁) hay remoción de suelo constantemente, con una baja estabilidad de agregados, lo que indica una baja retención del agua.

Tabla 18.- Valores de infiltración (Referencia y Campo).

Valores de referencia		Infiltración en Campo		
Textura	Velocidad de Infiltración (mm/h)	Sitio	Textura	Valores en campo (mm/h)
Arcilloso	< 5	SC ₁	Franco arcilloso arenoso	10.7
Franco - Arcilloso	5 -10	SC ₂	Arcilloso arenoso	15.2
Franco	10 – 20	TCA ₁	Franco arcilloso arenoso	8.1
Franco arenoso	20 – 30	TCA ₂	Franco arcilloso	3.3

Fuente: Adaptado de CITRA (2009).

La densidad aparente es otra variable que nos indica la dinámica de infiltración del agua en el suelo, ya que valores elevados de este indicador se relacionan con baja porosidad del suelo y alta compactación, que propicia la escorrentía y baja infiltración (USDA, 2008).

Para SC₁ se obtuvo una densidad aparente de 1.4 g/cm³, que es mayor a la reportada para SC₂ que es de 1.0 g/cm³. Lo que permite reafirmar que en el primer punto mencionado hay una compactación del suelo, que no favorece la infiltración del agua. Mientras que en donde la presencia de los RSU es nula (SC₂), la infiltración es mayor, en concordancia con la densidad aparente obtenida.

En el caso de TCA, ocurre que en TCA₁ la densidad aparente es menor (0.99 g/cm³) que en TCA₂ (1.24 g/cm³). Lo que pareciera poco lógico, sin embargo, si se analiza en conjunto con los valores encontrados para la infiltración y la dinámica del sitio, los resultados se vuelven congruentes. Es decir, en TCA₁ se tiene una mayor infiltración y una DA menor, lo que se puede atribuir a la manipulación del suelo para cubrir los residuos, que hace que este pierda estructura y esté muy disgregado, permitiendo una infiltración muy alta. Para TCA₂, la DA se encuentra dentro de los valores reportados por USDA (2008) como los adecuados para el crecimiento de plantas (Ver tabla 1), además, los valores de infiltración son acordes a su textura, lo que permite afirmar que se encuentra dentro en un estado adecuado.

4.3.2 Indicadores químicos

Dentro de los indicadores químicos, el porcentaje de MO (C y N) es de suma importancia en los procesos de formación del suelo, propiciando que sus funciones se lleven a cabo de manera adecuada. La MO ayuda a que la DA disminuya, pero estas dos propiedades influyen, también, en la infiltración, la cantidad de poros, la aireación del suelo, la capacidad del suelo para mantener la vegetación, su grado de compactación y su capacidad de retención e infiltración de agua.

Por lo tanto, la pérdida o disminución de carbono y nitrógeno del suelo está asociada con la cobertura vegetal y el uso de suelo, ya que estos afectan la cantidad y calidad de los compuestos orgánicos en el suelo, en conclusión, donde se encuentra mayor y mejor vegetación, hay una mayor estructura al suelo (Castillo *et al.*, 2016).

Lo anterior, se puede entender de mejor forma estableciendo una relación entre los valores de la estabilidad de agregados y los % de C y N del suelo, los cuales mantienen una relación directamente proporcional, es decir, mientras la EA baja, el % de C y N se ve disminuido y viceversa (Orellana *et al.*, 1994).

Este fenómeno se puede apreciar claramente en los puntos con alteraciones por los RSU, es decir, SC₁ y TCA₁, donde la EA es muy baja y los porcentajes de carbono y nitrógeno son menores a los puntos SC₂, los cuales tienen una EA baja (Ver tabla 19). Es importante mencionar que, en el TCA, durante la evaluación de carbonatos, este sitio reaccionó ligeramente, lo que puede estar influyendo en la cantidad de carbono reportado. Sin embargo, en ambos sitios se mantiene la tendencia de proporcionalidad entre la EA y los porcentajes de C y N.

Tabla 19.- Relación entre la EA y la MO.

Sitio / Indicador	Sitio Controlado			Tiradero a Cielo Abierto			
	SC ₁ h ₁	SC ₂ h ₁	SC ₂ h ₂	TCA ₁ h ₁	TCA ₁ h ₂	TCA ₂ h ₁	TCA ₂ h ₂
EA	Muy baja	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja	Alta	Muy alta
C (%)	0.24	2.71	0.92	0.83	2.60	10.83	10.49
N (%)	0.05	0.21	0.09	0.06	1.19	0.68	0.66
C/N	4.8	10.33	10.22	13.83	2.18	15.92	15.59

En este mismo sentido, la cantidad y descomposición de la materia orgánica influye en las propiedades fisicoquímicas del suelo. La relación de C/N para el SC₂ se encuentra dentro del intervalo mencionado como ideal para su descomposición, caso contrario con SC₁ donde esta relación es muy baja, lo que se puede relacionar con la erosión del terreno, la baja cobertura vegetal y la presencia de residuos.

En TCA, en el punto con RSU el primer horizonte presenta valores muy altos respecto al segundo horizonte, que se relaciona con el alto grado de mineralización y humificación que está condicionado por la actividad microbiana en el suelo, producto del depósito de los residuos orgánicos, esto porque en el segundo horizonte se tiene una relación C/N de 2.18, lo que indica que hay una modificación de esta variable debido a la presencia de residuos en el primer horizonte. En el punto sin RSU, se tienen valores similares en ambos horizontes, los cuales están dentro de los valores reportados como óptimos para la descomposición de la MO.

Aunado a lo anterior, [Siebe \(2006\)](#) propone una relación entre los valores de pH con la disponibilidad relativa de nutrimentos y con importantes procesos pedogenéticos.

De acuerdo con la anterior, el pH de los sitios se clasificó con base en la norma [NOM-021-SEMARNAT-2000](#). Para el SC₁ se encontró como moderadamente ácido (5.80), donde se pueden estar llevando a cabo procesos de lixiviación de arcilla y movilización de N, Ca, Mg y S, lo cual es concordante en suelos con poca o nula vegetación, donde hay un potencial mayor para el lavado de sales ([Siebe, 2006](#)).

Para SC₂, el pH es ligeramente ácido con 6.15 y 6.00 para el primer y segundo horizonte, respectivamente. Donde se infieren procesos en el suelo como actividad biológica fuerte, humificación y neoformación de minerales. Esto puede ser congruente si se toma en cuenta los porcentajes de C y N, los cuales son mayores que en SC₁, además, que los agregados no están demasiado consolidados, comenzando el proceso de estructuración del suelo.

En Berriozábal sucede la situación contraria a Villaflores, es decir, TCA₁ es moderadamente alcalino con un valor de 8.11 y 8.02 en su primer y segundo horizonte, respectivamente. Deduciendo procesos, con base en [Siebe \(2006\)](#), como estructuración y movilización de materia orgánica. Mientras que en TCA₂, se le asignó al primer horizonte una evaluación de muy ligeramente alcalina (7.35) y en el segundo ligeramente alcalino (7.74), donde se estima que hay una gran descomposición de MO, lo anterior tiene relación con los contenidos de C y N tan alto en TCA₂.

Otro efecto que tiene el pH sobre el suelo es la disponibilidad de algunos elementos para las plantas, lo que favorece el crecimiento de vegetación y microorganismos, que propicie un mejor desarrollo de la estructura edáfica. En este sentido, el fósforo es uno de los elementos que su disponibilidad se asocia con el pH, es decir, con valores entre 6.5 y 7.5 hay una mayor disponibilidad de P, mientras que en características ácidas (pH menor a 6.5), se reduce la disponibilidad de este nutrimento y para valores alcalinos, algunas formas de fosfatos precipitan, lo cual reduce la disponibilidad de estos ([Bárbaro et al., 2014](#)).

Para este indicador, se encontró que la cantidad de fósforo en SC₁ (2.4 mg/Kg) es mayor que en SC₂ (SC_{2h1} = 1.2 mg/Kg y SC_{2h2} = 1.3 mg/Kg). Sin embargo, realizando una asociación con el pH reportado para cada punto, se infiere que hay

poca disponibilidad de este elemento para SC₁, mientras que para SC₂, a pesar de los valores más bajos de P, el pH no es tan ácido, lo que podría incidir en una mayor disponibilidad del nutrimento.

En el caso de Berriozábal, en TCA_{1h1} se encontró valores de P de 4.0 mg/Kg, lo cual está muy por encima de lo reportado para Villaflores, sin embargo, si bien este es el valor más alto de P, en general se clasifica como bajo, además al relacionarlo con su pH alcalino, se puede inferir que no se encuentra disponible para las plantas y que esta cantidad tan elevada se puede deber al alto contenido de residuos orgánicos en el sitio, lo que provee al suelo de muchos nutrientes.

Para TCA₂ el valor de P para el primer horizonte es de 0.5 mg/Kg y de 0.2 mg/Kg para el segundo horizonte, lo que, con suelos cercanos a pH neutros, permite suponer que el elemento puede estar disponible. Es importante mencionar que las concentraciones bajas de este elemento no presuponen un estado inadecuado del suelo, además, haciendo una relación con los demás indicadores se puede establecer que los sitios SC₁ y TCA₁, los cuales no tienen presencia de RSU y tienen valores más bajos de P, tienen parámetros que favorecen la disponibilidad de este elemento y el correcto funcionamiento del suelo.

Un indicador que está íntimamente asociado con los antes mencionados es la Conductividad Eléctrica (CE), esta propiedad del suelo está influenciada y asociada con propiedades como la textura, el contenido de MO, la humedad del suelo, la salinidad, el pH, nutrientes, entre otras. La CE tiene una relación directa con el porcentaje de humedad y la MO, ya que esta última ayuda a la formación de agregados que a su vez favorece a que haya más espacio poroso por donde se pueda circular la corriente eléctrica (Simón *et al.*, 2013).

Sin embargo, **se encontró que los valores más altos de CE están en los puntos con RSU** (SC₁ = 167 μ S y TCA₁ = 1460 μ S), donde hay menor MO y estructuración del suelo, lo que es contradictorio con lo antes mencionado. Lo que se puede explicar debido a que en estos sitios se favorece el incremento de sales, propias de los residuos y lixiviados, que arrastran consigo concentraciones elevadas de contaminantes orgánicos e inorgánicos, nitrógeno amoniacal, así como sales inorgánicas, lo que provocaría que haya mayor cantidad de CE en los puntos con RSU.

Para el caso de SC₂, la CE es de 141.0 μ S, cuyo valor es cercano a SC₁, esto, probablemente, a que no hay influencia de residuos y lixiviados. En este sentido, en TCA₁ (con RSU) la CE es de 1460 μ S, mientras que en TCA₂ es de 215.7 μ S, lo que evidencia el manejo tan deficiente que se tiene con los RSU en el SDF, propiciando que todos los contaminantes entren en contacto con el suelo.

La CE permite apreciar las consecuencias de las diferentes formas de manejo de los sitios, en el SC, aunque hay presencia de RSU en el suelo, la gestión se hace de manera más adecuada, permitiendo un mejor control de los contaminantes. Caso

contrario con los TCA, donde hay una gestión deficiente o nula, donde los residuos están en contacto directo con el suelo, lo que está cambiando las propiedades del sistema.

4.3.3 Metales

Aunado a la medición de los indicadores anteriores, se realizó un análisis de la concentración de metales en suelo asociados al depósito de RSU, con el objetivo de tener un mayor acercamiento a la situación de los sitios de estudio y su grado de contaminación. Es importante mencionar que la dinámica y comportamiento de los metales en el suelo está en función de otros de indicadores como el pH, la MO, carbonatos (Galán *et al.*, 2008).

Para cada muestra de suelo analizada se obtuvo la concentración para 31 metales, sin embargo, de estos solo se seleccionaron aquellos que se han asociado al depósito de residuos, que para ambos SDF estos elementos fueron el Ba, Cd, Pb, Cr, Ni y V.

Como se mencionó anteriormente, para establecer las concentraciones en las que cada metal y/o metaloide puede encontrarse en el suelo sin que su efecto sea adverso para la salud se utilizó la norma [NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004](#).

Para el SC de Villaflores, todos los metales se encuentran en concentraciones por debajo de las que establece la norma. Cabe mencionar que en SC₁ (con RSU) se encontraron concentraciones más altas, excepto el Bario, que en SC₂ (sin RSU) (Ver figura 18). Lo cual, no es un dato concluyente, pero puede ser un indicativo de que el sitio muestra cierto grado de alteración, con respecto al contenido de metales en el suelo (Ver tabla 20).

Tabla 20.- Metales para el Sitio Controlado de Villaflores.

SC VILLAFLORES			
Contaminante	CRT (mg/Kg)	SC ₁ (mg/Kg)	SC ₂ (mg/Kg)
Bario	5,400	46.69	55.91
Cadmio	37	2.51	1.86
Cromo	280	5.34	2.81
Níquel	1,600	3.68	2.99
Plomo	400	8.56	2.92
Vanadio	78	29.51	19.78

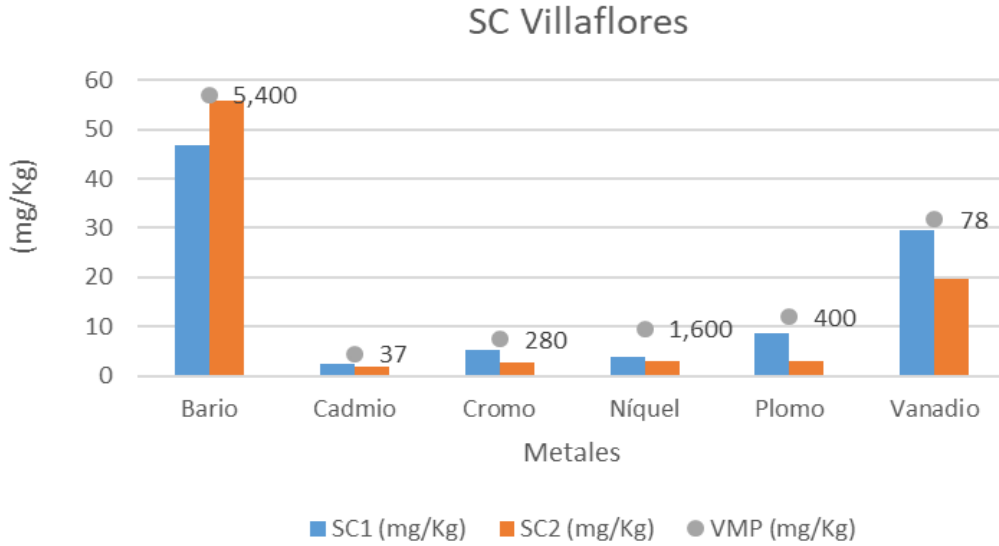


Figura 18.- Concentración de metales en SC.

En el caso de TCA₁ se encontraron concentraciones más altas, excepto de Níquel y Vanadio, que en TCA₂ (Ver figura 19). Aunado a que en el primer punto se detectó al plomo como el único metal, de todos los puntos, que supero las CRT de la norma (Ver tabla 21). Es importante mencionar lo anterior, ya que uno de los objetivos de la presente investigación es comparar dos modalidades de SDF, lo que permitiría conocer cómo afecta el manejo de los residuos en el ambiente.

Tabla 21.- Metales para Tiradero a Cielo Abierto de Berriozábal.

TCA BERRIOZÁBAL			
Contaminante	CRT (mg/Kg)	TCA ₁ (mg/Kg)	TCA ₂ (mg/Kg)
Bario	5,400	183.34	107.66
Cadmio	37	6.70	3.20
Cromo	280	125.57	108.12
Níquel	1,600	121.09	74.88
Plomo	400	792.19	2.12
Vanadio	78	81.31	68.36

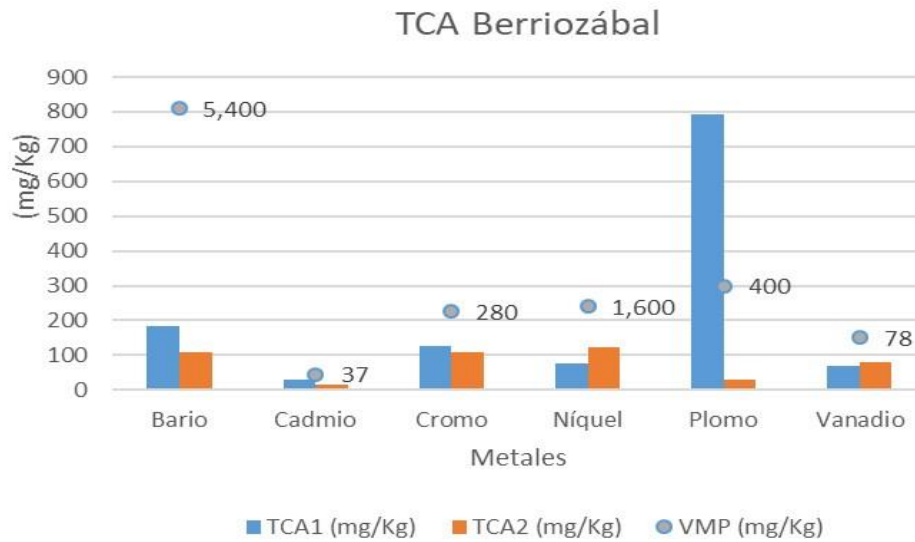


Figura 19.- Concentración de metales en TCA.

En contexto con lo anterior, en el TCA de Berriozábal se encontraron valores más elevados (hasta en un orden de magnitud), que en el SC de Villaflores. Lo que es un reflejo de la situación del sitio, ya que en este tiradero hay condiciones de seguridad y protección nulas, y aunque en el sitio controlado hay residuos sin protección, las condiciones no son tan precarias, teniendo un mayor control de la mayoría de los residuos que llegan al sitio.

En ambos SDF la concentración de metales es mayor en el punto con presencia de RSU que en el que está sin influencia de estos. Sin embargo, los valores en el TCA son más elevados que SC, lo que responde, de nueva cuenta, al manejo inadecuado de los residuos, los cuales son depositados directamente en el suelo, lo que permite que los residuos y lixiviados comiencen procesos de contaminación al ambiente.

V. Conclusiones

5.1 Generales

- El presente estudio da un primer acercamiento de las afectaciones al suelo debido al depósito de RSU, es importante dar seguimiento a la situación de los SDF de RSU.
- La disposición de RSU y la dinámica de los SDF propician cambios en las propiedades del suelo, principalmente, aumento o disminución de la infiltración del agua, la conductividad eléctrica y reducción en la estructura del suelo.
- La afectación sobre el paisaje en los puntos con RSU es sobresaliente en comparación con el punto sin RSU; remoción de vegetación, la colocación de celdas y residuos en todo el sitio.
- Los SDF han crecido y con ello la acumulación de residuos, esto en respuesta al aumento en la generación de RSU.
- En el punto SC₁ hay una disminución en el espesor del suelo con respecto a SC₂, mientras que en TCA₁ hay un aumento considerable de los espesores de los horizontes con respecto a TCA₂. Sin embargo, se necesitarían más análisis para determinar si es por la presencia de RSU.
- En los puntos con RSU existe un aumento de la conductividad eléctrica y concentración de metales, consecuencia de la descomposición de residuos de toda índole.
- La infiltración refleja el manejo de los residuos y la modificación de la estructura del suelo: compactación (baja infiltración) y baja estructura del suelo (alta infiltración).
- En los puntos sin RSU la relación C/N está dentro de los valores óptimos para la descomposición de la MO.
- La concentración de metales es más alta en el tiradero a cielo abierto que en el sitio controlado.

5.2 Especificas

Sitio Controlado, Villaflores.

- El control para el acceso al sitio es deficiente, los vigilantes dejan pasar a personas y camiones no autorizados, quienes entran a depositar sus residuos (en cualquier parte del SC) y algunos otros a pepenar.
- El sitio se encuentra localizado en terrenos con uso de suelo agrícola, no hay estudios para evaluar la aptitud del terreno para establecer un SDF.
- Las instalaciones para mitigar los efectos negativos al ambiente están muy deterioradas. Las celdas de depósito de residuos y los tubos de control del biogás se encuentran saturados, en mal estado o completamente destruido.
- En SC₁ las propiedades físicas se ven afectadas por la remoción de suelo y vegetación del sitio, originando una compactación del suelo y una disminución en los valores de infiltración.
- A partir de los valores obtenidos para la estabilidad de agregados, la porosidad y la densidad aparente, se infiere la poca estructura del suelo.
- En el caso de SC₂ (sin RSU), la porosidad y la densidad aparente se encuentran en valores indicados como óptimos para el buen funcionamiento del suelo.
- En el punto sin RSU la relación C/N esta en valores óptimos, pero en el punto con RSU esta relación baja hasta 4.8, lo que se atañe a la nula vegetación, la baja estructura y alta compactación del suelo, lo que origina poca presencia de microorganismo para la descomposición de la MO.
- Los valores en las concentraciones de metales son mayores en SC₁ en comparación con SC₂, sin embargo, en ninguno de los dos sitios se sobrepasó los valores referidos en la norma como perjudiciales a la salud.

Tiradero a Cielo Abierto, Berriozábal.

- El control para el acceso es nulo, la delimitación del sitio solo se hace a través de palos y alambres, la gestión de los residuos es inadecuada, ya que como único mecanismo de control de dispersión se remueve suelo de áreas adyacentes para ir cubriendo los residuos.
- No existe ningún tipo de medidas preventivas, tampoco un cambio de uso de suelo, ni estudios que permitan tener un análisis de la situación de la zona.

- El tipo de tratamiento que se les da a los residuos en el punto TCA₁ (con RSU) ha provocado que haya suelo combinado con RSU.
- La conductividad eléctrica en el punto TCA₁ es casi siete veces más alta que la que se presenta en TCA₂, consecuencia de la descomposición de residuos de toda índole.
- En TCA₁ (con RSU) se presenta una muy baja estructuración, originado por una disgregación constante del suelo.
- La relación C/N para el punto sin RSU está dentro de los valores óptimos, sin embargo, en el punto con RSU, en el primer horizonte hay un aumento de esta relación (13.93) con respecto al segundo horizonte (2.18), lo que se infiere por la cantidad de residuos depositados sobre este horizonte.
- La infiltración reafirma la condición anterior, ya que en TCA₁ este indicador es muy superior (8.1mm/h) a TCA₂ (3.3 mm/h), lo que refleja la baja consolidación del suelo, los pocos y grandes poros y la dinámica de del SDF.
- En TCA₂ la dimensión del perfil es de 25 cm, se tiene una muy alta estructuración del suelo, esto a partir de los valores de la estabilidad de agregados muy alta, la densidad aparente muy cercana al 1.0 g/cm³ y el porcentaje de poros por encima del 50%.
- La concentración de los metales medidos en el presente estudio es mayor en los puntos con RSU con respecto a los puntos sin RSU.
- En el tiradero a cielo abierto, en el punto con presencia de residuos, la concentración de Plomo rebaso los valores referidos en la norma como no perjudiciales a la salud.

VI. Bibliografía

Acurio, G., Rossin, A., Teixeira, P. F., & Zepeda, F. (1997). Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe. Inter-American Development Bank.

Astier Calderón, M., Maass Moreno, M., & Etchevers Barra, J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36(5).

Aguilar, J. A. A., Moreno, J. C. C., & Pérez, J. A. M. (2017). Cuantificación de residuos sólidos urbanos generados en la cabecera municipal de Berriozábal, Chiapas, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(4), 691-699.

Araiza, J. A. A., Moreno, J. C. C., Pérez, J. A. M., & Rojas-Valencia, M. N. (2017). Municipal Solid Waste Management in a Municipality of Chiapas, Mexico. *Social Sciences*, 6(5), 133-140.

Aguiló Alonso, M., Aramburu Maqua, M. P., Blanco Andray, A., Calatayud Prieto-Lavin, T., Carrasco González, R. M., Castilla Castellano, G., ... & Diaz Segovia, M. (1998). Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid (España). Secretaría General Técnica.

Aziz, H. A., Adlan, M. N., Amilin, K., and Rmaly, N. H. (2012). Quantification of leachate generation rate from a Semi-Aerobic landfill in Malaysia. *Environmental Engineering and Management Journal*.

Barbaro, L., Karlanian, M., & Mata, D. (2014). Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en los sustratos para plantas. Ministerio de agricultura, ganadería y pesca.

Bernache Pérez, G. (2012). Riesgo de contaminación por disposición final de residuos: Un estudio de la región centro occidente de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*.

Budhu, M. (2008). *Soil mechanics and foundations*. John Wiley & Sons.

Cantú, M. P., Becker, A., Bedano, J. C., & Schiavo, H. F. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del suelo*.

Castellanos-Barliza, J., & León Peláez, J. D. (2011). Descomposición de hojarasca y liberación de nutrientes en plantaciones de *Acacia mangium* (Mimosaceae) establecidas en suelos degradados de Colombia. *Revista de Biología Tropical*.

Castillo-Pacheco, L. A., Bojórquez-Serrano, J. I., Hernández-Jiménez, A., & García-Paredes, D. (2016). Contenidos de carbono orgánico en suelos bajo diferentes coberturas vegetales y de cultivo. *Cultivos Tropicales*.

Centro de Investigación y Transparencia en Riego y Agro climatología (CITRA). Infiltración de Agua en el Suelo. (2009).

Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas (CEIEG). Revisada el 15 de noviembre de 2018. Disponible en: <http://www.ceieg.chiapas.gob.mx>

Cruz Rivera, R., Orta Ledesma, M., Sánchez Gómez, J., & Rojas Valencia, M. (2002). Cuantificación de efectos ambientales de un tiradero a cielo abierto, caso de estudio. In Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, FEMISCA.

Cruz, A. B., Barra, J. E., del Castillo, R. F., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. Revista ecosistemas.

Doran, J.W. y Parkin, B.T. (1994). Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.

DOF (2014). Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. Diario Oficial de la Federación.

Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. (INAFED) Estado de Chiapas. Revisada el 14 de octubre de 2018. Disponible en: <http://www.inafed.gob.mx>

FAO. La importancia de los Suelos. (2015). Revisada el 14 de octubre de 2018. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-2015/blog/la-importancia-de-los-suelos/es/>.

FAO. II Boletín del año Internacional de los Suelos. 2015. Revisada el 20 de junio de 2018. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-bc277s.pdf>.

Fernández, M. T. (2007). Fósforo: amigo o enemigo. ICIDCA. Sobre los derivados de la Caña de Azúcar.

Ferreras, L., Toresani, S., Bonel, B., Fernández, E., Bacigaluppo, S., Faggioli, V., & Beltrán, C. (2009). Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. Ciencia del suelo.

Galán, H.E., Romero B. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química agrícola. Facultad de Química. Universidad de Sevilla.

Gamarra Lezcano, C. C., Díaz Lezcano, M. I., Vera de Ortíz, M., Galeano, M. D. P., & Cabrera Cardús, A. J. N. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. Revista mexicana de ciencias forestales.

García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. Pastos y Forrajes.

INAFED (2010). Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Estado de Chiapas. Revisada el 20 de enero del 2018. Disponible en: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM07chiapas/>

INEGI (2011). Censo Nacional de Gobierno 2011 Gobiernos Municipales y Delegacionales. Censo Nacional de Gobiernos Municipales Y Delegacionales 2011. CNGDM.

INEGI (2010). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Relleno Sanitario por entidad federativa.

INEGI (2010). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Censo de Población y Vivienda, 2010.

INEGI (2015). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Cuéntame INEGI, Información por entidad. Revisada el 5 de enero del 2018. Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/chis/poblacion/default.aspx?tema=me&e=07>

IUSS Working Group WRB. (2007). Base referencial mundial del recurso suelo. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos 103.

Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. y Schuman, G.E. (1997). Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. Soil Science Society of America J.

Kiss Köfalusi, G., & Encarnación Aguilar, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. Gaceta ecológica.

Kloster, N., Pérez, M., & Bono, A. (2016). Análisis del carbono total, orgánico e inorgánico en suelos de la región semiárida pampeana Argentina. Ciencia del suelo.

LGEEPA (1998). Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.

Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal.

Méndez Novelo, R. I., Cachón Sandoval, E., Sauri Riancho, M. R., & Castillo Borges, E. R. (2002). Influencia del material de cubierta en la composición de los lixiviados de un relleno sanitario. Ingeniería.

Merino L. y J. Robinson. (2006). El manejo de los recursos de uso común. Pago por servicios ambientales. CSMSS, The Christensen Fund, Fundación Ford, Semarnat, INE.

Mexicana, N. O. (2004). NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos

contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

Nájera Aguilar H., Castañón H., Figueroa A., Rojas Valencia M. N. (2010). Tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 3er Encuentro Nacional de Expertos en Residuos Sólidos. UAM Azcapotzalco, México D.F. 11° Foro de Ingeniería Ambiental.

Nichols, K. A., & Toro, M. (2011). A whole soil stability index (WSSI) for evaluating soil aggregation. *Soil and Tillage Research*.

NOM-021-SEMARNAT-2000. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación (DOF)*. 2003.

Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. *Diario Oficial de la Federación (DOF)*. 2004.

NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Norma Oficial Mexicana que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y vanadio. *Diario oficial de la federación (DOF)*. 2005.

NRCS. (2010). Soil Quality Fact Sheet. Soil Water. Helping People Help the Land.

ONU. (2000). Declaración del Milenio. Resolución aprobada por la Asamblea General, Naciones Unidas, Nueva York, 13.

Orellana. J., Pilatti, M. A. (1994). La estabilidad de agregados como indicador edáfico de sostenibilidad. *Ciencia del suelo* (2).

Page Dumroese, D., A.M. Abbott and T.M. Rice. (2013). Protocolo para la Evaluación de Disturbios en Suelos Forestales. Volumen II: Métodos Complementarios, Estadística y Recolección de Datos. USDA.

Pérez López, M. E., Vicencio De La Rosa, M. G., Alarcón Herrera, M. T., & Vaca Mier, M. (2002). Influencia del basurero municipal en la calidad del agua de acuífero de la ciudad de Durango, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*.

Pérez, R. M. A., López, J. A. R., & García, J. A. G. (2013). Evaluación de riesgo ambiental en un tiradero con quema de basura. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*.

PEPGIRSU (2010). Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial del municipio de Chiapas.

PERDOMO, C., & BARBAZAN, M. (2005). Área de Suelos y Aguas, Cátedra de la Fertilidad (Nitrógeno) Facultad de Agronomía. Universidad de la República de Uruguay-Montevideo. Consultado el 23 de abril del 2012.

Porta Casanellas, J., Reguerín, L. A., & de Laburu, M. R. (2003). Edafología para la agricultura y el medio ambiente.

POT de Chiapas. (Programa de Ordenamiento Territorial del Estado de Chiapas.

Puerta Echeverri, S. M. (2004). Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos. Revista lasallista de Investigación.

Robert, M. (2002). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la Tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra: Informes sobre recursos mundiales de suelos.

Robles-Martínez, F. (2008). Generación de biogás y lixiviados en los rellenos sanitarios (2da. Ed.). D.F., México: Instituto Politécnico Nacional.

Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). Propiedades físicas del suelo. Universidad de la República: Facultad de agronomía. Montevideo, Uruguay.

Sanzano, A. (2003). Fosforo del suelo. Química del suelo. Revisada el 21 de agosto del 2018. Disponible en: <http://www.edafo.com.ar/Descargas/Cartillas/Fosforo%20del%20Suelo.pdf>

Sanzano, A. (2001). El Potasio del suelo. Argentina: Cátedra de Edafología, Facultad de Agronomía y Zootecnia, UNT.

SEMARNAT. Informe Suelos. (2007). Revisada el 10 de noviembre del 2018. Disponible en: apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf.

SEMARNAT. Informe de Residuos. (2012). Revisada el 30 de octubre del 2018. Disponible en: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen_14/07residuos/711.html.

SEMARNAT. Acciones y Programa de RSU. 2017. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>. Fecha de consulta: 3 de mayo de 2018.

SEMARNAT. Residuos: Informe de La Situación Del Medio Ambiente En México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. (2013). Revisada el 5 de julio del 2018. Disponible en: <https://doi.org/978-607-8246-61-8>.

Segueda, A. N., Correa, G. V., Blanco, J. L., & Gamino, M. D. L. R. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo.

Siebe, C., & Jahn, R. (1996). Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (No. Folleto 15842).

Siebe, C., Bocco, G., Sánchez, J., & Velázquez, A. (2003). Suelos: distribución, características y potencial de uso. Las ENSEÑANZAS DE San Juan.

Simón, M., Peralta, N., & Costa, J. L. (2013). Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. Ciencia del suelo.

Puerta Echeverri, S. M. (2004). Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos. Revista lasallista de Investigación.

Urricariet, S., & Lavado, R. S. (1999). Indicadores de deterioro en suelos de la Pampa Ondulada. Ciencia del suelo.

USDA (Natural Resources Conservation Service). (2008). Soil Quality Indicators. Soil Structure and Macroores.

VII. Anexos

7.1 Conductividad hidráulica

SDF Berriozabal SIN RSU			SDF Berriozabal CON RSU			SDF Villaflores SIN RSU			SDF Villaflores CON RSU		
Kx, Kz	3.21E-03	m/s	Kx, Kz	8.14E-03	m/s	Kx, Kz	1.53E-02	m/s	Kx, Kz	1.08E-02	m/s
Medición 1			Medición 1			Medición 1			Medición 1		
distancia (cm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)	distancia (cm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)	distancia (cm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)	distancia (cm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)
1	2.2	0.004545455	1	1.17	0.008547009	1	23	0.000434783	1	33	0.000303
2	4.2	0.004761905	2	2.42	0.008264463	2	50	0.0004	2	1.08	0.0185185
3	6.5	0.004615385	3	3.39	0.008849558	3	1.2	0.025	3	1.5	0.02
4	8.6	0.004651163	4	4.57	0.008752735	4	1.53	0.026143791	4	2.26	0.0176991
5	10.17	0.004916421	5	6.5	0.007692308	5	2.3	0.02173913	5	4.18	0.0119617
6	13.12	0.004573171	6	8.4	0.007142857	6	3.09	0.019417476	6	5.15	0.0116505
7	16.15	0.004334365	7	11.2	0.00625	7	3.47	0.020172911	7	6.26	0.0111821
8	18.05	0.004432133							8	7.39	0.0108254
Promedio	0.0046		Promedio	0.0079		Promedio	0.0162		Promedio	0.0128	
Medición 2			Medición 2			Medición 2			Medición 2		
distancia (cm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)	distancia (cm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)	distancia (cm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)	distancia (cm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)
1	2.31	0.004329004	1	1.17	0.008547009	1	30	0.000333333	1	55	0.0001818
2	4.41	0.004535147	2	2.13	0.009389671	2	1.07	0.018691589	2	1.45	0.0137931
3	6.55	0.004580153	3	3.46	0.00867052	3	1.45	0.020689655	3	2.44	0.0122951
4	9.1	0.004395604	4	4.4	0.009090909	4	2.18	0.018348624	4	3.35	0.0119403
5	11.96	0.004180602	5	5.5	0.009090909	5	3.05	0.016393443	5	4.38	0.0114155
6	14.48	0.004143646	6	6.65	0.009022556	6	3.45	0.017391304	6	5.46	0.010989
7	17.51	0.003997716				7	4.4	0.015909091	7	6.57	0.0106545
8	20.48	0.00390625							8	8.1	0.0098765
Promedio	0.0043		Promedio	0.0090		Promedio	0.0154		Promedio	0.0101	
Medición 3			Medición 3			Medición 3			Medición 3		
distancia (cm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)	distancia (cm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)	distancia (cm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)	distancia (cm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)
1	3.57	0.00280112	1	1.3	0.007692308	1	31	0.000322581	1	1.1	0.0090909
2	6.09	0.003284072	2	2.6	0.007692308	2	1.12	0.017857143	2	2.1	0.0095238
3	8.81	0.003405221	3	3.5	0.008571429	3	1.49	0.020134228	3	3.08	0.0097403
4	11.61	0.003445306	4	5.02	0.007968127	4	2.34	0.017094017	4	4.11	0.0097324
5	14.37	0.003479471	5	7.02	0.007122507	5	3.2	0.015625	5	5.2	0.0096154
6	17.17	0.003494467	6	8.65	0.006936416	6	4.07	0.014742015	6	6.3	0.0095238
7	20.61	0.00339641	7	10.42	0.00671785	7	5.02	0.013944223	7	7.45	0.009396
8	24.83	0.003221909							8	9.17	0.0087241
Promedio	0.0033		Promedio	0.0075		Promedio	0.0142		Promedio	0.0094	