



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias Básicas



**Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias en Química Aplicada con
Orientación en Geoquímica Analítica**

**Evaluación del tratamiento de intercambio catiónico con Ca(OH)_2 en dos suelos
contaminados con agua congénita proveniente de un activo petrolero del estado
de Tabasco.**

Presenta:

Silvia del Carmen Madrigal Díaz

Asesores:

Dr. Carlos Mario Morales Bautista DACB-UJAT

Coasesor:

Dra. Iliana Margarita de la Garza Rodríguez FC-UAC

Cunduacán, Tabasco 17 de octubre de 2019



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ciencias
Básicas



DIRECCIÓN

14 de octubre de 2019

Ing. Silvia del Carmen Madrigal Díaz
Pasante de la Maestría en Ciencias
en Química Aplicada
Presente

Por medio del presente y de la manera más cordial, me dirijo a Usted para hacer de su conocimiento que proceda a la impresión del trabajo titulado "**Evaluación del tratamiento de intercambio catiónico con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en suelos contaminados con agua congénita proveniente de un activo petrolero del estado de Tabasco**", en virtud de que reúne los requisitos para el EXAMEN PROFESIONAL POR TESIS DE MAESTRÍA para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Química Aplicada.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

Atentamente

Dr. Gerardo Delgadillo Piñón
Director



DIVISIÓN ACADÉMICA DE
CIENCIAS BÁSICAS

C.c.p.- Archivo
Dr'GDP/Dr'MAVR/emt

Carta Autorización

La que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto físico como digitalmente la tesis de maestría: Evaluación del tratamiento de intercambio catiónico con Ca(OH)_2 en suelos contaminados con agua congénita proveniente de un activo petrolero del estado de Tabasco, de la cual soy autora y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la tesis antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro, autorización que se hace de manera enunciativa mas no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pueda surgir respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines enunciados en este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco a los días 17 del mes de octubre del año 2019.

Autorizó

Silvia del Carmen Madrigal Díaz



Contenido

I. Introducción.....	9
II. Marco teórico.....	11
2.1. Suelos.....	11
2.1.1. Horizonte A.....	12
2.1.2. Horizonte B.....	13
2.1.3. Horizonte C.....	13
2.1.4. Horizonte D.....	13
2.2. Tipos de suelos.....	14
2.2.2 Suelos Luvisoles.....	17
2.3. Agua congénita.....	19
2.4. Interacciones suelo-iones.....	20
2.4.1. Principales cationes intercambiables.....	21
a) Calcio (Ca^{++}).....	21
b) Magnesio (Mg^{++}).....	22
c) Potasio (K^+).....	22
d) Sodio (Na^+).....	23
2.5. Hidróxido de Calcio (Ca(OH)_2).....	23
2.6. Adsorción atómica.....	24
2.7. Intercambio catiónico.....	24
2.8. Conductividad eléctrica (C.E.).....	29
2.9. Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI).....	30
III. Antecedentes.....	32
3.1. Suelos afectados por sales.....	32
3.2. Impacto del agua congénita en el suelo.....	32
3.3. Manejo de las aguas congénitas.....	34
3.4. Tratamientos de suelos impactados por salinidad.....	34
IV. Objetivos.....	38
4.1. Objetivo General.....	38
4.2. Objetivos Específicos.....	38



V. Metodología	39
5.1. Caracterización del agua congénita y agua drenada de los suelos.	39
5.2. Muestreo de los suelos.	39
5.2.1. Perfil edafológico del suelo de Macuspana.....	40
5.2.2. Perfil edafológico del suelo de Paraíso.	41
5.3. Acondicionamiento de suelos.	41
5.4. Caracterización del suelo testigo.	42
5.4.1. Determinación de parámetros fisicoquímicos de los suelos NOM-021- SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).	42
a) Determinación de Densidad Aparente (DA).	42
b) Determinación de Densidad Real (DR).	42
c) Determinación de porcentaje de porosidad (% Po).	43
d) Determinación de Textura.	43
e) Determinación de pH y CE.	44
f) Determinación de capacidad de intercambio catiónico (CIC).	44
g) Determinación de porcentaje de materia orgánica (%MO).	45
h) Determinación de Capacidad de Campo (CC).	46
5.5. Preparación de las celdas.	46
5.6. Contaminación experimental de los suelos.	48
5.7. Muestreo y evaluación físico química del suelo contaminado.	49
5.8. Caracterización por intercambio catiónico con Ca(OH)_2 y evaluación fisicoquímica.	50
5.9. Caracterización física y química del suelo tratado.	51
VI. Resultados y discusiones.	52
6.1. Caracterización del agua congénita.	52
6.2. Clasificación de los suelos testigos.	52
6.2.1. Suelo arcillo – limoso proveniente de Macuspana.	52
6.2.2. Suelo arenoso proveniente de Paraíso	56
6.3. Caracterización física y química, homogenizada de los suelos Testigo, Contaminado, y Tratado.	58
6.3.1. Suelo arcillo limoso (Macuspana)	58



6.3.2. Suelo arenoso (Paraíso)	64
6.4. Cinética de la remoción de los suelos.....	68
VII. Conclusiones.....	75
VIII. Bibliografía.....	77
IX. Anexos.	82
9.1. Anexos A.....	82
9.2. Anexos B.....	84
9.3. Anexos C	86
9.3.1. Cálculos de K_G , RAS, PSI.....	86

Contenido de figuras.

Figura 1. Partes de un perfil edafológico (tomado de geosicingenieros y edición propia).	12
Figura 2. Mapa de suelos de Tabasco (tomado de Palma-López <i>et al.</i> , 2018).....	15
Figura 3. Esquema de producción del agua congénita (edición propia).	19
Figura 4. Estructura del hidróxido de calcio (tomado de Lifeder, 2008).....	23
Figura 5. Tipos de suelos (tomado de Gabriels <i>et al.</i> , 2011).	44
Figura 6. Preparación de las celdas.	47
Figura 7. Contaminación de los suelos.....	48
Figura 8. % de materia orgánica.....	59
Figura 9. Capacidad de Intercambio Catiónico.....	60
Figura 10. Variación del pH.	60
Figura 11. Tendencia de Conductividad Eléctrica.	61
Figura 12. Comparación de la tendencia de DA y DR.	62
Figura 13. Comparación de la tendencia de % de Po y % de CC.	63
Figura 14. Determinación de Textura	63
Figura 15. % de Materia orgánica.....	65
Figura 16. Capacidad de intercambio catiónico.....	65
Figura 17. Variación del pH.	66
Figura 18. Tendencia de la CE.....	66



Figura 19. Tendencia del porcentaje de DA y DR	67
Figura 20. Tendencia del porcentaje de Po y CC	67
Figura 21. Tendencia de porcentaje de Textura	68
Figura 22. Comportamiento de la CE en las muestras testigo, contaminadas y tratadas a 7 (Macuspana vs Paraíso).....	69
Figura 23. Evaluación de la CE en Macuspana y Paraíso.....	71
Figura 24. Comportamiento de la PSI en las muestras testigo, contaminadas y tratadas a 7 días (Macuspana vs Paraíso)	72
Figura 25. Evaluación de la PSI en Macuspana y Paraíso.....	74
Figura 26. Curva de calibración para el ion calcio	82
Figura 27. Curva de calibración para el ion magnesio.....	82
Figura 28. Curva de calibración para el ion potasio.....	83
Figura 29. Curva de calibración para el ion sodio.....	83
Figura 30. Cationes intercambiables – Macuspana.....	84
Figura 31. Cationes intercambiables – Paraíso	84
Figura 32. Cationes Ca^{++} y Na^+ Macuspana.....	85
Figura 33. Cationes Ca^{++} y Na^+ Paraíso.....	85

Contenido de tablas.

Tabla 1. Descripción de las características de un perfil de suelo arenoso (descripción Palma et al., 2007).	17
Tabla 2. Características de un perfil de suelo Luvisol (Palma et al., 2007)	18
Tabla 3. Características del agua salina y del suelo (Serrato et al., 2002).....	20
Tabla 4. Materiales para el muestreo de suelo.....	40
Tabla 5. Descripción de perfil (Macuspana)	40
Tabla 6. Descripción del perfil (Paraíso).....	41
Tabla 7. Diseño experimental, de los suelos (Macuspana y Paraíso).	47
Tabla 8. Determinación de cantidad de contaminante.....	48
Tabla 9. Cálculos de Ca(OH)_2 para Macuspana.....	49
Tabla 10. Cálculos de Ca(OH)_2 para Paraíso.....	49



Tabla 11. Parámetros agua congénita.....	52
Tabla 12. Descripción del perfil del suelo de Macuspana.....	53
Tabla 13. Caracterización fisicoquímica del suelo testigo de Macuspana.....	54
Tabla 14. Descripción del perfil del suelo de Paraíso.....	56
Tabla 15. Caracterización físico química del suelo testigo de Paraíso.....	57
Tabla 16. Caracterización física y química del suelo testigo, contaminado y tratado de Macuspana.....	58
Tabla 17. Caracterización física y química del suelo testigo, contaminado y tratado de Paraíso.....	64
Tabla 18. Clasificación de suelos salinos y sódicos (NOM-021-SEMARNAT-2000)	68



I. Introducción

La industria petrolera aporta residuos de la extracción que contienen componentes de alta peligrosidad, clasificados así según normativa mexicana vigente; uno de los residuos de producción de hidrocarburos es el agua congénita que contiene sales disueltas, como cloruro de calcio y sodio, carbonatos de sodio, cloruro de potasio, sulfato de calcio o bario, entre otros, cuya concentración puede alcanzar valores altos, es por esto que se debe de manejar y dar disposición según la legislación ambiental (Morales-Bautista *et al.*, 2011). El método empleado comúnmente para la disposición final de este residuo es un sistema de inyección a pozos petroleros agotados o bien en sistemas de tratamiento de aguas residuales para descarga en cuerpos receptores o costa afuera, sin embargo, por la mala operación en el almacenamiento, transporte e inyección presentan derrames que afectan directamente las propiedades del suelo (SEMARNAT, 2003, Mijaylova *et al.*, 2007).

El efecto negativo de los derrames de aguas congénitas varía depende si el residuo tiene un tratamiento previo o no, también de su composición que depende directamente del yacimiento, así como de las condiciones ambientales y del tipo de suelo de la zona, de manera general, los impactos pueden medirse mediante el aumento del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y los impactos sobre las propiedades físicas y químicas del suelo (Martel-Valles *et al.*, 2016). Además, diversos estudios han demostrado que un alto PSI en el complejo de cambio puede provocar dispersión y expansión de las partículas de suelo, lo que ocasiona la obstrucción de los espacios porosos y disminución de la conductividad hidráulica (Porta *et al.*, 2008).

Por otra parte, se ha evidenciado que existe un efecto adverso de la salinidad sobre la producción de cultivos, sin dejar fuera que el suelo es un recurso no renovable (Bohn *et al.*, 1993). En toda la república Mexicana existen problemas de salinidad por diversos factores, tales como malas prácticas de riego, por deforestación o cambio climático, esta última es más evidente en zonas aledañas a las costas y, también por derrames de aguas congénitas, que como se mencionó se encuentra asociado al sector petrolero, el cual se localiza mayormente en todo el litoral del Golfo de México, en caso específico de la zona



sureste se han empleado diversos tratamientos para suelos aluviales afectados por salinidad, siendo la aplicación de enmiendas de Ca(OH)_2 , una de la más efectivas. Sin embargo, no existe estudios que especifique de manera detallada que efectos tendría el tratamiento sobre suelos de lomeríos y de los cercanos a la costa, que poseen diferentes propiedades entre sí y con respecto a la zona inundable (Bautista *et al.*, 2017).

Es por eso que el presente trabajo se enfatizó en realizar remediación de dos suelos del estado de Tabasco, uno arenoso (costa) y otro arcilloso (lomerío), estos se contaminaron experimentalmente con agua congénita proveniente de una batería de separación de la paraestatal Petróleos Mexicanos (PEMEX). Como variables de respuesta se evaluaron los cambios en el PSI y conductividad eléctrica (CE) y, de este modo, se pudo establecer si el tipo de suelo tiene influencia en el tiempo de remediación. Con lo anterior se crearon técnicas básicas para optimizar el tratamiento de suelos salino mediante el intercambio catiónico con Ca(OH)_2 en el sureste mexicano.



II. Marco teórico

En la exploración y producción de petróleo crudo se generan distintos tipos de residuos, uno de ellos es el agua congénita, la cual contiene sales inhibidoras del crecimiento vegetal, como lo es el exceso de iones de sodio (Na^+) (García-Cuéllar *et al.*, 2004). Existen diversos factores por los cuales este contaminante puede llegar al medio ambiente, cuando esto sucede, se requieren procesos de descontaminación puesto que si consideramos la opción natural esto podría llevar mucho tiempo debido a la disposición del contaminante al medio, por lo que sería casi imposible que se restaure en un tiempo corto provocando así poco uso, bajos rendimientos y riesgos a la salud de la población (Ruiz, 2013).

Las técnicas de saneamiento o remediación de suelos contaminados se pueden dividir en biológicas, físicas y químicas, las cuales se pueden llevar acabo tanto *in situ* como *ex situ*, con la indicación de que la primera no puede realizarse directamente sobre el sitio contaminado, debe ser en un sitio aledaño, es por esto que la mayoría de los investigadores la nombra *in situ off site* (Rubio, 1996). En suelos contaminados por metales, una de las técnicas mayormente empleadas y con buenos resultados es la remediación química por intercambio catiónico, la cual se basa en agregar una solución de ion no dañino al suelo e intercambiarlo por uno o varios iones nocivo(s) presentes (s) en el mismo.

2.1. Suelos

El suelo se define como la capa más superficial de la corteza terrestre, esta tiende a ser dinámica y de escaso grosor en la que se asienta la vida y actúa como de interface de la atmósfera, hidrósfera, geosfera y biosfera, ya que contiene elementos de toda ella (López, 2014). Este recurso natural puede clasificarse gracias a sus perfiles, que se obtienen a partir de la exposición de un corte vertical (perfil edafológico) y se caracteriza por una serie de capas horizontales llamadas horizontes, un perfil pueden ser distintos entre un sitio y otro debido a la geomorfología natural o particular de cada zona. De

manera general, un perfil completo consta de los horizontes descritos en la figura 1. (FAO, 2002; Gisbert, 2010).

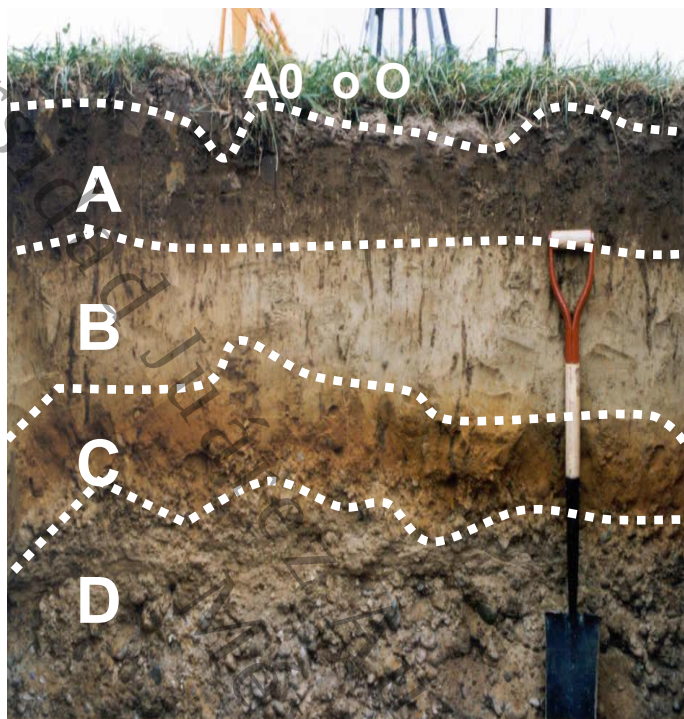


Figura 1. Partes de un perfil edafológico (tomado de geosicingenieros y edición propia).

En este apartado se realizó una síntesis que algunos autores establecen para conceptualizar la descripción de los horizontes en un perfil edafológico (Hodgson, 1987; Murray *et al.*, 2014; Weinzettel *et al.*, 2009).

2.1.1. Horizonte A (Horizonte de lixiviación o lavado, HA): Generalmente presenta un tono oscuro debido a la abundancia de materia orgánica (rico en humus), por el contrario, es pobre en minerales solubles ya que el agua de lluvia los disuelve arrastrándolos hacia los horizontes inferiores, en suelos aluviales, en las primeras capas generalmente existe presencia de Na y en las capas más profundas Magnesio (Mg). Es una capa muy importante porque proporciona al suelo los elementos nutritivos para las plantas. Si está muy desarrollado el horizonte A suele haber una gran acumulación de materia orgánica poco descompuesta llamado horizonte O o Ao, le sigue una zona rica en humus



elaborado llamado A1 y en el subnivel A2 predominan los minerales sobre los humus. Las profundidades de los horizontes son muy variables.

2.1.2. Horizonte B (Horizonte de precipitación o acumulación, HB), en este es donde se acumulan (precipitan) las sales minerales disueltas proveniente del HA, las cuales pueden presentarse como moteas y el color varía según el mineral que lo conforme. También, se caracteriza por tener mayor cantidad de arcilla, la morfologías y clasificación depende de la roca de formación (el tamaño pequeño de la arcilla hace que pueda ser arrastrado del horizonte A y acumularse en el B, además de la arcilla que ya pudiera ver en el B y que no provenga del A) y un color más claro que el anterior (por los escasos de materia orgánica y las riquezas de sales minerales).

2.1.3. Horizonte C (o de transición, HC). Este horizonte se encuentra constituido por la roca madre en proceso de meteorización, es decir, lo conforman fragmentos rodeado de unas matrices naturales arenoso-arcillosas integradas por minerales provenientes de la misma roca y sus alteraciones debido a la meteorización. Existe literatura que menciona que el suelo crece hacia abajo, ya que al alterarse la roca madre se incorpora al nivel C del suelo, los resultados de la alteración del HC se reflejan en el HB.

2.1.4. Horizonte D (Roca Madre, RM): La roca madre sin alterar.

En los suelos se presentan diferenciación de horizontes subsuperficiales esto se debe a procesos de sedimentación y responde variaciones texturales y litológicas. Los límites de los horizontes proveen información de los procesos formadores del suelo dominantes que han formado a ese suelo. En algunos casos, estos reflejan los impactos antropogénicos en el paisaje del pasado. Los límites de los horizontes son descritos en términos de profundidad, distinción y topografía. La mayoría de horizontes no tienen una profundidad constante (Figura 1).



2.2. Tipos de suelos

Para realizar una síntesis de los suelos de Tabasco y describir de manera general lo que se encuentran en el área de estudio se realizó un resumen de las obras de Palma-López *et al.*, (2007), lo reportado por Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en el año (2015) y tal, así como los reportes de Geissen *et al.*, (2008).

El estado de Tabasco cuenta con estudios de compilación sobre clasificación y caracterización de suelos a nivel subunidad y de unidades de suelo. De acuerdo a estos estudio se han encontrado 19 grupos de suelos, donde la superficie ocupada por cada grupo en porcentaje con respecto a la superficie total del estado (2 466 100 ha), en orden decreciente fueron: Gleysoles (20.5 %), Histosoles (13.4 %), Fluvisoles (10.4 %), Acrisoles (9.73 %), Vertisoles (7.48 %), Leptosoles (7.07 %), Alisoles (6.97 %), Luvisoles (6.49 %), Cambisoles (5.77 %), Arenosoles (2.1 %), Lixisoles (1.56 %), Solonchaks (1.6 %), Calcisoles (0.83 %), Nitisoles (0.39 %), Ferralsoles (0.29 %), Plintosoles (0.06 %), Tecnoles (0.04 %), Phaeozems (0.03 %) y Regosoles (0.03 %) (Figura 2) (Palma-López *et al* 2018).

En Macuspana los suelos dominantes son Gleysol (66.17%), Acrisol (11.91%), Luvisol (8.32%), Leptosol (2.22%), Vertisol (1.95%), Regosol (0.85%), Cambisol (0.75%), Phaeozem (0.66%), Ferralsol (0.05%) (INEGI, 2012)

Mientras que en Paraiso los suelos dominantes son Solonchak (26.09%), Vertisol (21.22%), Arenosol (18.67%) y Gleysol (13.20%) (INEGI, 2012).

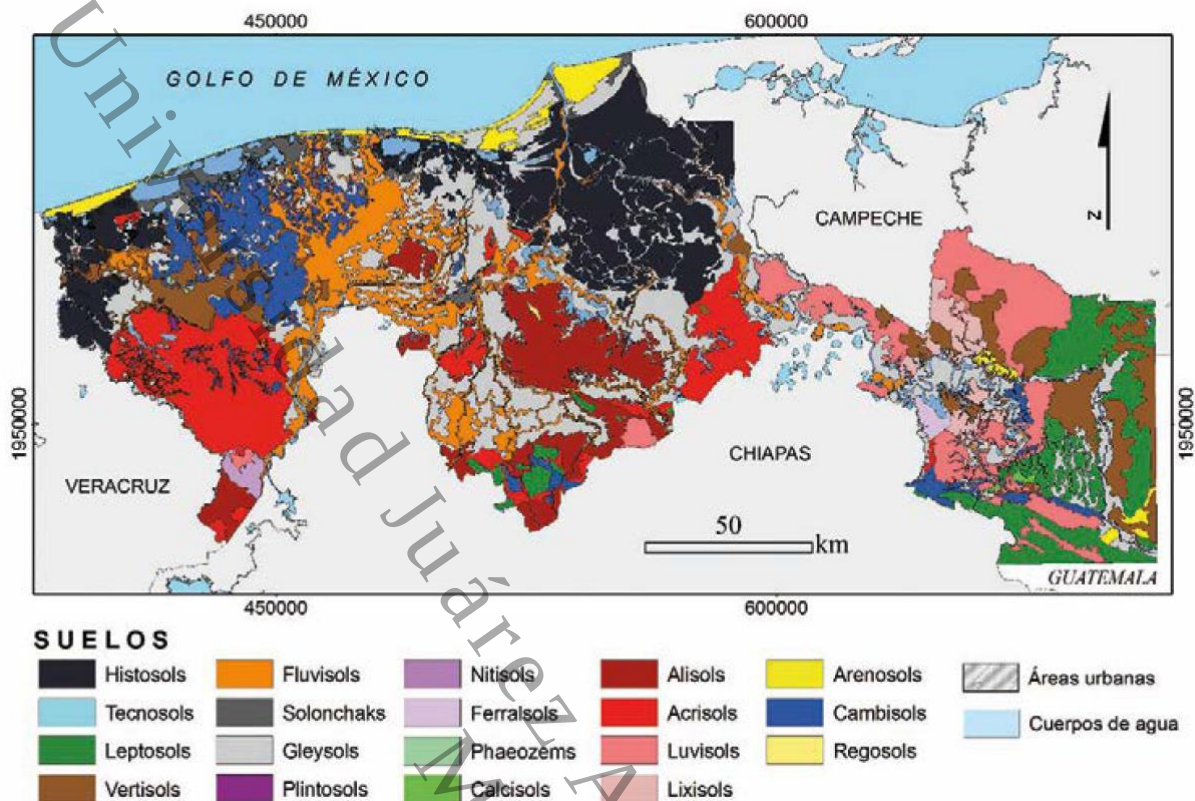


Figura 2. Mapa de suelos de Tabasco (tomado de Palma-López *et al.*, 2018).

Para este trabajo se utilizaron dos tipos de suelos (Arenosoles y Luvisoles) de los 19 tipos de suelos presentes en el estado de Tabasco, representados en los municipios de Paraíso y Macuspana en los cuales se registra actividad, por sus baterías de separación como lo son Terminal marítima dos bocas en el caso de Paraíso y Macuspana muspac en Macuspana.

2.2.1 Suelos Arenosoles

La característica principal de esta zona es su ubicación geográfica, se extiende a lo largo de la costa del Golfo de México en forma paralela a la línea costera, con una superficie cercana a las 80 mil ha (3.2% del territorio estatal) y en una extensión de casi 191 km desde Huimanguillo hasta Centla, incluyendo también parte de los municipios de



Cárdenas y Paraíso. Colinda hacia el sur con la zona fisiográfica de la llanura de inundación y en gran número de sistemas lagunares costeros (Palma-López *et al.*, 2007). La fisiografía de la zona es una serie de bordos de playa y dunas de arenas de forma cóncavo-convexa de material suelto a base de arenas principalmente del Cuaternario Reciente. Se extiende en forma paralela a la Costa dando aspectos de lomas y bajos de poca altura, los bordos de playa son formados por los sedimentos que llegan de las distintas corrientes y que se distribuyen por la acción del oleaje marino. Las dunas de playa que son de mayor altura, pero más inestables, son formadas por la acción eólica (Palma-López *et al.*, 2007).

Los arenosoles están se conocen comúnmente por estar compuestos por minúsculas partículas de piedra de 0.5 a 2 mm de diámetro, siendo este el tipo más ligero de todos los suelos. Su localización es principalmente en zonas tropicales o templadas muy lluviosas del sureste de México. La vegetación que presentan en estos suelos es variable, donde pueden predominar más las palmas (Palma-López *et al.*, 2007). Una de las características principales es su textura gruesa, con más del 65% de arena al menos en el primer metro de profundidad. En México son muy escasos, y su presencia se limita principalmente a las llanuras y pantanos tabasqueños y del norte de Chiapas. Estos suelos tienen una alta permeabilidad, y es por eso que presentan muy baja capacidad para retener agua y almacenar nutrientes para las plantas. La susceptibilidad a la erosión en los arenosoles va de moderada a alta (Bazant, 2015).

En Tabasco se pueden encontrar los arenosoles en zonas de la costa, estos pueden dividirse en Arenosoles Háplicos, Arenosol Endo-Gleico y también los suelos arenosos formados *in situ* a partir de areniscas (Arenosoles Hipolúvicos) (Palma-López *et al.*, 2007). La clasificación de los suelos se determina evaluando fisicoquímicamente el suelo. En este trabajo se utilizarán suelos Arenosoles Haplicos, en la Tabla 1 se describen las características del suelo.



Tabla 1. Descripción de las características de un perfil de suelo arenoso (descripción Palma-López *et al.*, 2007).

HO	Prof.cm	Descripción
A1	0-45	Color gris muy oscuro (5 YR 3/1) en húmedo; sin estructura; consistencia no plástica, no pegajoso; abundantes poros finos; abundantes raíces de muy finas a gruesas.
AC	45-95	Color pardo oscuro (7.5 YR 3/2 en húmedo; arenosa; sin estructura; consistencia ni plástica, no pegajosa; abundantes poros finos; pocas raíces finas de finas a gruesas.
C	95-130	Color pardo amarillento (10 YR 5/4) en húmedo; arenosa; sin estructura, consistencia no plástica, no pegajoso; abundantes poros finos; pocas raíces s finas y gruesas.

2.2.2 Suelos Luvisoles

Son suelos que se encuentran sobre una gran variedad de materiales no consolidados, tales como las terrazas aluviales o los depósitos glaciales, eólicos, aluviales y coluviales. Son muy comunes en climas templados y fríos o cálidos húmedos con estacionalidad de lluvia y sequía. Son comunes en bosques de coníferas y selvas caducifolias del sur del país. Se encuentran dentro de los suelos más fértiles, por lo que su uso agrícola es muy elevado y cubre por lo general, la producción de granos pequeños, forrajes y caña de azúcar (FAO, 2007). En este tipo de suelos se identificaron tres subunidades: los Luvisoles Crómicos, los Luvisoles Gléyicos y los Luvisoles Háplicos. Para este trabajo se utilizará el luvisol gleyico el cual tiene las propiedades del suelo de Macuspana, Tabasco, esto de acuerdo a la literatura que describe las características del suelo, que se muestran en la Tabla 2.



Tabla 2. Características de un perfil de suelo Luvisol (Palma-López et al., 2007)

HO	Prof.cm	Descripción
A1	0-47	Color en húmedo pardo oscuro (10 YR 4/3); textura migajón arenosa; estructura moderadamente desarrollada granular fina; consistencia en mojado ligeramente plástico y ligeramente pegajoso; poros numerosos muy finos y finos; raíces abundantes finas, delgadas y medias.
AC	47-71	Color en húmedo pardo amarillento (10 YR 4/4); motas comunes, medias, tenues, de color pardo oscuro (10 YR 4/3); textura arena migajosa; estructura débilmente desarrollada en bloques subangulares finos; consistencia en mojado no plástico y ligeramente pegajoso; pocos nódulos pequeños, blandos, esferoides, de color rojo; poros numerosos finos; raíces abundantes finas, delgadas y medias.
Bt1	71-120	Color en húmedo rojo amarillento (5 YR 5/8); muchas motas grandes, distintivas, de color pardo amarillento (10 YR 5/8); textura migajón arcillo arenosa; estructura fuertemente desarrollada en bloques angulares medianos; consistencia en mojado plástico y pegajoso; cutanes delgados de iluviación de arcilla con óxidos de hierro, en paredes de los agregados; poros numerosos finos, medios y gruesos; raíces pocas finas y delgadas.
Bt2	120-180	Color en húmedo amarillo rojizo (7.5 YR 6/8); muchas motas grandes, distintivas, de color rojo amarillento (5 YR 5/8); textura migajón arcillo arenosa; estructura fuertemente desarrollada en bloques angulares gruesos; consistencia en mojado plástico y pegajoso; cutanes por iluviación delgados, de arcilla y óxidos de hierro, en paredes de agregados; poros numerosos finos y medianos; raíces pocas finas y delgadas.

2.3. Agua congénita

En la figura 3 se muestra el esquema de producción del agua congénita.

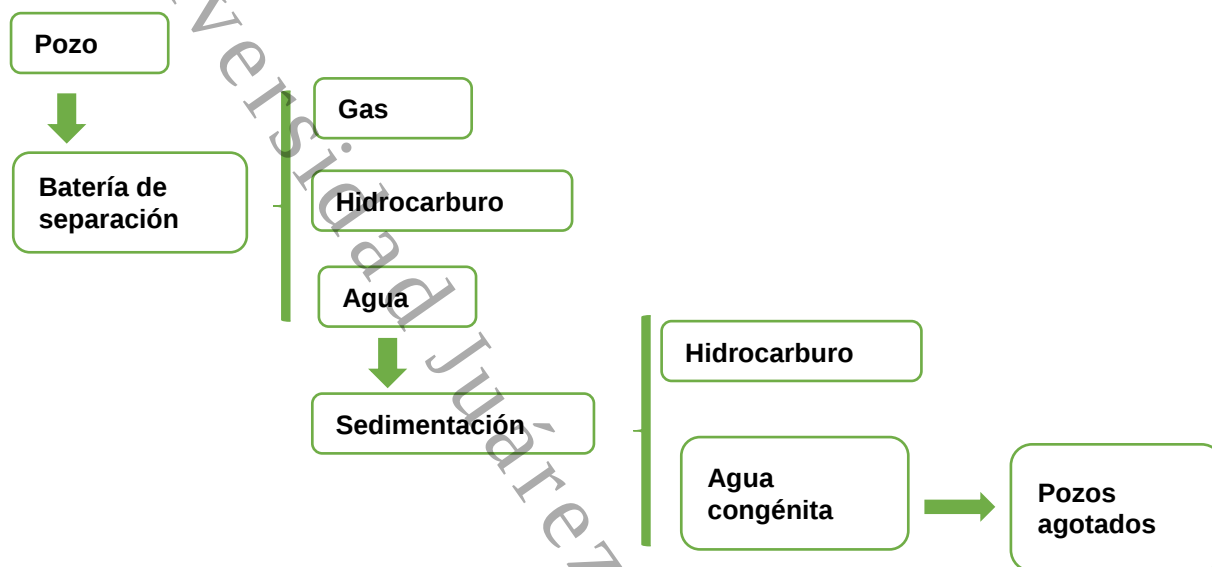


Figura 3. Esquema de producción del agua congénita (edición propia).

El proceso de desalinización del petróleo genera aguas congénitas. Su composición depende del tipo de petróleo que se extrae y procesa, así como las técnicas de extracción. Generalmente, este residuo de producción tiene sales inorgánicas tales como cloruros de sodio (NaCl), cloruro de potasio (KCl), entre otras, las cuales se encuentran en altas concentraciones en los hidrocarburos (Morales-Bautista *et al.*, 2011). La disposición de este desecho es difícil por los peligros de salificación de los cuerpos receptores (agua o suelo), así como la presencia de compuestos tóxicos, que pueden ocasionar impactos negativos al medio ambiente cuando su manejo y disposición no son adecuados, así como la salud humana (SEMARNAT, 2003). Principalmente se encuentra basado en la extracción de hidrocarburo, posteriormente es pasado a una batería de separación donde es tratado en sus tres fases: gas, hidrocarburo y agua congénita. El agua congénita es pasada por el proceso de sedimentación, donde el hidrocarburo recuperado es alineado a la línea inicial de producción y, el agua restante, es inyectada a pozos letrina y en algunos casos, este residuo es tratado para disponerse en cuerpos receptores, entre ellos, aguas continentales según la NOM-143- SEMARNAT-2003.



Cuando suceden derrames en suelos, estos son afectados debido a que el agua de producción posee características no compatibles con la biota presente y, los compuestos que mantienen el equilibrio y la calidad del suelo, de manera general, en este tema, en la Tabla 3 se describen los parámetros afectados en suelos impactados y posteriormente restaurados según lo reportado por Serrato *et al.*, (2002).

Tabla 3. Características del agua salina y del suelo (Serrato *et al.*, 2002)

Características del agua salina														
pH	CE	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	RAS	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	DT	A	ST
7.37	3.18	13.31	6.72	13.6	0.16	4.29	0	4.14	3.41	23.67	0.18	1001.2	207.2	2985
Suelo testigo														
7.5	2	12	2	23	0.9	14	2	5	1	13	17	-	-	-
Suelo contaminado														
4	8	15	7	45	1	80	7.5	7	7	41	32	-	-	-
Suelo tratado														
8	6	26	6.5	35	1	60	0	8	6.5	57.3	16	-	-	-

CE: Conductividad eléctrica (dS·m), Ca⁺⁺: ion calcio en meq/L, Mg⁺⁺: ion Magnesio en meq/L, Na⁺: ion Sodio en meq/L, K⁺: ion Potasio en meq/L, CO₃: compuesto en meq/L, HCO₃: compuesto en meq/L, Cl: compuesto en meq/L, SO₄: compuesto en meq/L, NO₃: compuesto en mg/L, Dureza Total en mg/L, A: alcalinidad, ST: Solidos totales en (mg/L)).

2.4. Interacciones suelo-iones

Los suelos retienen iones y moléculas mediante el intercambio de cationes y aniones mediante la atracción electrostática con el agua presente en la capacidad de campo (agua retenida en la estructura del suelo), este enlace se considera débil debido a que se encuentran disponibles para ser intercambiados nuevamente, principalmente en la rizósfera dependiendo directamente del tipo de planta; al ser transferidas, la formación de los complejos son de carácter químico y se favorecen principalmente en la materia orgánica, las arcillas y dentro de las células microbianas. Si un solo mecanismo o componente del suelo retuviera cierto tipo de ión, los factores de transferencia serían relativamente simples y fácil de explicar, no obstante un suelo contiene diferentes



concentraciones de diferentes iones y cationes, por su importancia en la fertilidad del suelo y la nutrición vegetal, los más estudiados son Ca^{++} Mg^{++} K^+ y Na^+ ; la relación de intercambio entre cada uno de ellos se explica a través de la relación de disposición de sodio (RAS) y su porcentaje intercambiable hacia las fases (PSI), considerado como factor de riesgo por salinidad, ya que este catión, preferentemente se solubiliza en agua saturando el medio y dejando los otros cationes no disponible. (Cáceres, 2007).

2.4.1. Principales cationes intercambiables

Para describir los principales cationes de suelo se realizó una búsqueda de información de la siguiente referencia (Bohn *et al.*, 1993, Acebey *et al.*, 2017, Adams, 1995, Cáceres, 2007).

Los cationes intercambiables se encuentran definidos vagamente como los que pueden removerse de los suelos con ayuda de soluciones salinas neutras, en tanto que las sales solubles se eliminan solo con agua. Los iones intercambiables representan la multitud de iones localizados en la capa doble difusa (DCD) que rodea las partículas coloidales de suelo; por lo contrario, las sales solubles se encuentran evidentemente en la solución de suelo, fuera de la influencia de la capa doble difusa. Debido a que los coloides del suelo, salvo algunas excepciones tienen una gran carga negativa neta, los iones intercambiables son cationes. Los iones intercambiables en los suelos agrícolas productivos casi siempre se encuentran presentes en el orden $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ = \text{Na}^+$.

Los otros cationes de metales de alcalinotérreos están presentes en los suelos solo en cantidades ínfimas. Sus contenidos totales son aproximadamente: litio, 10 a 300 mg kg^{-1} , rubidio, 20 a 500 mg kg^{-1} , berilio, 0.5 a 10 mg kg^{-1} , estroncio, 600 a 1000 mg kg^{-1} , bario, 100 a 3000 mg kg^{-1} .

a) Calcio (Ca^{++}).

Los cultivos más económicos tienen mayor rendimiento en suelos donde el complejo de intercambio esta denominado por el Ca^{2+} indica un pH casi neutro, deseable para la mayoría de los vegetales y microorganismos. El calcio es un ión y solo en raras



ocasiones los suelos tienen deficiencia de calcio. Cuando estas circunstancias se presentan, por lo general, lo hacen en suelos derivados de rocas serpentinas ricas en magnesio o en suelos saturados de aluminio, bastantes lixiviados y muy ácidos. Incluso así, el contenido de Ca^{2+} puede ser el suficiente para las necesidades de los vegetales, aunque las cantidades elevadas de Mg^{2+} y Al^{3+} puede restringir a la absorción de calcio en los vegetales. La condición de contenido alto de Ca^{2+} es deseable porque refleja concentraciones bajas de otros cationes intercambiables que podrán ocasionar problemas, principalmente, Al^{3+} en suelos ácidos y Na^+ en suelos sódicos. La meta de la rehabilitación de suelos ácidos o sódicos, es reemplazar la mayoría del Al^{3+} o del Na^+ por el Ca^{2+} . A pesar de la importancia que tiene el calcio como catión intercambiable, los suelos derivados de rocas calizas pueden ser improductivos. El intemperismo de la roca caliza libera Ca^{2+} y HCO_3^- , que se lixivian.

b) Magnesio (Mg^{++})

A pesar de que el magnesio es el segundo catión intercambiable más abundante en los suelos, es el ión menos estudiado de su grupo. Las cantidades excesivas o deficientes no son comunes. Algunas veces, el magnesio el Mg^{2+} con alta capacidad de intercambio se encuentra ligado a las condiciones físicas existentes en un suelo deficiente y aun pH alto, similares a las condiciones de los suelos sódicos a veces este es el resultado de que el suelo se formará en condiciones marinas, donde predominan el Na^+ y el Mg^{2+} .

c) Potasio (K^+)

El potasio es el tercer elemento fertilizante más importante después del nitrógeno y el fósforo. Muchos suelos de regiones húmedas y templadas no pueden suministrar suficiente K^+ a los cultivos. Aun que el K^+ es monovalente, su concentración en las soluciones del suelo es baja en relación con el K^+ intercambiable, debido a la fuerte absorción de K^+ que tiene muchos minerales silicatos laminares 2:1. A menudo, es lento el intercambio entre la solución del suelo y las capas intermedias de estos minerales.

d) Sodio (Na^+)

El sodio en contraste con el K^+ , es de interés para el suelo cuando se presenta en exceso, por ejemplo, más de 5 al 15% de los cationes intercambiables. El sodio puede acumularse en estas cantidades o aún mayores en zonas áridas donde las sales se acumulan en forma natural; y en los suelos regados con alto contenido de sodio.

Cuando el sodio intercambiable excede del 5 al 10% de la capacidad de intercambio catiónico del suelo se impide el movimiento de agua hacia dentro y a través de muchos suelos. Los vegetales no requieren sodio, pero pueden reemplazar parte del K^+ que requieren algunas variedades. El sodio es tóxico para algunas vegetales a concentraciones elevadas; para la mayoría de los vegetales este es un problema hasta cierto punto menor si se compara el movimiento de agua y aireación restringidos que normalmente proceden a la toxicidad provocada por el sodio, sin embargo, muchas plantas tienen la capacidad de presentar tolerancia o ajuste osmótico para sobre vivir (Adams, 1995).

2.5. Hidróxido de Calcio (Ca(OH)_2)

El hidróxido de calcio, también conocido como cal hidratada o cal apagada, es un compuesto inorgánico de fórmula Ca(OH)_2 . El hidróxido de calcio adopta una estructura polimérica, como todos los hidróxidos metálicos (Figura 4).

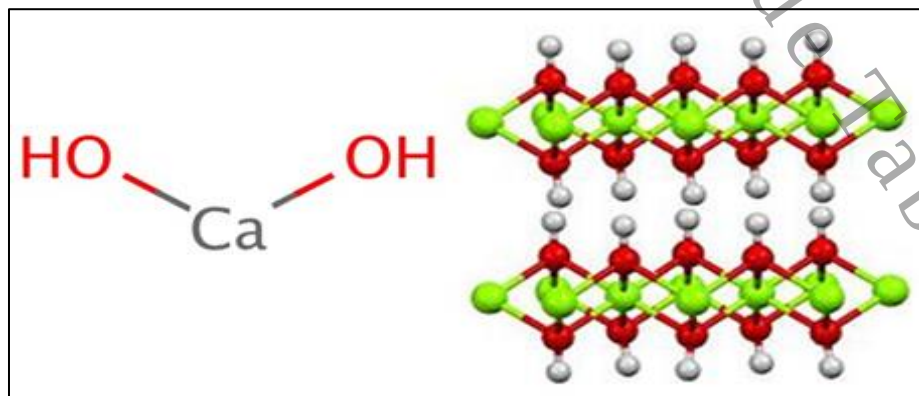
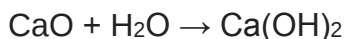


Figura 4. Estructura del hidróxido de calcio (tomado de Lifeder, 2008).



Se puede apreciar que en dicha estructura existe la formación de puentes de hidrógeno. El hidróxido de calcio se sintetiza industrialmente haciendo reaccionar óxido de calcio, también conocido como cal, con agua de acuerdo con la siguiente reacción:



El hidróxido de calcio tiene un peso molecular de 74.093 g mol y una densidad de 2.211 g cm^{-3} en estado sólido, es poco soluble en agua debido a que tiene un K_{ps} de 5.5×10^{-6} pudiéndose disolver con ayuda mecánica o mediante el incremento de temperatura (Bohn *et al.*, 1993).

2.6. Adsorción atómica

La espectrometría de absorción atómica permite cuantificar indirectamente la fracción de átomos no excitada. Para ello, los átomos presentes en una muestra son sometidos a una fuente de radiación electromagnética de la longitud de onda deseada, y que es característica del elemento que se desea medir, la trazabilidad en algunos equipos puede ser hasta partes por trillón o ppt (10^{-12} gramos de muestra en la matriz) Los átomos de la muestra que se hallan en estado fundamental adsorben una cantidad de esta energía directamente proporcional a su concentración. Posteriormente, se recoge la potencia radiante de la radiación electromagnética que emerge de la muestra, es decir, que no ha sido absorbida por ella, y se resta de la que se suministra inicialmente por la fuente. La diferencia entre las potencias radiantes de las radiaciones electromagnéticas que entra y sale de la muestra, es decir, la potencia radiante absorbida por dicha muestra, es directamente proporcional al número de átomos presentes en esta (Acebey *et al.*, 2017).

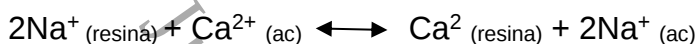
2.7. Intercambio catiónico

En general el intercambio catiónico es un proceso mediante el cual los iones se mantienen sobre un sólido poroso, poco solubles, se intercambian por iones de una solución que se pone en contacto con el sólido. Son reconocidas las propiedades de



intercambio iónico de caolines y zeolitas se han estudiado desde finales del siglo XIX. Las resinas sintéticas intercambiables de iones se produjeron en 1935 y han encontrado una gran aplicación en el tratamiento para “ablandar” aguas duras, deionización del agua purificación de soluciones, separación de iones y recientemente para tratar suelos contaminados por exceso de sales (Bohn *et al.*, 1993).

El equilibrio en el intercambio catiónico se puede tratar por la ley de acción de masas. Cuando una solución diluida que contiene iones calcio pasa a través de una resina con iones sodio estableciendo el siguiente equilibrio.



En general las separaciones por intercambio iónico se llevan a cabo en condiciones en las que uno de los iones predomina en ambas fases. Así, en el intercambio de iones del calcio de una solución diluida y ligeramente ácida, la concentración del ion calcio será mucho menor que la del ión sodio tanto como la solución como en la resina, como consecuencia la concentración del ión sodio será constante en ambas fases donde ecuación con la constante de equilibrio queda definida como una ecuación de constante de extracción, ambas, son analógicas:

$$\frac{(\text{Ca}^{2+})_{\text{res}}}{(\text{Ca}^{2+})_{\text{ac}}} = \frac{K (\text{Na}^+)_{\text{res}}^2}{(\text{Na}^+)_{\text{ac}}^2} = K$$

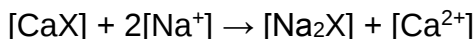
Los cationes clasificados como intercambiables corresponden a una de las tres categorías principales de iones existentes en los suelos (de fase sólida, intercambiable y soluble). Los cationes liberados por procesos de intemperismo y por descomposición orgánica varían grandemente en cuanto a la carga del ión, tamaño y polarización los cuales responden de manera diferente a los iones y superficies encontrados en el suelo; algunos tienden a precipitar nuevamente como minerales formados por el suelo principalmente en condiciones alcalinas y aquellos que poseen valencias altas como hierro, Manganese, Cobre y Zinc, otros tienden a permanecer en solución especialmente en pH moderadamente ácidos como Nitrógeno Fósforo, Potasio, Azufre y Magnesio; la



disposición de cada uno de ellos depende entonces del pH, la literatura menciona que el óptimo es de 6.5 a 7.5 pues es donde existe menos competencia de carga superficial que pueda retenerlas y por lo tanto, permanecen de manera predominante en la solución del suelo (iones solubles)(Bohn *et al.*, 1993).

Los iones intercambiables se encuentran vagamente definidos como cargas liberadas por el suelo mediante las soluciones neutras. Por el contrario, las cargas solubles pueden ser eliminadas solo con agua. Las soluciones de sales eliminan algunos aniones del suelo, pero, debido a que la mayoría de los coloides del suelo están cargados negativamente, la reacción principal la constituye el intercambio de los cationes del suelo por la solución extractora.

Por lo general, la distribución de los cationes intercambiables en el suelo es $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ de acuerdo a su concentración, si ésta varía, se rompe el equilibrio dando lugar a la competencia por potenciales eléctricos el cual afecta directamente la capacidad de intercambio. La suma de los cationes intercambiables en el suelo equivale generalmente a la capacidad de intercambio catiónico. Para el cambio entre cationes de carga diferente, la dilución de la solución de equilibrio favorece la retención del catión más cargado. Tomando en cuenta la reacción entre calcio y sodio que representan problema y solución aunado a que la diferencia de ambos potenciales favorece el intercambio en el tratamiento de un suelo.



La K de equilibrio de la reacción es:

$$K = \frac{[\text{Na}_2\text{X}] [\text{Ca}^{2+}]}{[\text{CaX}] [\text{Na}^+]^2}$$

Debido a que la relación de intercambio depende directamente de los iones intercambiables, reacomodando dicha ecuación quedaría:



$$[\text{Na}_2\text{X}]/[\text{CaX}] = K \frac{[\text{Na}^+]^2}{[\text{Ca}^{2+}]}$$

Esto también explica que la relación de intercambio que existe entre el calcio y el sodio, cambia con respecto a la concentración de sal total, lo cual se debe a la doble potencia del Sodio expresada en la k de reacción. Bohn *et al.*, 1993 mencionaron que el factor que determina la adsorción-desorción de un ión es su valencia, resaltan también que el intercambio de un catión por otro en presencia de un tercer catión, también se facilita conforme se incrementa la fuerza de retención del tercer catión, que no es más que el potencial eléctrico muy cercano al ión extractor, en específico el Mg^{2+} favorece en la selectividad de la solución de tratamiento con calcio a intercambiarse por el Na^+ presente en el suelo contaminado. Los sitios de intercambio de la materia orgánica, solo enlazan en forma débil a los cationes. Las arcillas con gran capacidad de intercambio tienden a enlazar los cationes bivalentes como el Ca^{++} y el Mg^{++} , con más energía que el K^+ . (Bohn *et al.*, 1993).

Tomando en cuenta todas consideraciones anteriores, el calcio se intercambiaría directamente con el sodio, debido a dos factores, el primero, son los de mayor y menor potencial eléctrico respectivamente y que están presentes en la reacción y, segundo, ambos se encuentran en altas concentraciones pues el Ca(OH)_2 es la solución de arrastre y el Na^+ que por naturaleza de las aguas congénitas es el ión en exceso, al derramarse hace que la concentración del Na^+ en el suelo aumente haciéndolos a ambos más disponibles a la reacción de intercambio, todos los trabajos similares hechos con anterioridad se basan en este principio, estudiando variación de concentraciones pero ninguno estudia el tiempo de residencia o de reacción entre ambos iones pero ninguno considera todos los iones presentes en el suelo, es decir, el tiempo en que el Ca^{2+} reacciona con el Na^+ y la interacción con magnesio, recordando la reacción se da por adsorción de la solución extractora sobre la muestra tratar, y que es precisamente la plataforma de nuestro trabajo.

Algunas limitaciones inherentes a la ecuación de intercambio catiónico son:



1. Frecuentemente se considera por separado el intercambio, rara vez se reconoce su presencia simultánea aún en sistemas ácidos.
2. Con frecuencia, se supone que la capacidad de intercambio es constante. Sin embargo, esta propiedad varía por la naturaleza del ión intercambiable, la concentración de la sal y con el pH.
3. Se estima una estequiometría sencilla 1:1 para el intercambio, las reacciones se explican en términos de la adsorción simultánea de moléculas o en representaciones de la formación de iones complejos.
4. La reversibilidad de la reacción se da por cierta.

El coeficiente de intercambio solo es aproximadamente constante dentro de un intervalo de concentración para el intercambio entre el Sodio y el Potasio. Dicha variabilidad restringe el emplear diversas ecuaciones de intercambio propuestas, Gapon en 1993 propuso la siguiente reacción:

$$\frac{[\text{NaX}]}{[\text{Ca}_{1/2}\text{X}]} = K_G \frac{[\text{Na}^+]}{[\text{Ca}^{2+}]^{1/2}}$$

Donde las concentraciones de los cationes intercambiables se encuentran en moles de carga por Kilogramo de suelo y la de los iones en solubles en mmol por litro.

En el presente trabajo se realizara el cálculo de los iones en solución a partir de la ecuación K_G es igual a $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]^{1/2} [\text{NaX}] / [\text{Ca}_{1/2}\text{X} + \text{Mg}_{1/2}\text{X}] [\text{Na}^+]$ donde la X representa a los iones intercambiables obtenidos del extracto de saturación y los otros representan los iones de concentración obtenidos en el extracto de dilución ambos determinados por adsorción atómica en UV-visible. De este modo también se determinará el RAS, RSI y el PSI.

$$\text{RAS} = \frac{[\text{Na}^+]}{([\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/2)^{1/2}}$$



$$\text{RSI} = K_G * \text{RAS}$$

$$\text{PSI} = \frac{\text{RSI}}{1 + \text{RSI}} * 100$$

2.8. Conductividad eléctrica (C.E)

Actualmente a pesar de la importancia para la vida, el suelo no ha recibido de la sociedad la atención que merece. Su degradación es una seria amenaza para el futuro de la humanidad. Por lo tanto, los científicos se enfrentan al triple desafío de intensificar, preservar e incrementar la calidad de la tierra. Para ello, es necesario contar con una sólida concepción de la calidad y con indicadores de calidad o salud de la tierra y de manejo sostenible de la misma, tal como se cuenta para dar seguimiento a variables sociales y económicas. El desarrollo de indicadores de calidad del suelo debería basarse en el uso de este recurso y en la relación entre los indicadores y la función del suelo que se esté evaluando. Deben considerarse propiedades edáficas que cambien en un periodo de tiempo relativamente corto (Lavell, 1996)

La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad de un material para transportar la corriente eléctrica. Es decir, una solución acuosa que contiene iones tiene esa habilidad. La conductividad de una solución electrolítica depende de la concentración total de iones presentes en agua, de la movilidad de cada uno de los iones disueltos, su valencia y de la temperatura a la que se hace la determinación. El principio por el cual los instrumentos miden conductividad es simple: dos placas de conductividad o electrodos se sumergen en la muestra, se aplica un potencial o voltaje a través de las placas y se mide la corriente que fluye entre las placas (SEMARNAT, 2000).

Recientemente, la salinidad se ha medido en términos de la conductividad eléctrica, de la solución. Para determinar la CE, se coloca la solución entre dos electrodos de configuración constante que incluyen una distancia de separación también constante. Cuando se aplica un potencial eléctrico, la cantidad de corriente que circula varía



diferentemente con la concentración total de las sales disueltas. A potencial constante, la corriente es inversamente proporcional a la resistencia de la solución y se puede medir con un puente de resistencias. La conductancia es el recíproco de la resistencia y sus unidades también son los recíprocos del ohm o el siemens (Revollo, 2015).

2.9. Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)

El efecto negativo del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) sobre las propiedades físicas del suelo depende de varios factores entre los cuales la presencia de sales en la solución del suelo, la textura, el tipo de arcilla y la conductividad eléctrica del agua de riego (Filho et al., 2003). Los efectos de la sodicidad en las propiedades de los suelos pueden afectar adversamente el balance ecológico de un área. Estudios han demostrado que un alto PSI en el complejo de cambio del suelo puede provocar dispersión y expansión de las partículas de éste. La dispersión y el consecuente reordenamiento de las partículas del suelo obstruirían los espacios porosos, disminuyendo así la conductividad hidráulica. La expansión de las partículas de arcilla produciría un afecto similar (Frenkel et al., 1978, Rhoades, 1990). El proceso de dispersión de las arcillas puede ir precedido por la expansión de las mismas, cuando el agua entra en contacto con la superficie de las micelas. Filho y colaboradores en el (2003) dieron una excelente descripción de cómo las partículas de arcilla sufren expansión, desintegración y dispersión en un medio acuoso y como cada uno de estos fenómenos afectan los procesos de compactación y cementación de los suelos.

Aragón et al., (2013). Encontraron que la adición de una pequeña cantidad de sodio intercambiable a una arcilla saturada con calcio aumenta la movilidad electroforética de la arcilla, sin embargo, no aumenta el tamaño de los cristales. A medida que el sodio intercambiable aumenta, el sodio penetra entre las placas de arcilla y desintegra sus estructuras cristalinas.

McNeal y Coleman (1966) indican que la conductividad hidráulica podría ser adecuada bajo altos valores de PSI siempre que la concentración de sales del agua de riego se



mantenga encima de un determinado valor, sobre el cual las partículas flocularían, también Pupisky y Shainberg (1979) indican que bajo estas condiciones aún habría una disminución de la conductividad hidráulica, provocada ahora por la expansión de las arcillas. Excesivo sodio intercambiable en el suelo asociado con pH mayores de 8.4 afectan las condiciones físicas de los suelos, perjudicando el movimiento del agua y del aire y consecuentemente el crecimiento de las plantas (Gupta y Abrol, 1990).

Al definir medidas de prevención y recuperación de suelos afectados por sales es de primordial importancia conocer la relación existente entre el contenido de sales y sodio con aquellos parámetros que determinan la eficiencia del drenaje. Entre estos parámetros, la conductividad hidráulica es talvez el más importante, debido a que esta determina la facilidad con que el agua se mueve en el suelo, fundamental para el crecimiento y desarrollo de las plantas, como también para la recuperación de los suelos sódicos. Por otro lado, el conocimiento cuantitativo de la relación entre la conductividad hidráulica y el porcentaje de sodio intercambiable del suelo puede permitir la introducción de una expresión relacionando el movimiento del agua en el suelo en función del porcentaje de sodio intercambiable (Pulido *et al.*, 2009)

El suelo que contiene suficientes sales solubles como para reducir el crecimiento de las plantas, con conductividad eléctrica (CE) en la pasta de saturación igual o mayor a 4 dS m^{-1} . Suelo que contiene suficiente sodio intercambiable para interferir con el crecimiento de los cultivos y que contiene cantidades apreciables de sales solubles. El porcentaje de sodio intercambiable es mayor de 15, la conductividad del extracto de saturación mayor de $4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. Contiene el sodio suficiente como para afectar adversamente las propiedades físicas y la permeabilidad (SEMARNAT, 2000).



III. Antecedentes

Por estar situada en la zona continental productora de hidrocarburos más importante de México, Tabasco es vulnerable a derrames de productos derivados del petróleo, entre ellos aceites usados en la producción y agua congénita. Esta última posee componentes considerados como tóxicos. Para esta zona, en la última década se han presentado emergencias ambientales por esa causa en diferentes zonas (Morales Bautista *et al.*, 2016).

3.1. Suelos afectados por sales

Los suelos afectados por sales son comunes en las regiones semiáridas y áridas, donde la precipitación anual es insuficiente para satisfacer las necesidades evapotranspiración de los vegetales. Como resultado, las sales del suelo no se disuelven. En vez de ello, se acumulan en cantidades por encima de $4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ (NOM-021-SEMARNAT- 2000), las cuales son perjudiciales para el crecimiento de los vegetales. Pero los problemas salinos no se limitan a zonas semiáridas o áridas. Pueden presentarse aun en regiones subhúmedas y húmedas en condiciones propias. Por otro lado, los principios químicos se aplican directamente al estudio y control de suelos afectados por las sales (SEMARNAT, 2000).

3.2. Impacto del agua congénita en el suelo

El proceso de recuperación de suelos salinizados y/o sodificados es una necesidad urgente; las técnicas de lavado con enmiendas químicas o sin ellas, se han estudiado bastante durante la rehabilitación de suelos salinos, pero para cada caso en particular o bien para generalizar recomendaciones para una zona determinada, es necesario caracterizar muy bien el suelo para indicar el tratamiento técnico más conveniente (Bautista *et al.*, 1999).



El uso de suelos afectados por sales y sodio intercambiable, se debe dar especial atención a sus características físicas, utilizándose prácticas de manejo capaz de mejorar la estabilidad estructural, y como consecuencia, las tasas de infiltración y conductividad hidráulica del suelo. La materia orgánica (MO) presenta un efecto importante en la mejora de las características físicas de suelos afectados por las sales y especialmente por el sodio. Esta tiene la capacidad de aumentar el grado de agregación de las partículas finas de la capa superficial, aumentando su estabilidad. Los ácidos húmicos, en cantidades elevadas, dificultan el hinchamiento de las partículas del suelo, evitando la disgregación, aumentando la cohesión de las partículas y manteniendo estable la estructura de los agregados; cuando la salinidad es muy alta, algunas plantas no sobreviven a estas condiciones por lo que la MO baja considerablemente, algunos autores agregan estiércol o cachazas pero cuando esto no es suficiente, se consideran otras tecnologías de remediación que primero permitan disminuir la concentración de Na^+ y posterior a esto agregar la parte orgánica (Otero *et al.*, 2007).

Las aguas congénitas o de formación, son aguas saladas que se encuentran dentro de la roca, asociadas a la presencia de hidrocarburos. Contienen sales disueltas, como cloruros de calcio y sodio, carbonatos de sodio, cloruros de potasio, sulfatos de calcio o de bario, entre otros; puede incluso contener algunos metales. La concentración de estos componentes puede ocasionar impactos negativos al ambiente cuando su manejo y disposición, no son adecuados. Los riesgos ambientales que se presentan en el manejo y disposición de las aguas congénitas son: la eventual contaminación de acuíferos con el proceso de inyección a formaciones receptoras, la contaminación de aguas nacionales si no se cuenta con parámetros de limpieza, y la contaminación del suelo cuando se producen derrames accidentales en su transporte (Cansaya *et al.*, 2018)

En este sentido, la norma oficial mexicana, NOM-143-SEMARNAT-2003, la que establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos, define al agua congénita de la siguiente forma: "Agua asociada al hidrocarburo en el yacimiento y que surge durante la extracción del mismo. Contiene sales y puede tener metales. Se considera un subproducto no aprovechable"



(SEMARNAT, 2003). Otra definición es dada por PEMEX: “Agua congénita: es el agua que queda atrapada entre los intersticios de una roca sedimentaria durante su formación y que ha permanecido aislada de la atmósfera desde entonces” (SEMARNAT, 2000). La tendencia mundial coincide en que las opciones óptimas para la disposición de las aguas congénitas asociada a la producción de hidrocarburos son su inyección en formaciones receptoras subterráneas, o su disposición en el mar. En México, durante 2001, en la explotación de petróleo crudo y gas natural, se produjeron 12.28 millones de metros cúbicos de agua congénita, de los cuales se reinyectó 87.9 % y se dispuso en cuerpos receptores que son aguas nacionales el 12.1% restante (PEMEX, 2001).

3.3. Manejo de las aguas congénitas

Las aguas congénitas asociadas a los hidrocarburos deben ser dispuestas en cuerpos receptores como aguas nacionales, zonas marinas mexicanas o en formaciones receptoras en el subsuelo. Cuando se disponga en cuerpos receptores que sean aguas nacionales debe de apegarse a lo establecido en la legislación vigente y en los convenios internacionales suscritos en la materia; cuando se disponga en formaciones receptoras o zonas marinas mexicanas, se hará conforme a las especificaciones ambientales que se establecen en la presente norma (SEMARNAT, 2003). En caso de presentarse derrames o infiltraciones al suelo durante el manejo de las aguas congénitas debe atenderse a lo dispuesto en la normatividad vigente en materia de restauración de suelos y saneamiento de acuíferos (SEMARNAT, 2003).

3.4. Tratamientos de suelos impactados por salinidad

La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico se le denomina contaminación. Toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural se denomina contaminante. Según la legislación, se determina que un suelo está contaminado si existe vertido de cualquier material y este



presenta una degradación de la calidad del suelo. Un aspecto que afecta al suelo y lo contamina es la acumulación de elementos en un espacio dado (Rendón *et al.*, 2010). Es por esto que, en este apartado se presentan una revisión de las principales tecnologías para el tratamiento de suelos contaminados por agua congénita:

- Serrato *et al.*, (2002), emplearon estiércol y recomendaron la aplicación de otros abonos orgánicos, tales como, paja, heno, cachaza o bagazo de caña, bagazo de maíz, u otros desechos orgánicos agrícolas para mejorar la estructura del suelo y hacer más efectivas las lluvias o lavados para la recuperación de los parámetros del suelo, realizando el aumento del volumen de este.
- Adams *et al.*, (2005) trabajaron en la restauración de áreas pantanosas contaminadas con sales e hidrocarburos en el sureste mexicano. El suelo colectado estaba contaminado por sales e hidrocarburos de petróleo, se dividió en dos lotes de acuerdo al porcentaje de materia orgánica (Lote 1 y Lote 2), el lote 1 con 21 % y el lote 2 con 56 %, los cuales fueron tratados por dos técnicas, la primera consistió en un intercambio catiónico usando nitrato de calcio para eliminar la concentración de sodio, y la segunda en una estabilización química-biológica para reducir la afectación por hidrocarburos. El tratamiento por intercambio catiónico redujo la CE en un 60 % (desde 16.4 hasta 5.8 dS m^{-1}), en la cantidad de Sodio hubo una reducción en un 70 % (desde 35.6 hasta 9.5) y la Relación de Adsorción de sodio (RAS) se redujo en un 65 % (desde 6.35 hasta 1.86). El tratamiento por estabilización, resultó en una reducción en la CE de aproximadamente 30 % (desde 5.8 hasta 1.8 dS m^{-1}), en la cantidad de sodio en 25 % (desde 9.5 hasta 3.5) y en la RAS, de 26 % (desde 1.86 hasta 0.5). Estos resultados fueron comparados con otros estudios y se muestra claramente que están dentro de los rangos apropiados para el tipo de vegetación pantanosa que se planea utilizar para el uso de este sitio (refugio natural, mosaico de pantano halófito y mangle blanco).
- Álvarez *et al.*, (2007) realizaron estudios en suelos de tipo Gleysols en la zona del Activo Cinco Presidentes en Huimanguillo, Tabasco; especificaron que cuando ocurren derrames de aguas congénitas en el área la mayoría escurre a las partes



bajas y que los suelos que comúnmente se ven más afectados son de este tipo ya que en un derrame que ocurrió en el 2004 de la fuga de un saloducto se manifestó en una loma, sin embargo, más de 90 % del área afectada fue la parte baja de la pendiente. Realizaron un tratamiento por intercambio catiónico como técnica de remediación, de acuerdo con sus parámetros iniciales, propusieron tres tratamientos en los que observaron que el uso del Ca(OH)_2 mejoró la Capacidad del Intercambio Catiónico (CIC) de $37 \text{ Cmol}^+/\text{Kg}$ a $41 \text{ Cmol}^+/\text{Kg}$ aunque también se elevó el valor de pH de 4.8 a 7 por lo que se recomienda aplicar esta técnica en suelos con valores de $\text{pH} < 5$, ya que en caso contrario se corre el riesgo alcalinizar (elevar demasiado el pH) el suelo.

- Adams *et al.*, (2008), realizaron estudios de los efectos potenciales sobre la fertilidad de suelos después de un tratamiento donde menciona que los principales parámetros afectados por aguas congénitas son la conductividad eléctrica, la relación de adsorción de sodio (Na^+) y a veces el pH del suelo. Encontró una relación positiva entre HTP y el Na^+ en Gleysols afectados por derrames viejos de petróleo (pasivos ambientales) en un área tropical. El índice precipitación-evaporación medido para un área del sureste de México con un clima tipo tropical húmedo-seco (AW en el sistema de Köppen) reveló un exceso de precipitación anual de $\sim 30+$ cm. Con este nivel de precipitación, en la mayoría de los sitios en regiones tropicales se lava el exceso de sales en 1-3 años, reduciendo la conductividad eléctrica y porcentaje de Na^+ intercambiable a niveles apropiados para el desarrollo de pastizales (entre ellos pasto humidícola), cultivos o vegetación silvestre.
- En los estudios de Morales-Bautista *et al.*, (2011) demostraron la importancia de la cinética en la aplicación del intercambio catiónico con Ca(OH)_2 para el tratamiento de un suelo arcilloso contaminado con aguas congénitas. El empleo de esta técnica permite conocer el tiempo necesario de aplicación para el control de los factores de salinidad y sodicidad, evitando desperdicios del producto y reduciendo riesgos de producir impactos mayores debido al incremento en el pH que se obtiene con este reactivo alcalino. Sin embargo, tomando estos factores en consideración, y usando la cantidad de reactivo necesaria, es posible utilizar el



producto aún en suelos neutros. Es importante también la selección apropiada de una pastura de arranque que sea tolerante a la alcalinidad, tal como *B. Decumbens*. Una vez establecido el pasto, en el medio tropical húmedo se logra establecer un pH neutro luego de varios meses, creando condiciones apropiadas no sólo para pastizales tolerantes, sino para diferentes cultivos, según el tipo de suelo. Posteriormente, Morales-Bautista *et al.*, (2016) también muestran la importancia de los efectos que tiene la matriz del suelo sobre los tratamientos con intercambio catiónico aplicando Ca(OH)_2 . El tiempo mínimo necesario para la remediación de suelos aluviales afectados por derrames de aguas congénitas en un campo petrolero en Tabasco, México, aplicando Ca(OH)_2 fue de dos días para los de textura franco-arenoso y diez días para los de textura franco arcilloso. Después de intemperizar durante siete meses el pH bajó a 8 y 7,5 respectivamente, aunque no se estabilizan a condiciones iniciales, siendo un indicativo para el uso del área pos-tratamiento. Los resultados contribuyen a evitar desperdicios y a favorecer la reducción de subproductos que pueden degradar los suelos.



IV. Objetivos

4.1. Objetivo General

Establecer las cinéticas de intercambio catiónico con Ca(OH)_2 en suelos tipo arcilloso y arenoso contaminados con agua congénita proveniente de un activo petrolero.

4.2. Objetivos Específicos

1. Caracterizar el agua congénita mediante la determinación especificada en los parámetros fisicoquímicos en la NOM-143- SEMARNAT-2003
2. Caracterizar los suelos contaminados, tratados y testigo mediante los parámetros especificados en la NOM-021-SEMARNAT-2000.
3. Establecer modelos de regresión para evaluarlas el comportamiento del tratamiento, con el fin de potencializar su vocación de uso del suelo.
4. Evaluación de datos mediante la prueba estadística ANOVA.



V. Metodología

Para cumplir con los objetivos propuestos se realizaron las siguientes metodologías del proyecto las cuales se describen a continuación:

5.1. Caracterización del agua congénita y agua drenada de los suelos

La caracterización del agua congénita proveniente de la batería de separación Shishito (UTM 15N, 490531E, 1989895.9N), se realizó mediante los métodos referidos en la NOM-143-SEMARNAT-2003, caracterizando los parámetros tales como lo fueron los sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, hidrocarburos totales del petróleo, demanda química de oxígeno, pH, coliformes totales, cloruros totales, conductividad eléctrica, color y dureza total.

5.2. Muestreo de los suelos

Para el estudio y análisis se realizó la siguiente metodología la cual consistió describir los parámetros geomorfológicos del sitio o área de estudio, con el fin de mantener un parámetro comparativo para la determinación del tipo de suelo. Posteriormente se realizó la excavación de 1x2 m, donde se puede observar la exposición de los horizontes presentes, con una profundidad indicada por el manto freático, cabe mencionar que esta distancia varía entre un suelo y otro. Concluida la excavación, se procede a medición de los parámetros de campo, tales como lo son los horizontes, color, textura, entre otras, según los establece las tablas referidas en la guía de muestreo de suelos en campo de Cuanalo *et al.*, (1999). Se toman las muestras representativas de cada horizonte, se etiquetan, se guardan en bolsas y se conservan en una nevera con hielo para su transporte del sitio de muestreo al laboratorio. Finalmente, se reintegra el suelo cuidando la estructura inicial de sus horizontes con el fin de no alterarlo.



Para la evolución de la metodología se decidió realizar el experimento de contaminación de suelos en los lugares de Paraíso y Macuspana, debido a que estos suelos son propensos a derrames de agua congénita, debido a que se encuentran en lugares donde se cuenta con baterías de separación.

Para la realización de los muestreos se utilizaron los siguientes materiales:

Tabla 4. Materiales para el muestreo de suelo

• Pala recta • Pico • Cava hoyos • Cinta métrica • GPS • Espátula • Tabla de Color de Suelo	• Barrenas de muestreo edafológico • Agua destilada • Guía de Campo de Cuanalo • H_2O_2 • Ácido Acético • Bolsas negras para conservación de muestras • Nevera
---	---

5.2.1. Perfil edafológico del suelo de Macuspana

Es una zona de lomeríos, con pendiente media, el drenaje es bueno, franco arenoso como material parental, se encontró flora cultivada como pastizal, se identificó flora nativa como limón, yuca, palmas, plátano, nance y aguacate. Se observó fauna (aves de corral) como pavos, pollos y patos, algunas lombrices y hormigas; las condiciones meteorológicas fueron nublado-soleado con vientos del norte, a 50 m de la laguna Morelos que se conecta con el río.

Tabla 5. Descripción de perfil (Macuspana)

La profundidad del manto freático: 165 cm	
Ho. 1	0-33 cm
Ho. 2	33-90 cm
Ho. 3	90-140 cm



Se obtuvieron los datos mencionados en la tabla 5, donde observamos números de horizontes presentes y profundidad de cada uno, encontrando el manto friático a una profundidad de 140 cm.

5.2.2. Perfil edafológico del suelo de Paraíso

El sitio presentaba inclinación aproximadamente de 60° , buen drenaje, arena como material parental, se encontró flora nativa como lo es camalote, guarumo, jujo, palma de coco, papaya, cadillo. Se observó fauna tal como perico, pájaros, hormigas, gusano, libélula, mariposas y araña; las condiciones meteorológicas parcialmente nublado.

Tabla 6. Descripción del perfil (Paraíso)

La profundidad manto freático: 1.61 m	
Ho. 1	0-58 cm
Ho. 2	58-120 cm
Ho. 3	120-161 cm

Como se puede observar en la tabla 6, se tuvo la presencia de tres horizontes y el manto friático a una profundidad de 161 cm.

5.3. Acondicionamiento de suelos

Una vez realizada la toma de muestra en campo, se trasladaron al laboratorio de análisis de suelos e hidrocarburos de la DACB-UJAT. Las muestras se secaron a 60°C durante 48 h, posteriormente se retiraron raíces y rocas, se molieron y tamizaron como lo marca la NOM-021-SEMARNAT-2000, por el método AS-01.



5.4. Caracterización del suelo testigo

Una vez que se tiene los suelos acondicionados se procedió a la realización de los parámetros fisicoquímicos de los suelos, esta caracterización correspondió a los suelos testigos realizado por cada horizonte, para conocer su edafología.

5.4.1. Determinación de parámetros fisicoquímicos de los suelos NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

a) Determinación de Densidad Aparente (DA)

Para este parámetro se utilizaron dos probetas graduadas de 10 mL, espátula y balanza analítica. La metodología consiste en obtener el peso vacío de la probeta. Después se colocó suelo en la probeta hasta aforar, se golpeó para compactar el suelo, se aforó nuevamente y por último se pesó la muestra de suelo, la diferencia de pesos de la probeta con y sin muestra equivale al peso del suelo en gramos. Obtenidos estos dos valores se calculó la densidad con la siguiente fórmula:

$DA = g \cdot mL$ (todas las mediciones se realizaron por triplicado).

Densidad aparente = $(P \text{ llena} - P \text{ vacía}) / \text{volumen de suelo} = g \cdot mL$.

b) Determinación de Densidad Real (DR)

Para este parámetro se requirieron dos probetas de 10 mL, una espátula, agua destilada, y una balanza granataria. Se colocaron 10 mL de agua en una probeta. Se pesaron 2 g de suelo, que se colocaron en otra probeta. Esta misma probeta se aforó con el agua destilada que se encontraba en la primera probeta hasta los 10 mL, lo que sobra de agua, es el representativo del suelo. La fórmula para realizar los cálculos es la siguiente:

Densidad real = $\text{masa de suelo} / \text{volumen de suelo} = g \cdot mL$. Para este cálculo se considera la masa de 2 g que se pesaron inicialmente y el volumen será el sobrante en la probeta.



c) Determinación de porcentaje de porosidad (% Po)

Una vez determinadas la DA y DR, se calcula el porcentaje de porosidad con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Porosidad} = \frac{\text{densidad real} - \text{densidad aparente}}{\text{densidad real}} * 100$$

d) Determinación de Textura

El cálculo de textura requirió tres probetas de 1L, un densímetro Bouyoucos, pH metro, balanza granataria y suelo. Para la determinación de texturas por el método de Bouyoucos, primero se pesó 50 g de suelos, se homogenizó mediante licuado o batido por 5 min, posteriormente se colocó en la probeta de 1000 mL, se agregó el agua hasta aforar, esta solución se sometió a agitación por otros 5 min. 30 segundos después, se colocó el Bouyoucos para tomar la primera medida de densidad y se midió la temperatura. Después se dejó en reposo por 2 h, y se continuó con la medición nuevamente de densidad y temperatura (por triplicado).

Con las siguientes formula mencionadas en la norma (SEMARNAT, 2000), se realizaron los cálculos para determinar el contenido del suelo. Tomando la lectura en la gráfica representada en la figura 4.

$$(\%L + \%R) = (L1 + Fc) * 2 \quad \text{Donde:}$$

$$\%A = (\%L + \%R) - 100 \quad \%R = \text{Porcentaje de Arcilla}$$

$$\%R = (L2 + Fc) * 2 \quad \%A = \text{Porcentaje de Arena.}$$

$$\%L = (\%L + \%R) - \%R \quad \%L = \text{Porcentaje de limo.}$$

Cuando se determinaron los cálculos de textura se ubicaron los resultados de %A, %R, %L en la gráfica representada en la figura 6, y de esta manera se conoce el tipo de suelo.

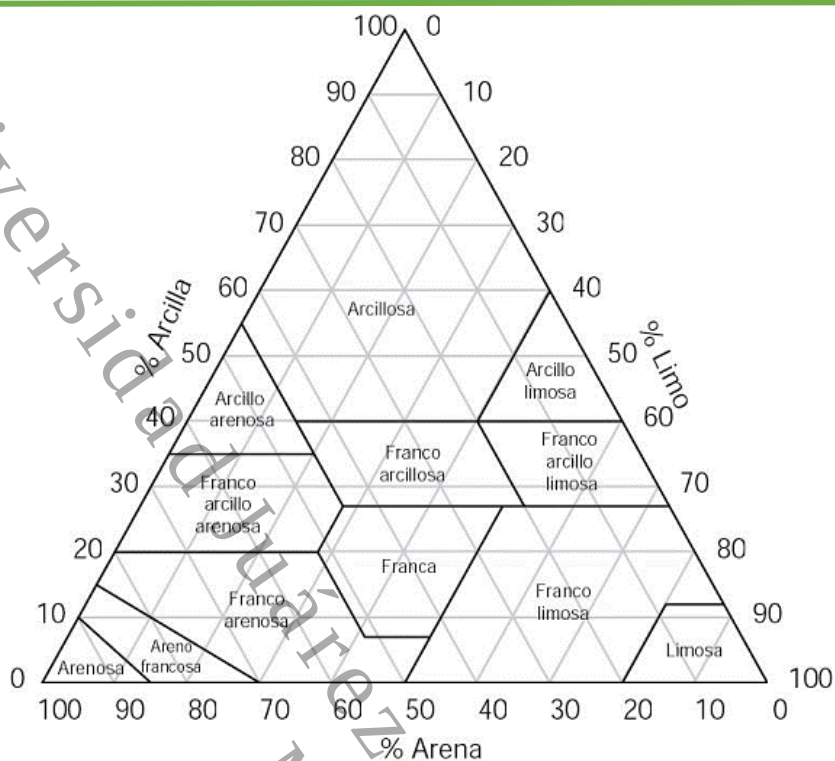


Figura 5. Tipos de suelos (tomado de Gabriels *et al.*, 2011).

e) Determinación de pH y CE

El material utilizado para medir el pH y C.E fue un pH metro, suelo, agua destilada, y vasos precipitados. Para la determinación de estos parámetros se pesaron 5 g de suelo que se agregaron a un vaso precipitado, la cual se diluyó en 10 mL de agua destilada, se agitó y se dejó reposar la solución por 5 min, esto se repitió tres veces. Con la ayuda del pH metro se realizaron las mediciones de pH, las muestras fueron preservadas y después de 24 h se realizó el filtrado de las mismas, posteriormente se midió CE con la celda de referencia o electrodo (Figura 7).

f) Determinación de capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Para realizar la determinación de CIC se requirió el reactivo acetato de sodio, ácido sulfúrico H_2SO_4 , hidróxido de sodio NaOH y los materiales fueron vasos precipitados,



agua destilada, y papel filtro. Primero se preparó una solución a 1 M, de acetato de sodio grado reactivo, luego se pesaron 5 g de suelo, que se colocaron en un vaso precipitado y se disolvió con 10 ml de agua destilada. Se agregaron 3 lavados con filtración, agregando 10 ml de la solución de acetato de sodio en cada lavado. La solución resultante se midió en volumen (V1), así mismo a esta solución se le toma el pH y C.E. si esta solución es básica se le agrega H_2SO_4 hasta llegar a pH neutro, en cambio si es ácida se agrega NaOH y se agrega hasta llegar a pH neutro, posteriormente se mide el volumen agregado (VG). Y se consideraron los siguientes cálculos:

La suma de $V1+VG=V2$. Para calcular CIC se aplica la siguiente ecuación: $C1 \ C2 = C2 \ V2$.

Se preparó la solución a .1 M para 300 mL. del acetato de sodio, utilizando las siguientes formulas:

$$M = \frac{N \text{ soluto}}{V \text{ solución}} \quad N = \frac{g}{p.m} \quad \frac{N \text{ soluto}}{V \text{ solución}} \quad M = \frac{g}{p.m} \quad g = (p.m)(M)(V)$$

Los datos obtenidos durante la practica fueron V1, V2, V gastado, así como la medición de pH. Las muestras se realizaron por triplicado (Figura 8).

g) Determinación de porcentaje de materia orgánica (%MO)

Los materiales utilizados fueron cápsulas de porcelana, suelo, balanza granataria, y la mufla. Para determinar el porcentaje de materia orgánica, se emplea el método de oxidación por calcinación. Primero se pesan las cápsulas de porcelana, luego se pesaron 5 g de suelo que se colocaron en las cápsulas (triplicado de muestras), se llevaron a la mufla para calcar a una temperatura de 375 °C por 12 h. Una vez transcurrido este tiempo, se dejó enfriar para luego pesar las muestras, %MO se calculó por medio de la siguiente formula:

$$\% \text{ MO} = \frac{\text{Masa seca} - \text{Masa calcinada}}{\text{Masa seca}} * 100$$



h) Determinación de Capacidad de Campo (CC)

Para la elaboración de Capacidad de campo se requirieron vasos de unicel, suelo, agua destilada, charolas grandes, estufa, y balanza granataria. La determinación de la capacidad de campo se realizó mediante el método de la columna. Primero se prepararon vasos del mismo volumen con agujeros en el fondo, luego se lo colocaron papel filtro por dentro hasta el fondo. Se pesó 5g de suelo y se agregó a cada vaso, posteriormente se saturó con 10 ml de agua y se colocaron en charolas que contenían agua, de tal modo que el agua pueda agregarse al suelo mediante gravedad y por capilaridad, esto se dejó por dos horas, posteriormente se dejó escurrir por media hora y se registra peso húmedo. Consecutivamente se llevaron las muestras a la estufa donde permanecen 3 días para que se obtenga el peso seco, a una temperatura de 60°C , al finalizar el tiempo se pesaron nuevamente y este fue el peso seco (Tabla 14 y 15).

$$C. C = \frac{\text{peso saturado} - \text{peso seco}}{\text{peso saturado}} * 100$$

Se realizó la evaluación fisicoquímica como lo marca la NOM-021-SEMARNAT- 2000. En los suelos testigos de Macuspana y paraíso, realizándose cada evaluación por cada horizonte presente en los suelos, este resultado resalta información para determinar el tipo de suelo presente.

5.5. Preparación de las celdas

Se prepararon las celdas para realizar el contaminado experimental del proyecto, esto se realizó en macetas de seis litros cada una, las cuales se les hizo agujeros en el fondo y se taparon con silicón temporalmente, se colocó una manta de algodón en el fondo y se depositó tres kilogramos de suelos en cada celda, los suelos depositados en cada celda se realizaron tomando un kilogramo de cada horizonte presente del suelo y se homogenizo. Este procedimiento fue repetitivo para cada celda.



Figura 6. Preparación de las celdas.

Se utilizaron un total de diez celdas, siendo cinco para cada suelo. Las celdas blancas, contienen suelos testigos, las celdas azules contienen suelos contaminados testigos, las celdas verdes contienen suelos de Macuspana contaminados con agua congénita, que posteriormente fueron remediados, se utilizaron tres celdas. Las rojas son del suelo de Paraíso con sus tres repeticiones (figura 10). Basado en el siguiente modelo experimental.

Tabla 7. Diseño experimental, de los suelos (Macuspana y Paraíso)

TM	TCM	MTR1	MTR2	MTR3
TP	TCP	PTR1	PTR2	PTR3

Donde TM: Testigo de Macuspana, TCM: Testigo Contaminado Macuspana MTR1: Macuspana Tratado 1, PTR1: Paraíso Tratado 1.

Una vez realizado el acondicionamiento de las celdas se procedió a realizar la caracterización fisicoquímica de los suelos testigos homogenizado como referencia del prototipo empleado, la cual consistió en la evolución que menciona la norma (SEMARNET, 2000).

5.6. Contaminación experimental de los suelos

Para realizar la contaminación experimental de los suelos se tomó como referencia el parámetro físico y químico la CC, calculada anteriormente de los suelos testigos homogenizados y se consideró el doble del contaminante para saturar el medio (suelo) y simular un derrame de aguas congénitas. Los cálculos fueron los siguientes (Morales-Bautista *et al.*, 2011):

Tabla 8. Determinación de cantidad de contaminante

Macuspana		Paraíso	
3 Kg = 3 L	100 %	3 Kg = 3 L	100 %
2.4 L	80 %	1.2 L	40 %

La cantidad del contaminante utilizada para el suelo de Macuspana fue de 2.4 L y Paraíso 1.2 L como lo marca la tabla 8, este proceso tardó un tiempo de aproximadamente 10 días de inundación (figura 7), posteriormente se trató con el fin de simular un derrame de atención inmediata (Six *et al.*, 2002).



Figura 7. Contaminación de los suelos.



5.7. Muestreo y evaluación físico química del suelo contaminado

Transcurridos los diez días después de la contaminación experimental del suelo, se retiraron los tapones de silicón de las celdas para drenar el agua, esta agua se recolectó nuevamente en recipientes, enseguida se tomaron muestras del suelo contaminado, los cuales se sometieron a secado y acondicionamiento para realizar la caracterización fisicoquímica del suelo contaminado como lo marca la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2000).

5.8. Tratamiento del suelo

El tratamiento del suelo contaminado consistió en la aplicación del Ca(OH)_2 , para lo cual se realizaron cálculos con base en la conductividad eléctrica y la capacidad de intercambio catiónico. Con el fin de obtener la cantidad de cal en g y la cantidad de agua en mL, para realizar la preparación de la solución del tratamiento de los suelos.

Con base en los cálculos realizados ya mencionados, se realizaron los siguientes cálculos (Morales-Bautista *et al.*, 2011):

Tabla 9. Cálculos de Ca(OH)_2 para el suelo de Macuspana

CIC	CE	CIC	Ca(OH)_2
41	14	41	31.6
21.46	7.33	21.09	16.53

Tabla 10. Cálculos de Ca(OH)_2 para el suelo de Paraíso

CIC	CE	CIC	Ca(OH)_2
41	14	41	31.6
20.09	6.86	20.09	15.48

La tabla 9 y 10, muestran, los valores referidos a la CIC y CE se tomaron de Morales-Bautista (2011). Considerando la CE calculada de los parámetros físicos y químicos de cada suelo y en relación a ellos obtuvo la CIC. Así mismo se utilizó este valor para el



cálculo del óxido de cal (CaO) a agregar, Siendo 15.48 Cmol/kg la cantidad que se requiere de CaO para el tratamiento de Paraíso, y 16.53 Cmol/Kg para Macuspana, dichos valores se convierten a gramos, al final se multiplica por tres, porque se utilizaron tres kilos de suelos para las celdas que se trataron, como lo muestran los siguientes cálculos.

- Macuspana:

$$16.53 \text{ cmol/kg} \times \frac{1 \text{ mol}}{100 \text{ c.mol}} \times \frac{1 \text{ mol de Ca}^{++}}{2 \text{ mol}^{++}} \times \frac{56 \text{ g de CaO}}{1 \text{ mol de CaO}} = 4.62 \text{ g CaO / Kg de suelo} \times 3 \text{ KG de suelo} = 13.86 \text{ gr CaO.}$$

- Paraíso:

$$15.48 \text{ cmol/kg} \times \frac{1 \text{ mol}}{100 \text{ c.mol}} \times \frac{1 \text{ mol de Ca}^{++}}{2 \text{ mol}^{++}} \times \frac{56 \text{ g de CaO}}{1 \text{ mol de CaO}} = 4.33 \text{ g CaO / Kg de suelo} \times 3 \text{ KG de suelo} = 12.99 \text{ gr CaO.}$$

Se continuo con el cálculo de la cantidad de agua para preparar la solución de Ca(OH)_2 , con base a la referencia (Morales-Bautista *et al.*, 2011) donde se considera que para 164.03 g de suelos se utilizó siete litros de agua es por esto que para nuestro proyecto utilizaremos 725 ml para Paraíso y 782 ml para Macuspana.

5.8. Caracterización por intercambio catiónico con Ca(OH)_2 y evaluación fisicoquímica

La realización del intercambio se llevó a cabo mediante la preparación siguiente:

1. Se prepararon soluciones de los patrones (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+) a diferentes concentraciones (750, 500, 250, 125 y 75 ppm). Una vez realizadas las soluciones se llevaron al espectro (UV-vis) para conocer la absorbancia y resaltar el punto de absorción máxima, dicho dato se corrobora en la literatura Morales-Bautista *et al.*, (2011). Obteniendo así que Ca^{++} tiene una absorbancia de 422 nm, Mg 285 nm, K 299 nm y Na 589 nm. Realizándose la curva patrón de cada uno como lo muestra anexo A1.



2. Se preparó una solución de acetato de sodio a 0.1 M suficiente para realizar las disoluciones. Se continuo con el pesado de 5 gr de suelo testigo, contaminado, y tratados a 7 días, en el cual se preparó una pasta saturada, después fue sometida la pasta saturada a 3 de lavados de 10 ml cada uno con la solución de acetato de sodio, la cual nos permite arrastrar todos los iones que pueden estar disponibles, así mismo se pasó por papel filtro la solución e inmediatamente se guardaron en tubos porta muestras para ser llevadas al espectro, donde se tomaron medidas variando la absorbancia antes mencionada. Los parámetros medidos fueron realizados por triplicado.
3. Los datos obtenidos se llevaron a un documento de Excel, para poder calcular los promedios de cada valor y su desviación estándar. Y se realizó un análisis de la evolución de cationes ver anexo A2.
4. Posteriormente se realizó el cálculo de los iones en solución.

5.9. Caracterización física y química del suelo tratado

Después de haber tratado el suelo con el hidróxido de calcio se tomaron muestras para caracterizar el suelo tratado como lo marca la norma NOM-021-SEMARNAT-2000.



VI. Resultados y discusiones

6.1. Caracterización del agua congénita

En la tabla 11, se muestran los resultados del análisis realizado al agua congénita; estos se compararon con los límites máximos establecidos en la NOM-143-SEMARNAT- 2003, estos con respecto a descargas en costa afuera los cuales se encuentran por debajo de los límites normativos. No obstante, los resultados para los coliformes totales y el color no corresponden a lo esperado, ya que estos resultados se encuentran por encima del valor referenciado en la norma, al igual que la CE. Lo cual indica que estos valores pueden indicar la presencia de elementos que favorecen la salinidad de minerales o metales (Guerra, 2018).

Tabla 11. Parámetros agua congénita

Parámetro	Valores	SEMARNAT-2003	Parámetro	Valores	SEMARNAT-2003
Sólidos totales	95 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	32000 mg/L	HTP	14 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
CE	140.1 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$	0.01 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$	pH	6	5 – 10
Sólidos sedimentables	1 mg/L	2 ml/L	Coliformes totales	990 NMP	2 NMP
Sólidos suspendidos totales	4 mg/L	200 mg/L	Cloruros totales	40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
DQO	9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	700 mg/L	Color	550 $\text{UPt}\cdot\text{Co}^{-1}$	20 $\text{UPt}\cdot\text{Co}^{-1}$

HTP: Hidrocarburos totales del petróleo; DQO: Demanda Química de Oxígeno; CE: Conductividad eléctrica ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$); UPt/Co: Unidades en escala de color platino/cobalto; NMP: Número más probable.

6.2. Clasificación de los suelos testigos

6.2.1. Suelo arcillo – limoso proveniente de Macuspana

La clasificación de los suelos se obtuvo a través de la descripción geomorfológica que se realizó en el área de muestreo; en la tabla 12, se presenta un resumen de lo observado

en el sitio, el cual se detallan los parámetros geomorfológicos encontrados en el lugar, con el fin de mantener un análisis comparativo y así mismo para definir el tipo de suelo, con la ayuda de los parámetros físicos y químicos tales como lo son los color y textura de horizontes, color, textura, entre otras; según lo que establece las tablas referidas en la guía de muestreo de suelos en campo de Cuanalo con las adaptaciones del laboratorio.

Tabla 12. Descripción del perfil del suelo de Macuspana

Descripción del Sitio

Zona de lomeríos con pendiente media (aproximadamente 30 °), drenaje medianamente eficiente, se encontró flora como pasto estrella, limón, yuca, plátano Tabasco, nance y aguacate. También, se observó fauna (aves de corral) como pavos, pollos y patos, dentro del perfil algunas lombrices y hormigas en el horizonte 1. La profundidad del manto freático fue de 1.65 m. Las condiciones meteorológicas fueron nublado-soleado, el sitio se encontraba cercano a un cuerpo de agua conocido como la Laguna Morelos.

Ho.	Profundidad	Transición a la siguiente capa
1	0-33 cm	Tenue
2	33-90 cm	Media
3	90-165 cm	Alta

Ho. 1	Humedad media, color de la matriz 7.5 YR 5/2 pardo claro, con moteas rojizas 7.5YR 5/4, textura limo-arcilloso al tacto, sin presencia de material antropogénico, pero con agregados de carbono mineral, con grado de desarrollo medio cuya consistencia es amorfa. Raíces gruesas con abundancia media y delgadas abundantes.
Ho. 2	Humedad media-alta, color de la matriz 7.5 YR 5/4 rojizo-amarillo pálido, moteas color pardo rojizo 7.5YR 4/3, pocos agregados y pequeños, textura limo-arcilloso al tacto, sin presencia de material antropogénico, sin raíces ni rocas.
Ho. 3	Humedad alta, color de la matriz 7.5Y 5/5 amarillo/naranja, 75YR 5/6 amarillas, sin agregados, textura limo-arenosa al tacto, sin presencia de material antropogénico, sin raíces, no rocas.

Por otro lado, se obtuvieron resultados de los parámetros físico y químicos del suelo con el fin de ser compararlos con la literatura y determinar su clasificación edafológica (tabla



13). Ya que se conoce la cartografía de los suelos de Tabasco, pero como ya sabemos los suelos pueden cambiar su composición por varios factores (compactación, aireación, cambios físicos, etc). La clasificación de suelos tiene como finalidad su ordenamiento según las características principales, de tal manera que el nombre proporciona información sintetizada con base en conceptos previamente acordados y entendibles entre el grupo de personas que la conoce y maneja. La clasificación es necesaria para la propagación de técnicas con éxito en los ámbitos agrícola, pecuario, forestal, urbano, ambiental y de salud (Bautista *et al.*, 2009).

Tabla 13. Caracterización fisicoquímica del suelo testigo de Macuspana

H	%MO	CIC Cmol/kg	pH	CE	DA	DR	%Po	CC	Texturas		
									%A	%R	%L
1	7.37	0.13	7.0	0.23	1.11	2.08	46.6	27.2	80	7	13
Areno francosa											
2	4.22	0.98	5.5	0.13	1.1	1.57	29.9	36.4	78	7	15
Areno francosa											
3	3.8	0.68	5.4	0.07	0.88	1.21	26.7	42.7	84	7	9
Areno francosa											

Donde H: horizontes, %MO: porcentaje de materia orgánica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, pH: potencial de hidrogeno, CE: conductividad eléctrica, DA: densidad aparente, DR: densidad real, %Po: porcentaje de porosidad, CC: capacidad de campo, %A: porcentaje de arena, %R: porcentaje de arcilla, %L: porcentaje de limo.

El suelo muestreado en el municipio de Macuspana corresponde en similitud de colores a los suelos Luvisoles, sin embargo, se requirió de una indagación profunda para determinar qué tipo de Luvisol corresponde. Lo descrito por Palma-López *et al.*, (2007) nos orienta a reincidir que se trata de un Luvisol gleicos, ya que en los parámetros de la NOM-021-SEMARNAT-2000 realizados al perfil del suelo de Macuspana, se observa que el primer horizonte cuenta con abundante %MO considerando que es el horizonte donde se encuentra la mayor cantidad de esta materia, así mismo este suelo tiene una CIC baja, lo cual puede indicar que este tipo de suelos tienen las características de suelos arcillosos por su poca capacidad de intercambio, siendo suelos ligeramente básicos con un pH de 7, con una conductividad dentro lo normada.



En el estado de Tabasco estos son los suelos rojizos característicos de los lomeríos del Cuaternario Pleistoceno y Terciario, así como de la sabana de Balancán, normalmente tienen un pH que varía de ligera a moderadamente ácido y tienen un horizonte B enriquecido por arcilla aluvial; en la tabla 13 se muestran los resultados característicos del suelo de Macuspana siendo que estos coinciden con la descripción que se realiza en el libro suelos de tabasco, orientándonos así para concretar que este suelo es un Luvisol Gleyico (Palma–López *et al.* 2007).

Por su naturaleza ambiental los luvisoles se encuentran en zona de lomeríos, cuanta con una textura arcillosa, su permeabilidad es lenta debido a las condiciones de capacidad de campo, ya que tiende a retener la mayor cantidad de agua para poder proporcionar a las plantas la humedad requerida (Patiño, 2014).

6.2.2. Suelo arenoso proveniente de Paraíso

De igual manera se realizó una descripción del perfil edafológico del suelo de Paraíso para poder clasificar el suelo muestreado (Tabla 14).

Tabla 14. Descripción del perfil del suelo de Paraíso

		Descripción del Sitio		
		El sitio presentaba no presentaba pendiente, buen drenaje con arena como material parental, se encontró flora nativa como pasto camalote, guarumo, palma de coco y papaya. Se observó fauna como pericos, zanates e insectos como hormigas, libélulas, mariposas y arañas, las condiciones meteorológicas fueron parcialmente nublado. En el perfil se identificaron tres horizontes y se encontró el manto freático a una profundidad de 1.61 m		
		Horizonte	Profundidad	Transición a la siguiente capa
		1	0-58 cm	Tenue
		2	58-120 cm	Tenue
		3	120-161 cm	Tenue
Ho. 1	Humedad media, color de la matriz 7.5 YR 6/3 pardo grisáceo claro, sin moteas, textura arenosa al tacto, sin presencia de material antropogénico, sin rocas ni agregados y con grado de desarrollo bajo. Raíces gruesas con abundancia media y delgadas abundantes			
Ho. 2	Humedad media, color de la matriz 7.5 YR 6/2 pardo-grisáceo claro con moteas naranjas 7.5 YR 6/6, textura arenosa al tacto, sin presencia de material antropogénico, sin rocas ni agregados y con grado de desarrollo bajo. Raíces gruesas abundantes media y delgadas medias.			
Ho. 3	Humedad alta, color de la matriz 7.5 YR 5/1 pardo-grisáceo oscuro con moteas naranjas 7.5 YR 6/6, textura arenosa al tacto, sin presencia de material antropogénico, sin rocas ni agregados y con grado de desarrollo bajo. Raíces gruesas abundantes media.			

Posteriormente, se realizó la caracterización física y química que nos ayudó a establecer criterios en la designación del tipo de suelo, aún es muy evidente el tipo de suelo por la cantidad de arenas marcadas en la textura (Tabla 15). Este suelo está clasificado dentro de los arenosoles por sus características de contener poca materia orgánica, cuenta con



una CIC media, pH ligeramente básicos, así como un CE ligeramente cercaba a la normativa debido a la zona cercana al mar, alta porosidad, poca retención de agua y en su textura predominan las arenas, es importante mencionar que este tipo de suelo tiene mucha similitud entre sus horizontes a diferencia de otros suelos.

Tabla 15. Caracterización físico química del suelo testigo de Paraíso

H	%MO	CIC Cmol/kg	pH	CE	DA	DR	%Po	CC	Texturas		
									%A	%R	%L
1	0.72	0.038	7.6	.38	1.35	1.94	46.63	19.01	96.7	3.24	0
									Arenosa		
2	0.66	0.038	7.8	.52	1.37	1.88	29.93	20.13	97.1	2.88	0
									Arenosa		
3	0.31	0.038	7.8	.54	1.18	2.07	26.77	14.91	96.7	3.24	0
									Arenosa		

Donde H: horizontes, %MO: porcentaje de materia orgánica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, pH: potencial de hidrogeno, CE: conductividad eléctrica, DA: densidad aparente, DR: densidad real, %Po: porcentaje de porosidad, CC: capacidad de campo, %A: porcentaje de arena, %R: porcentaje de arcilla, %L: porcentaje de limo.

Los Arenosoles se desarrollan sobre materiales no consolidados de textura arenosa que, localmente, pueden ser calcáreos. En pequeñas áreas puede aparecer sobre areniscas o rocas silíceas muy alteradas y arenizadas por degradación o arrastre. Estos Arenosoles son los que tienen propiedades Gleicas entre 50 y 100 cm desde la superficie del suelo. Se pueden localizar en las partes cercanas a los Gleysoles e Histosoles con vegetación de mangle. El uso más extendido es la asociación coco con pastos. En las zonas más cercanas a las costas se utiliza con nopal y uva de playa, sin embargo, en la época de humedad residual es común que se use con maíz y hortalizas de ciclo corto (Palma-López *et al.*, 2007).



6.3. Caracterización física y química, homogenizada de los suelos Testigo, Contaminado, y Tratado.

6.3.1. Suelo arcillo limoso (Macuspana)

Otros de los resultados obtenidos fue la caracterización de los suelos homogenizados, para los testigos, contaminados y tratados los cuales fueron realizados para evitar variaciones al comparar los suelos posteriormente, debido a que la evaluación por horizontes representa variación entre cada uno, por los lixiviados que se presentaron entre ellos.

De acuerdo a la evaluación que se realizó los parámetros se estarán comparando con lo estipulado en la norma NOM-021-SEMARNAT 2000. En la tabla 16 se muestran los cambios significativos que se obtuvieron en la caracterización del suelo de Macuspana, como valores referentes tenemos los testigos que por sí solos nos indican que se encuentran en condiciones normadas de acuerdo al parámetro indicados, para el caso de CE (4 dS·m), sin embargo cabe mencionar que aun que la norma no establece como parámetros a vigilar el % MO, CIC, pH, DA, DR, % Po, CC y Textura, se estarán considerando debido al impacto de relación entre cada uno.

Tabla 16. Caracterización física y química del suelo testigo, contaminado y tratado de Macuspana

Suelo	% MO	CIC	pH	CE	DA	DR	% Po	CC	Texturas		
									% A	% R	% L
T	2.13	18.44	6.4	0.5	1.22	2.49	51.00	30.14	35 ±	40 ±	25 ±
	± 0.02	± 0.08	± 0.02	± 0.1	± 0.04	± 0.06	± 0.5	± 0.41	0.01	0.02	0.01
C	1.11	15.56	6.6	7.4	1.11	2.31	51.94	34.60	49 ±	3 ±	48 ±
	± 0.02	± 0.02	± 0.01	± 0.3	± 0.01	± 0.04	± 0.5	± 0.6	± 0.01	0.01	0.01
Tr	0.99	9.94	7.7	1.1	1.12	2.42	53.71	22.20	26 ±	11 ±	43 ±
	± 0.02	± 0.02	± 0.02	± 0.0	± 0.04	± 0.1	± 0.1	± 0.39	0.01	0.01	0.02

Donde T: testigo, C: contaminado, Tr: tratado.



Como observamos en la figura 8, la materia orgánica está presente en el testigo en una concentración media con respecto a lo normado, y al ser contaminado disminuye un 47% cuando es afectada por el contaminante, durante el tratamiento sigue disminuyendo un 10 %, conservándose en materia orgánica baja de acuerdo a lo que marca la norma. Podemos decir que este parámetro se afectó, pues la materia orgánica juega un papel muy importante en el suelo ya que contribuye a que las partículas minerales individuales formen agregados estables, mejorando así la estructura del suelo y facilitando su laboreo. Sin embargo, sabemos que el suelo es un recurso no renovable por lo que muy difícilmente lo regresar a su estado inicial; pero cabe la posibilidad de aumentar la materia orgánica mediante algunas técnicas como incorporación de material de volumen, abonos, entre otros (Sánchez, 2018).

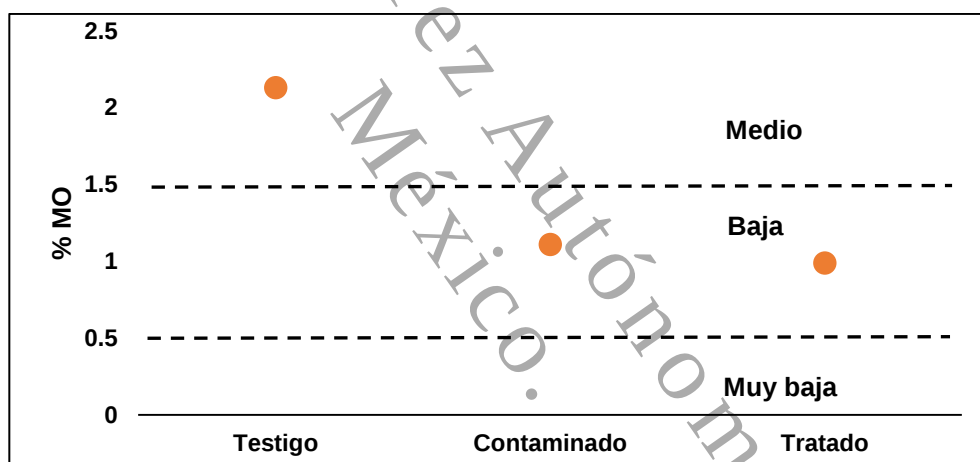


Figura 8. Materia Orgánica (% Peso).

Donde T: testigo, C: contaminado, TR: tratado.

De igual forma sucede con la CIC (Figura 9), esto se debe muy probablemente que tanto el contaminante como el tratamiento se llevan todos los iones intercambiables presentes, en lo que observamos una disminución en contaminado de aproximadamente 16 % y, al ser aplicado el tratamiento, se reduce aún más del 20 % (Carrasco *et al.*, 2009).

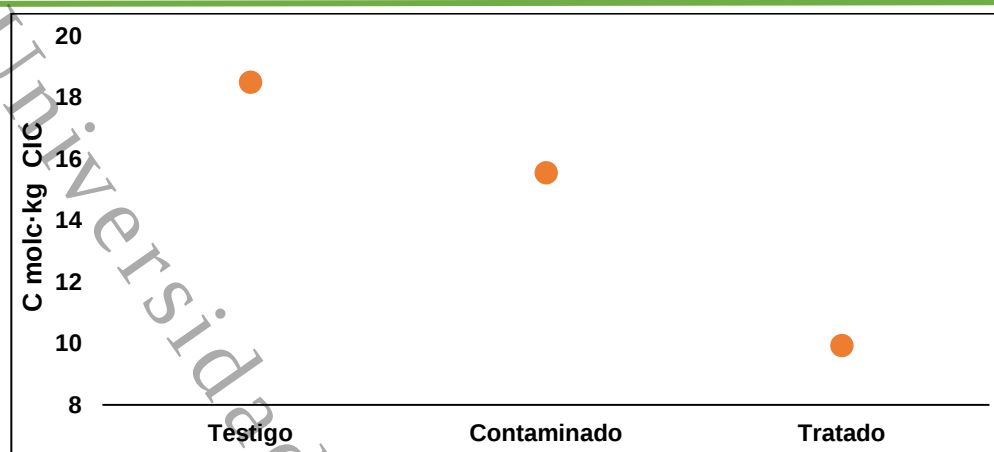


Figura 9. Capacidad de Intercambio Catiónico.

El pH se mantiene ligeramente por encima del testigo, pasando de un suelo ácido a ser básico. Y es muy esperado este resultado debido a la presencia de carbonatos de calcio en el tratamiento, lo cual pudiera ser un impedimento para la fijación del Fósforo para la planta; pero se considera que por sus valores cercanos al neutro no cause un efecto directo, pues se debe considerar una planta que mediante el ajuste osmótico pueda sobrevivir en un suelo básico (Gómez, 2008).

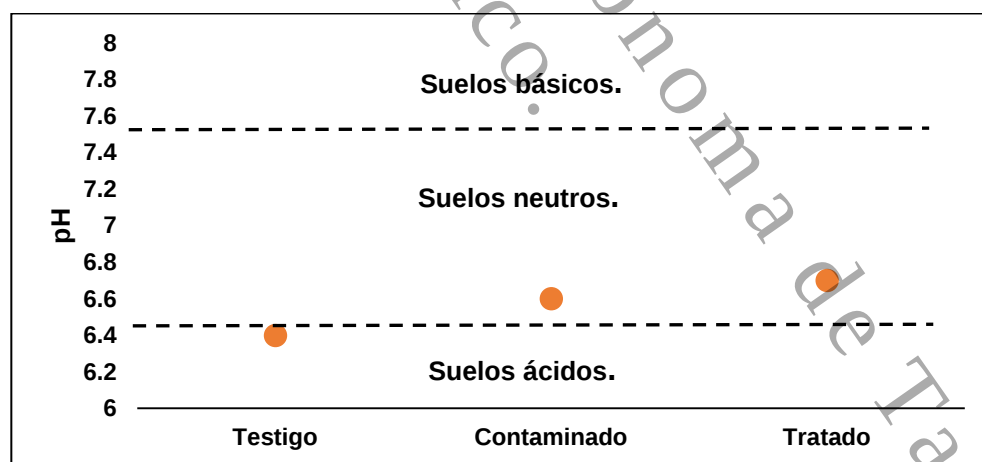


Figura 10. Variación del pH.

Sin embargo, para la conductividad eléctrica refleja un valor menor al que marca la norma para el testigo y al ser contaminado elévalo su valor hasta 7 veces más, pasando a un suelo salino con ese valor, pero al emplear el tratamiento podemos observar que se



recupera favorablemente reduciéndose un 85 % respecto del contaminado (Figura 11); sin embargo, el tratamiento no recupera las condiciones iniciales, pero se mantuvo por debajo de 4 dS·m como lo establece la norma. Ya que uno de los factores importantes para el desarrollo de las plantas son los factores bióticos y abióticos, así como los parámetros físicos y químicos, dentro de estos últimos la CE que determina la calidad y fertilidad de un suelo por que establece su contenido de sales presentes. Debido a que estas sales reducen el potencial osmótico de la solución del suelo, haciendo que reduzca la disponibilidad de agua para las plantas, aun cuando los suelos pudieran mantenerse húmedo, debido a que las sales obstruyen los poros presentes y evitan así la trayectoria del agua presente (Simón *et al.*, 2013).

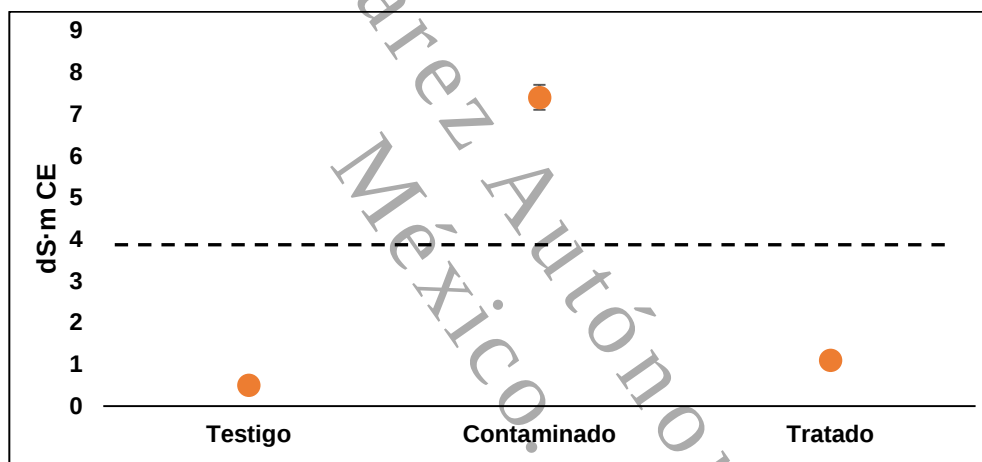


Figura 11. Tendencia de Conductividad Eléctrica.

En la figura 12, se muestra la relación del comportamiento de las densidades, como lo es la densidad aparente del suelo la cual es un indicador de importantes características del suelo, tales como lo es la porosidad, grado de aireación y capacidad de drenaje. Los suelos con valores bajos de densidad aparente implican suelos porosos, bien aireados y con buen drenaje. Por otro lado, si los valores son altos, quiere decir que el suelo es compacto o poco poroso, que tiene poca porosidad en su composición, que la infiltración del agua es lenta, lo cual puede provocar anegamientos. Siendo este un comportamiento muy característico para el suelo de Macuspana de acuerdo a los valores resultantes (Noguera *et al.*, 2011).



Por otro lado, el contenido de los distintos contribuyentes de los suelos es el que determina las variaciones de su densidad real, por lo que la determinación de este parámetro permite la estimación de la composición mineralógica. Si la densidad real es muy inferior a 2.65 g/cm^3 , podemos pensar que el suelo posee un alto contenido de yeso o de materia orgánica, sien el caso para el suelo de Macuspana en los tres puntos pues la disminución al ser contaminado no se muestra severamente afectado, por otro si es significativamente superior a $2.64 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$ podemos inferir que posee un elevado contenido de óxidos de hierro minerales, ferro magnésico.

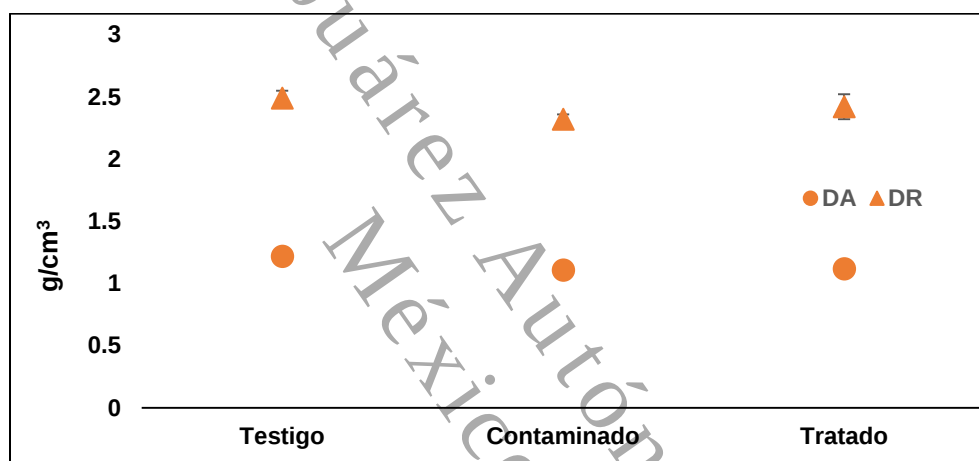


Figura 12. Comparación de la tendencia de DA y DR.

Para el parámetro estimados de porcentaje de porosidad y porcentaje de capacidad de campo, que como se mencionó anteriormente la primera es dependiente de DR y DA, porque podemos observar que al no presentar mayor incremento estas últimas el porcentaje de porosidad se mantiene, a diferencia del % de CC que al ser contaminado aumenta un 13 % su capacidad, pero al aplicar el tratamiento disminuye un 35% esto se puede deberse al cambio de textura que presenta el suelo (Figura 13) (Catalán, 2011).

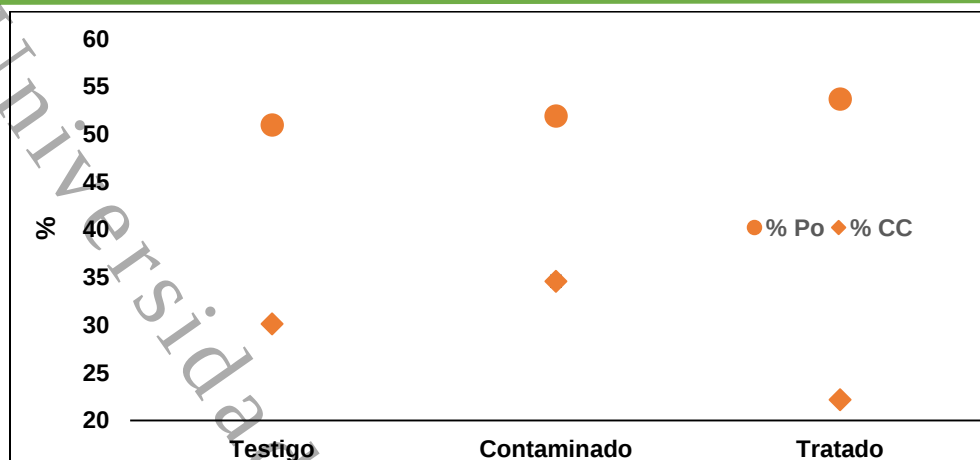


Figura 13. Comparación de la tendencia de % de Po y % de CC.

La textura calculada del suelo se muestra en la figura 14, donde se observa cómo se afecta la estructura del suelo con base en la aplicación del contaminante teniendo un testigo en la clasificación de los arenosos y al ser contaminado para al franco arenoso y al ser tratado se recupera hasta los francos limosos (Quintero *et al.*, 2012).

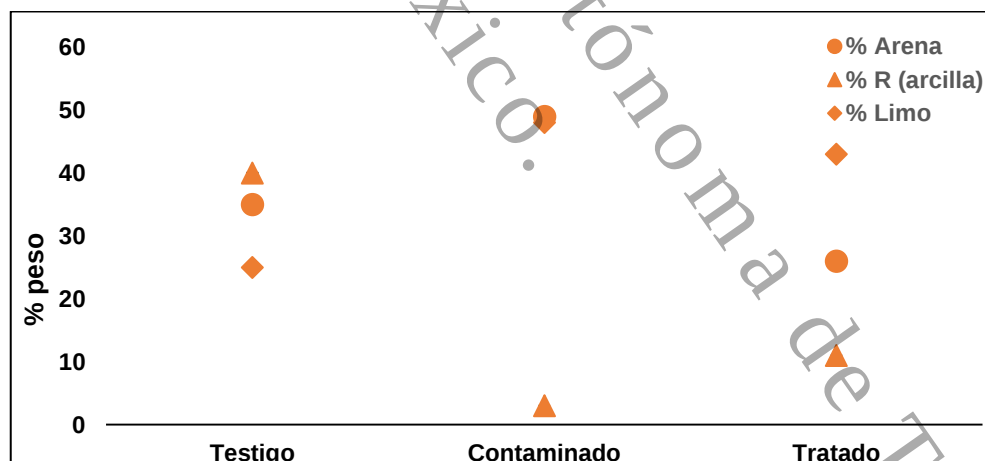


Figura 14. Determinación de Textura



6.3.2. Suelo arenoso (Paraíso)

Se realizó la caracterización del suelo de arenoso, el cual consistió en analizar física y químicamente, a partir de lo mencionado en la NOM-021-SEMARNAT 2000 (Tabla 17). En donde observamos la comparación de los suelos testigos, contaminados y tratados.

Tabla 17. Caracterización física y química del suelo testigo, contaminado y tratado (arenoso)

Suelo	% MO	CIC	pH	CE	DA	DR	%Po	CC	Texturas		
									%A	%R	%L
T	0.56 ± 0.04	18.5 ± 0.05	6.8 ± 0.09	3.91 ± 0.02	1.50 ± 0.04	2.16 ± 0.02	30.55 ± 1.38	7.78 ± 1.28	83 ± 0.01	11 ± 0.02	6 ± 0.01
C	0.30 ± 0.02	0.39 ± 0.05	8 ± 0.09	7.33 ± 0.11	1.40 ± 0.05	2.00 ± 0.03	30.00 ± 2	16.30 ± 0.99	95 ± 0.01	0 ± 0.00	5 ± 0.01
Tr	0.24 ± 0.03	9.9 ± 0.09	6.6 ± 0.08	0.55 ± 0.05	1.41 ± 0.04	2.46 ± 0.03	42.68 ± 1.17	10.71 ± 1.05	99 ± 0.01	0 ± 0.00	1 ± 0.00

Donde T: testigo, C: contaminado: Tr: tratado.

El porcentaje de materia orgánica en el suelo testigo de paraíso es baja de acuerdo a la normativa sin embargo al contaminar disminuye un 47 % alojándose en un valor muy bajo, lo cual al aplicar el tratamiento no se pudo recuperar y se mantiene en muy bajo. Siendo así que al comparar los valores entre el contaminado y tratado se encontró que no hay diferencia significativa ($P > 0.05$), y estos valores tienen diferencia del testigo ($P > 0.05$). Sin embargo, observamos que la naturaleza de este suelo es materia orgánica poca, lo cual no provoca una alteración mayor en el suelo y en determinado caso se podría agregar material de volumen para recuperar el porcentaje de materia orgánica (Murray *et al.*, 2014).

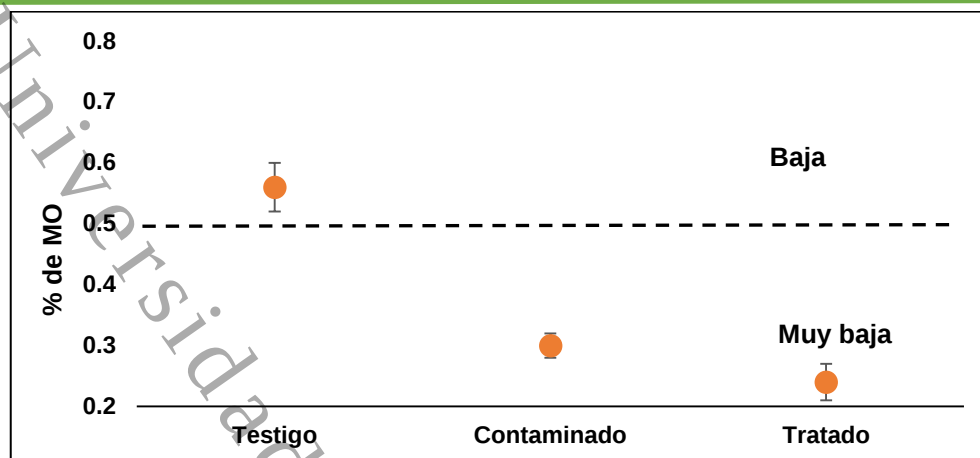


Figura 15. % de Materia orgánica.

La figura 16 muestra la CIC muy afectada al aplicar el tratamiento con una disminución del 98% aproximadamente, al aplicar el tratamiento se recupera en un $\approx 46\%$, sin embargo, no se logra recuperar el estado inicial, El nivel de CIC indica la habilidad que presenta el suelo para retener cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes a la planta, entre otras. Un suelo con bajo CIC indica baja habilidad de retener nutrientes, arenoso o pobre en materia orgánica, como lo presenta el suelo de Paraíso. (García *et al.*, 2014)

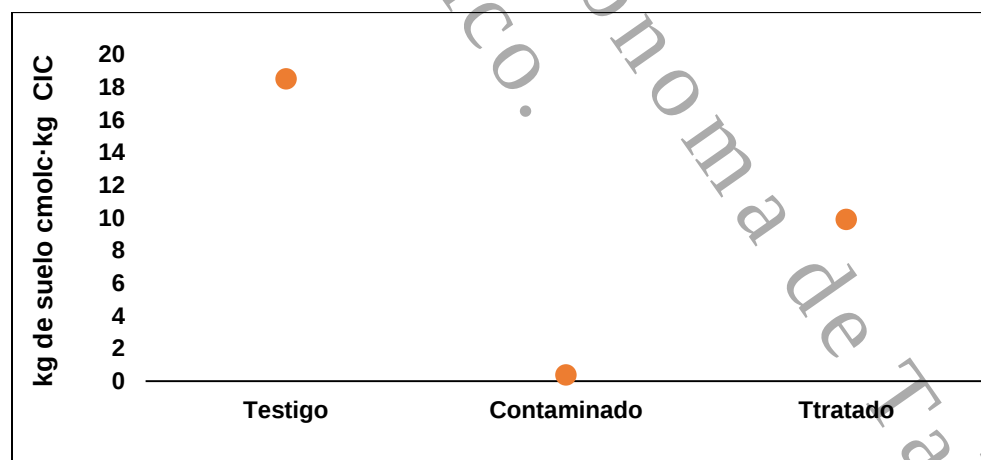


Figura 16. Capacidad de intercambio catiónico.

El pH en la figura 17 indica que de un suelo neutro pasa a ser, ligeramente ácido y al aplicar el tratamiento pasa a suelo ligeramente básico ya que por lo general hay carbonato de cálcico en el suelo, siendo parte de lo esperado por la aplicación del



tratamiento, sin embargo de acuerdo al ajuste osmótico de la planta pudiera no perjudicar el crecimiento (Flores, 2012).

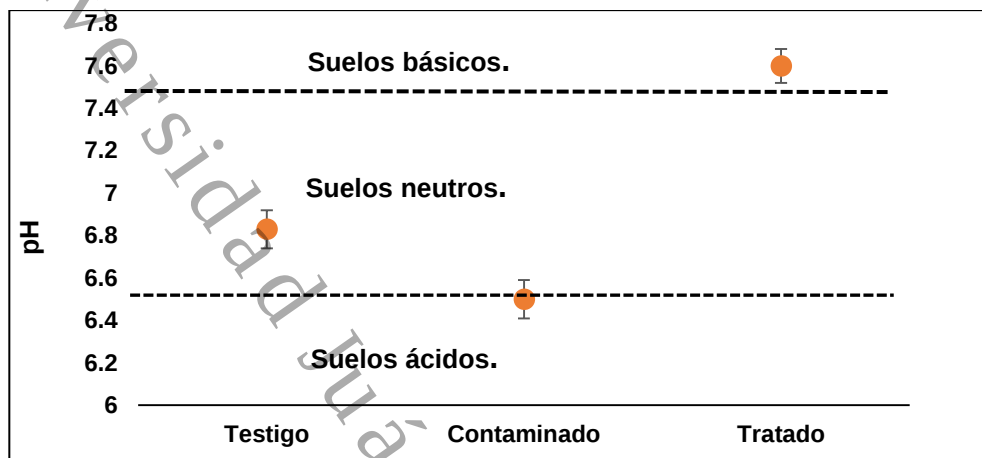


Figura 17. Variación del pH.

La conductividad eléctrica un factor de importancia para la evolución de la fertilidad en los suelos; la cual en el suelo de paraíso se observa que inicialmente cuenta con un valor muy cercano al normativo y al ser expuesto al contaminante aumenta a niveles de salinidad, pero favoreciéndole el tratamiento se observa la disminución de este aún por debajo de la inicial (Figura 16) (Morales, 2008).

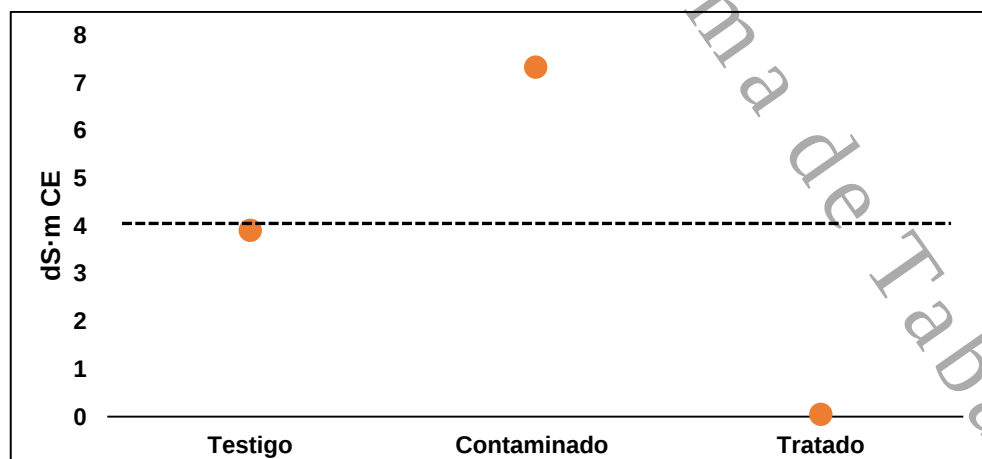


Figura 18. Tendencia de la CE



Los factores que afectan a la densidad aparente son la composición y la estructura. Por mencionar algunos, suelos arenosos tienden a tener densidades mayores que suelos más finos, al mismo tiempo en suelos bien estructurados los valores son menores (Coleman *et al*, 2017). Como lo es el caso del suelo de paraíso ver figura 17.

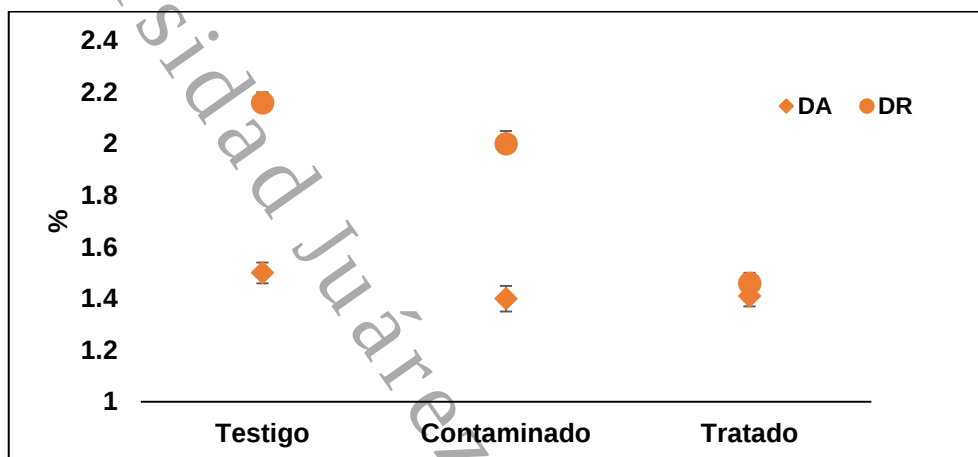


Figura 19. Tendencia del porcentaje de DA y DR

El % Po es favorecida en un 39% con respecto al testigo, la capacidad de campo por el mismo caso no sufre alteración, La CC y Po son factores que limitan y definen la necesidad de agua de un cultivo para su óptimo desarrollo (FAO, 2019) (Figura 20).

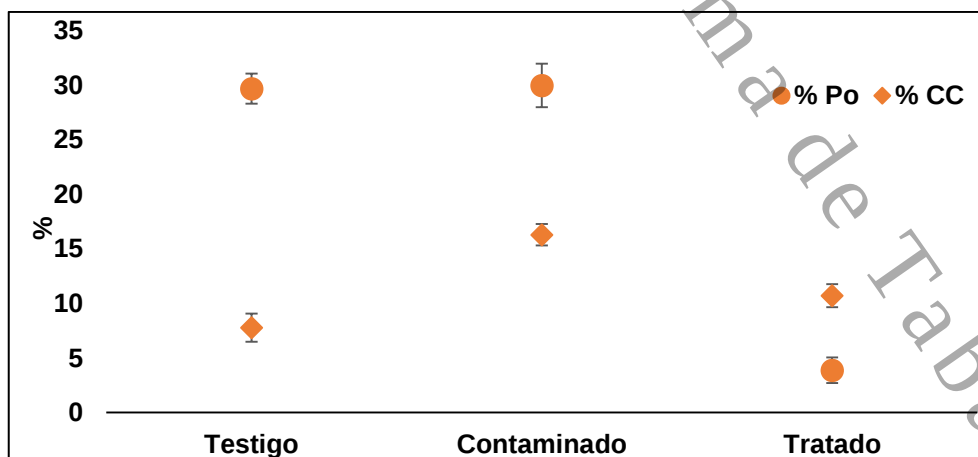


Figura 20. Tendencia del porcentaje de Po y CC



La textura es una propiedad importante ya que influye como factor de fertilidad y en la habilidad de retener agua, aireación, drenaje, contenido de materia orgánica y otras propiedades. En la figura 21, se observa que en el testigo se encuentra dentro de las Arenos francosa y al ser contaminada cambia ligeramente a Arenosa y se mantiene en el tratado, por lo cual su textura no es afectada en este proceso (FAO, 2019).

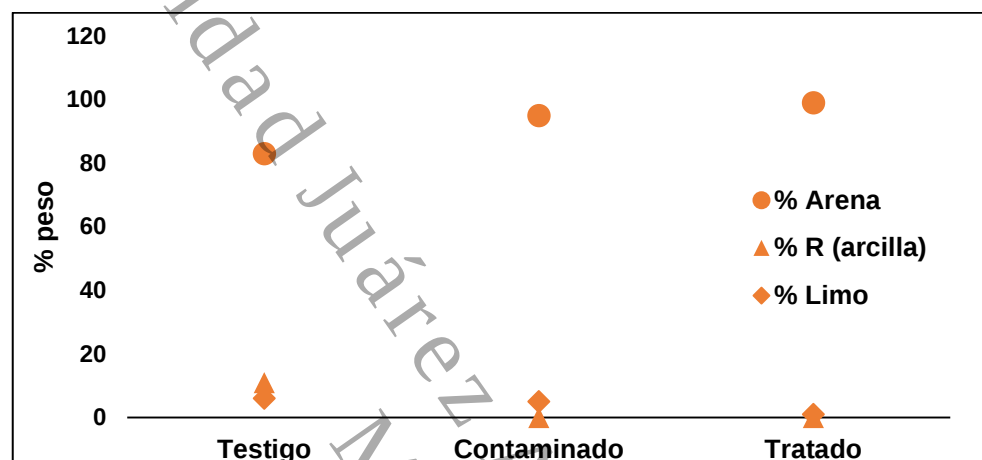


Figura 21. Tendencia de porcentaje de Textura

6.4. Modelos de regresión para la remoción del contaminante en los suelos

De acuerdo a los parámetros establecidos por la NOM-021-SEMARNAT-2000, el PSI y la CE, fueron los parámetros a vigilar durante este proyecto (Tabla 18). Donde se buscó dejar los suelos lo más cercano a sus testigos.

Tabla 18. Clasificación de suelos salinos y sódicos (NOM-021-SEMARNAT-2000)

	Suelos normados	Suelos salinos	Suelos sódicos	Suelos sódicos-salinos
Clasificación	CE < 4 dS·m PSI < 15 %	CE > 4 dS·m	PSI > 15 %	CE > 4 dS·m PSI > 15 %

Como observamos en la figura 22, los suelos se comportan de manera muy diferentes ante la lectura de conductividad eléctrica y en gran razón es por el tipo de suelo, ya que el suelo de Macuspana es texturalmente arcillosos, mientras que el de Paraíso es

arenoso, La CE presenta variación debido al mayor contenido de humedad, ya que Los suelos con mayor porosidad o menor densidad aparente, tendrán mayor capacidad de almacenamiento de agua, pudiendo alcanzar valores más altos de conductividad eléctrica, así como la textura fina, ya que al tener mayor capacidad de almacenamiento de agua y mayor capacidad de intercambio catiónico, las arcillas poseen mayores valores de conductividad (Martínez, 2001)

La CE se aumenta drásticamente al ser contaminado y se coloca en un suelo salino, rebasando el parámetro normado para los dos suelos, sin embargo, al aplicar el tratamiento se observa (Figura 22) una disminución paulatinamente y al transcurrir el día 5 se observan cambio por debajo de la norma, alcanzando así una reducción de 37 %, cumpliendo así con el rango normado en el caso de Macuspana. Sin embargo, en el suelo de Paraíso alcanza una disminución de 87 % aproximadamente con respecto del contaminado, reduciendo aún más de lo que se tenía inicialmente en el testigo. Lo que indica que el tratamiento resulta ser eficaz para bajar los niveles de CE en ambos suelos.

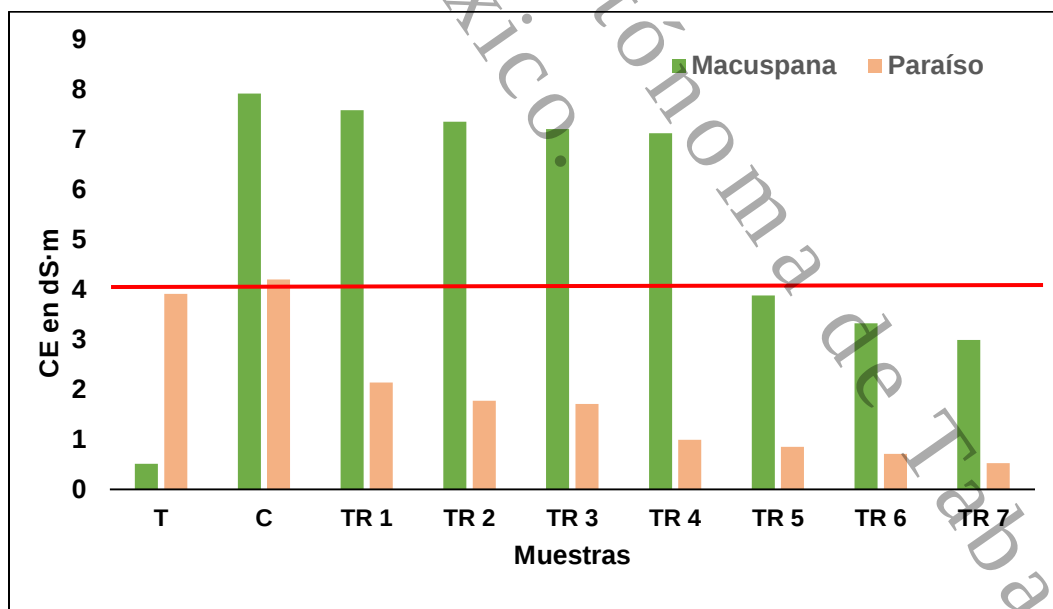


Figura 22. Comportamiento de la CE en las muestras testigo, contaminadas y tratadas a 7 (Macuspana vs Paraíso)



Para evaluar los cambios en la remoción de la CE, se contrastó este parámetro con el tiempo y se hizo una regresión lineal para encontrar la ecuación que nos determine el tiempo que se requiere para restaurar el suelo.

Se realizó el modelado de reacción considerando la CE contra los días de tratamiento encontrando una tendencia exponencial para Macuspana y Paraíso. La muestra inicial contaminada se tomó en cuenta como el promedio para el tratamiento dicha relación se muestra en la figura 23.

La ecuación cinética es:

$$\text{a) } \frac{CE_f}{CE_i} = 1.0459 e^{-0.149x} \quad \text{Macuspana}$$

$$\text{b) } \frac{CE_f}{CE_i} = 0.7864 e^{-0.271x} \quad \text{Paraíso}$$

Siendo la CE del suelo final (CE_f) de 4 dS·m como rango establecido y para obtener el tiempo al cual la CE del suelo inicial (CE_i) por debajo del límite de 30 dS·m establecido por la norma (Morales-Bautista *et al.*, 2016).

Al realizar los cálculos el suelo de Macuspana perteneciente a los suelos de lomerío requiere de 11 días aproximadamente de tratamiento. Al comparar los resultados obtenidos, observamos que el tratamiento por intercambio catiónico con Ca(OH)_2 cumplió con los límites normativos dejando el suelo con fines de vocación de uso, pues debemos considerar que, si bien este parámetro se redujo, aún se encuentra por encima de sus condiciones iniciales por lo que requerirá un plan de siembra, donde se indiquen plantas que puedan crecer bajo esa CE (Morales-Bautista *et al.*, 2016).

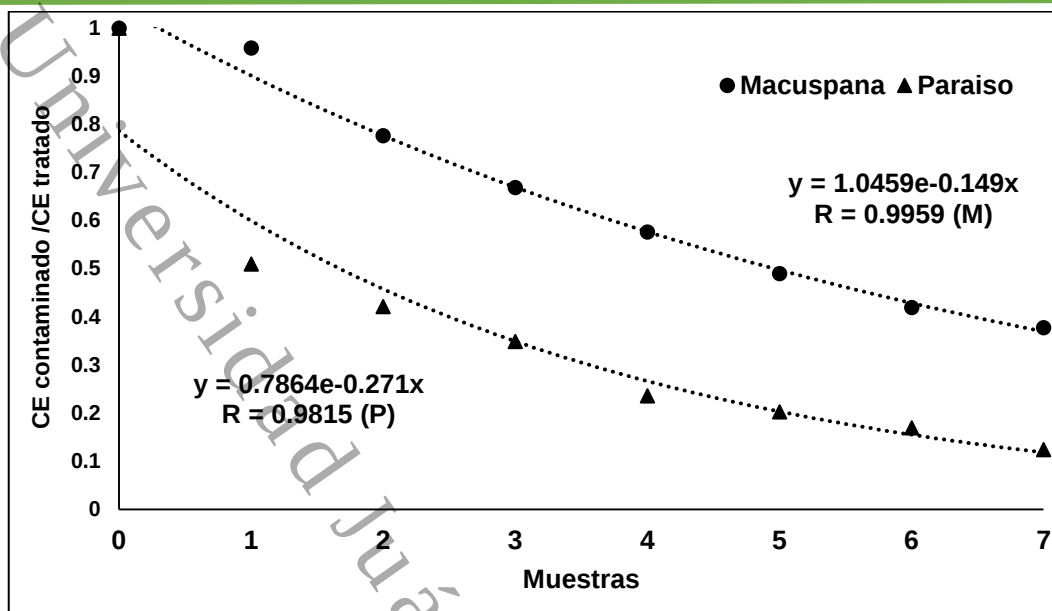


Figura 23. Evaluación de la CE en Macuspana y Paraíso.

El suelo de Paraíso perteneciente de una zona costera el cual se clasificó como arenoso requiere de 7 días aproximadamente de tratamiento. En dicho suelo el tratamiento con Ca(OH)_2 cumplió satisfactoriamente con los límites normativos referentes a la CE. Cabe mencionar que la CE después del tratamiento quedó por debajo de un 86 % aproximadamente, consideración que se debe tomar en cuenta para la vocación de uso del mismo.

Por otro lado, de los cationes intercambiables y en solución se realizó la determinación del K_G , RSI, RAS, y PSI (ver anexos C). Se calculó y se comparó el PSI de las muestras testigos, contaminadas y tratadas cuyos resultados se muestran en la figura 24.

Si bien mencionan algunas investigaciones las plantas absorben sus nutrientes de las soluciones acuosas del suelo, en donde existe una variedad en el equilibrio entre la concentración de iones y los que son retenidos por la fase sólida o matriz del suelo. Tal equilibrio es bastante complejo, dependiendo de variables como la naturaleza del ión, la de la partícula que lo absorbe y el pH, entre.

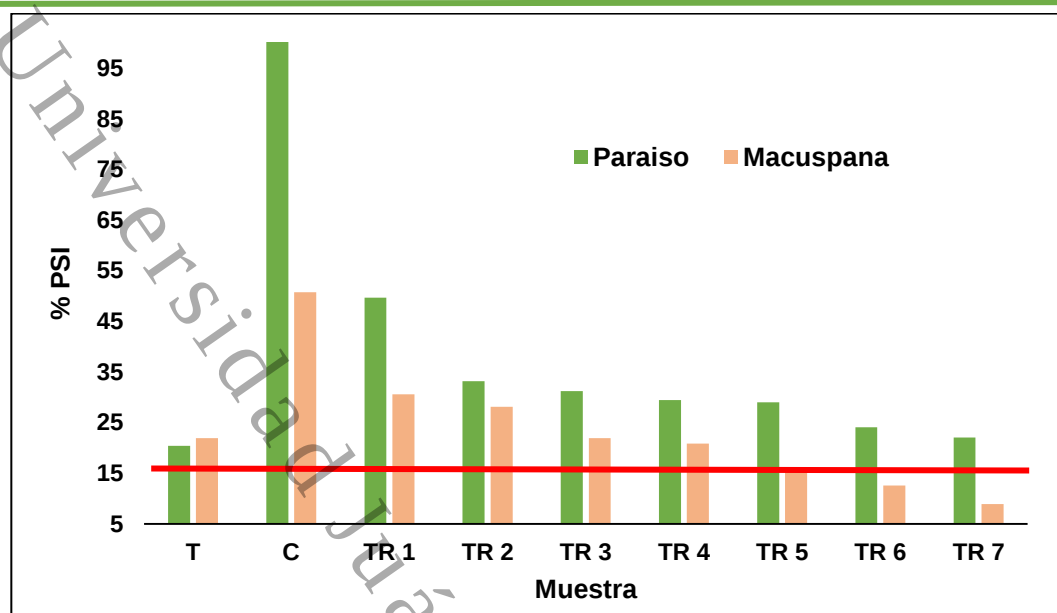


Figura 24. Comportamiento de la PSI en las muestras testigo, contaminadas y tratadas a 7 días (Macuspana vs Paraíso)

Para el suelo de Macuspana, al ser contaminado la muestra del PSI aumenta un 130% respecto al testigo, esto debido al alto contenido de sodio en el agua congénita, al ser tratado disminuye un 60 % en el primer día de tratamiento, siendo favorable la remoción hasta el día 7 en un 82 % aproximadamente respecto al contaminado, este parámetro se encuentra por debajo de lo normado e incluso supero el valor del testigo que también se encontraba por encima de la norma.

En el suelo de Paraíso, se tiene un PSI en el testigo por encima de lo normado y al ser contaminado aumente 5 veces el valor inicial, pero el tratamiento favorece el intercambio de los cationes de sodio principalmente ya que se reduce 78% aproximadamente sin embargo el valor obtenido en el día 7 no alcanza a fijarse por debajo de lo normado; ya que de acuerdo a su cinética este suelo requerirá más tiempo de tratamiento.

En la figura 25 se muestra la ecuación propuesta para interpretar los modelos de reacción del suelo en valores de PSI para ambos suelos:

$$c) \frac{\text{PSI}_f}{\text{PSI}_i} = 0.951e^{-0.233x} \quad \text{Macuspana.}$$



$$d) \frac{\text{PSI}_f}{\text{PSI}_i} = -0.032 \ln(x) + 0.3502 \quad \text{Paraíso.}$$

Siendo esta una ecuación de tipo exponencial para el suelo de Macuspana y logarítmica para Paraíso, las cuales se calcularon partiendo de un PSI inicial del 15 % respecto a la norma y su PSI final de 50 % valor base según lo descrito por Morales-Bautista (2016).

Los resultados del análisis de la remoción de PSI para ambos suelos establecen que se comportan de manera diferente, motivo por el cual se puede se calculó en diferentes ecuaciones, donde se relaciona el PSI con el tiempo de tratamiento. Recordando que la ecuación C está dada para suelos de lomerío y la ecuación D para suelos Arenosos, provenientes de zonas cercanas a la costera. De acuerdo al análisis de la ecuación C se necesitará 4 días para remover la mayor cantidad de cationes de sodio. La figura 25 muestra valores normalizados, los cuales marcan una descendencia del PSI.

La figura 25, muestra descendencia del PSI, sin embargo, de acuerdo a la ecuación cinética calculada este suelo requerirá de 9 días de tratamientos, para recuperar su vocación de uso según lo establece la norma. Es importante resaltar que en este suelo el valor de PSI normativo no se cumplió, por lo que se confirma que para este tipo de arenosol requiera más tiempo de tratamiento. Estos suelos altos en PSI, se clasifican de acuerdo a la normativa como sódicos, los cuales contienen baja CE, pero alto PSI (mayor a 15%).

Los suelos sódicos contienen alta cantidad de sodio intercambiable y bajo nivel de sales solubles, lo cual tiene un efecto adverso sobre el crecimiento de plantas y estructura del suelo, su resultado se traduce en reducción en los rendimientos de cultivos. Ya que son susceptibles a erosión, esto genera pérdida de suelo y nutrientes. formándose lixiviados que muchas veces contiene nutrientes y pesticidas que son adsorbidos por las partículas de arcilla que, al no ser absorbidos adecuadamente, pueden llegar a fuentes de agua potable contaminándolas (daño ecosistema local) (Lamz Piedra *et al.*, 2013)

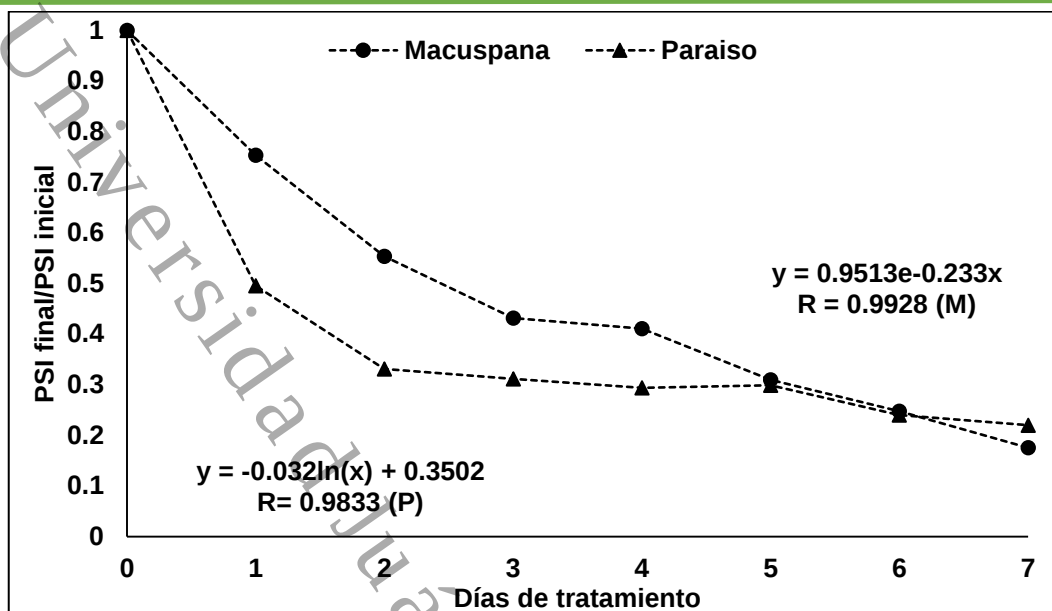


Figura 25. Evaluación de la PSI en Macuspana y Paraíso.

Sin embargo, existen varias opciones para aprovechar y optimizar el rendimiento en suelos sódicos como lo podrían ser; el cambiar el tipo de cultivo, es decir cultivar, organismos más tolerantes a la utilización de las enmiendas del suelo, el mejoramiento de la estructura de los suelos sódicos: con sustituir el sodio intercambiable por iones de calcio (ampliar el lapso de tratamiento) así como el enfoque convencional de incorporar enmiendas de suelo eficaces, que directa o indirectamente faciliten la sustitución del sodio intercambiable del suelo (Flores, 2012)



VII. Conclusiones.

Con base en los objetivos planteados y el análisis de los resultados se concluye lo siguiente:

Durante la evaluación se realizó la caracterización del agua congénita con el fin de obtener las condiciones de posibles alteraciones, en los cuales se encontraron los valores de HTP por debajo de lo que marca la normativa, siendo los sólidos totales los que registraron valores por encima, con lo que se deduce que el agua congénita proporcionada de la batería de separación Shishito, se encontraba con previo tratamiento. Sin embargo, se considera que las aguas de congénitas dispuestas en una corriente superficial (lagos, ríos, mar) sin ningún tratamiento, ocasionan graves inconvenientes de contaminación que afectan la flora y la fauna. Estas antes de ser vertidas en las masas receptoras, deben recibir un tratamiento adecuado, capaz de modificar sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas, para evitar que su disposición cause los problemas antes mencionados. El grado de tratamiento requerido para las aguas residuales deberá responder a las condiciones que acusen los receptores en los cuales se haya producido su vertimiento. Es importante mencionar que los cuerpos acuíferos y suelos son completamente diferente, por lo que se considera que aun estas aguas cumplan con lo normado en la NOM-143- SEMARNAT-2003, estas condiciones son un factor de alteración para el suelo pues hablamos de dos factores receptores completamente diferentes.

Las caracterizaciones de los suelos testigos de acuerdo a los puntos muestreados (Macuspana y Paraíso) presentaron similitud a los propuestos por Palma-López *et al.*, 2007 y el tipo de suelos dentro del área de estudio, se considera Luvisol-gleico para el de Macuspana y arenosol para el suelo de Paraíso.

Después de contaminarse el suelo, la caracterización física y química, mostro que el parámetro más afectado fue principalmente el porcentaje de materia orgánica en ambos suelos, siendo este parámetro fundamente ya que, al afectarse, directamente modifica al



CIC, pH, CE, así como Textura y las concentraciones de sodio provenientes del contaminante que a la vez aumenta el PSI, para ambos suelos.

Al emplearse el tratamiento con Ca(OH)_2 se obtuvieron resultados favorables de acuerdo a lo establecido en la (CE y PSI) NOM-021-SEMARNAT-2000. Sin embargo, los parámetros antes mencionados no se recuperaron en su totalidad, por lo que se sugiere un agregar material de volumen para mejorar el % de MO y, por ende, mejorar los demás parámetros según lo describe Cuevas *et al.*, (2006). En el suelo de Macuspana se cumplen las condiciones de CE y PSI, contrario a las del suelo de Paraíso ya que el índice de PSI que resulto se encuentra por encima de lo normado. En este sentido, el suelo de Macuspana se pudo recuperar en 6 días aproximadamente de tratamiento mientras el suelo de Paraíso requirió 10 días aproximadamente. De acuerdo al modelado de regresión realizado para ambos suelos, concluimos que cada uno presenta diferente comportamiento ante el contaminante y ante el agente tratante, en el presente trabajo se aporta el tiempo que requieren de tratamiento cada suelo para optimización recursos e impactar en un menor grado el suelo tratado ya que al determinar la cantidad de CaO a agregar y los días de tratamiento se deja de exponer al alcálisis y elevación excesiva del pH.

En este trabajo se elaboró la remediación de dos suelos (Arenosol y Luvisol) de los 18 tipos de suelos con los que cuenta el estado de Tabasco, y de acuerdo a los antecedentes publicados se tienen información sobre suelos Gleicos, Fluvisol y Vertisol, que han sido reportados en trabajos de remediación para este tipo de contaminante, de este modo, queda la posibilidad de estudiar los 13 suelos restantes que estén expuestos a es este tipo de derrame con el fin de comparar si existe diferencia en los tiempos de remoción que se requiere para cada tipo. Así mismo, se sugiere realizar estudios de DRX a los suelos para comprobar el cambio estructural que se presenta cuando estos son impactados por un contaminante.



VIII. Bibliografía

- Acebey, A. R., López-Acosta, J. C., Tejero-Díez, J. D., y Krömer, T. (2017). Riqueza y composición de helechos y licófitos en tres áreas de bosque mesófilo en Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 88(3), 625-635.
- Adams s., R. H., Joel Zavala- Cruz., Fernando A. Morales García. (2008). Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico. li afectación a la fertilidad y su recuperación DACBiol. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. 7 pp.
- Adams, M. (1995). Fundamentos de química de suelos. CDCH UCV.
- Adams, R. H., Alvarez, R. J. A., Tinal, O. C., & Guzman, O. F. J. (2005, November). Alberto carbajal.(2008) Hidróxido de calcio: fórmula, propiedades, reactividad y usos. <https://www.lifeder.com/superacion-personal/>.
- Álvarez coronel, J. (2007). Remediación de un suelo contaminado con aguas salinas congénitas procedentes de la extracción del petróleo mediante la técnica de lavado con Ca(OH)_2 .
- Aragón Tobar, C. F. (2013). Diseño a escalas laboratorio y piloto de un sistema de remediación electrocinética de suelos contaminados con metales pesados (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2013).
- Bautista, C. M. M., García, C. E. L., & Chávez, M. D. J. A. (2017). Evaluación de impactos causado por cambios en la vocación de uso de suelo: estudios preliminares en un programa de reforestación. *kuxulkab'*, 23(45).
- Bautista, F., Díaz-Castelazo, C., & García-Robles, M. (2009). Changes in soil macrofauna in agroecosystems derived from low deciduous tropical forest on leptosols from karstic zones. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(2), 185-197.
- Bautista, F., Zinck, A. J., & Cram, S.(1999) Los suelos de Latinoamérica: retos y oportunidades. Bazant, J. Riesgos de habitabilidad urbana ocasionados por el cambio climático: el caso de México.
- Bohn, H. L., McNeal, B. L., O'Connor, G. A., & Orozco, M. S. (1993). Química del suelo (Vol. 1, pp. 123-153). México: Limusa.
- Cáceres, D. B. (2007). Atenuación natural de la contaminación de suelos producida por metales pesados (Doctoral dissertation, Universidad Simón Bolívar).
- Cansaya Quispe, E. S., Aguilar, N., & Alejandro, E. (2018). Investigación para la evaluación de parámetros en agua subterránea y su potabilización para el abastecimiento en la localidad de Samuel Pastor Provincia de Camaná.
- Carrasco, S. C. P., Mahecha, H. S., & Buelvas, V. M. P. (2009). Interacción de los suelos sulfatados ácidos con el agua y sus efectos en la sobrevivencia del bocachico (*Prochilodus magdalenae*) en cultivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 22(4), 619-631.
- Catalán, V. F. R. (2011). Evaluación del potencial productivo de tres cultivares de Zanahoria (*Daucus carota* L.) en Valdivia.
- Codex Alimentarius Commission, Joint FAO/WHO Food Standards Programme, & World Health Organization. (2007). Codex alimentarius Commission: procedural manual. Food & Agriculture Org.
- Coleman, D. C., Callaham, M. A., & Crossley Jr, D. A. (2017). *Fundamentals of soil ecology*. Academic press.



Cuanalo de la Cerda, H. E. (1999). Perspectives of traditional farming production units in the Yucatan peninsula: A case study. *Agrociencia* (Mexico).

Cuevas, J., Seguel, O., Ellies Sch, A., & Dörner, J. (2006). Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencias a la adición de lodos urbanos. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 6(2), 1-12.

F. A. O., & WHO Expert Committee on Food Additives. (2002). Safety evaluation of certain food additives and contaminants.

F:A:O: Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura. (2019). Propiedades físicas de un suelo. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>

Fao, F. (2012). Agriculture Organization of the United Nations. 2012. *FAO statistical yearbook*.

Filho, F. L. B., Guerra, H. O. C., & Gheyi, H. R. (2003). Conductividad hidráulica en un suelo aluvial en respuesta al porcentaje de sodio intercambiable. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(2), 403-407.

Flores, R. C. (2012). *El suelo de cultivo y las condiciones climáticas*. Editorial Paraninfo.

Frenkel, H., Goertzen, J. O., & Rhoades, J. D. (1978). Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity 1. *Soil Science Society of America Journal*, 42(1), 32-39.

Gabriels, D., & Lobo, D. (2011). Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venesuelos*, 14(1), 37-48.

García, M., Miranda, R., & Fajardo, H. (2014). Manual de manejo de la fertilidad de suelo bajo riego deficitario para el cultivo de la quinua en el altiplano boliviano. disponible Website:http://www.cazalac.org/mwar_lac/fileadmin/documents/CaribbeanDroughtAtlas/quinua.pdf (verified 5 January 2016).

García-Cuéllar, J. Á., Arreguín-Sánchez, F., Hernández Vázquez, S., & Lluch-Cota, D. B. (2004). Impacto ecológico de la industria petrolera en la Sonda de Campeche, México, tras tres décadas de actividad: una revisión. *Interciencia*, 29(6), 311-319.

Geissen, V., López de Llergo-Juárez, J. G., Galindo-Alcántara, A., & Ramos-Reyes, R. (2008). Erosión superficial y carstificación en Macuspana, Tabasco, Sureste de México. *Agrociencia*, 42(6), 605-614

GeosicIngenieros (2017). Levantamiento y cartografía de suelos. Jr, Garcilazo de la Vega-439, Ayacucho, Jr. San Agustín 201-D-103 Surquillo-Lima, Perú. Recuperado de: <http://www.geosicingenieros.com.pe/levantamiento-y-cartografia-de-suelos>.

Gisbert Blanquer, J. M., Ibañez Asensio, S., & Moreno Ramón, H. (2010). La textura del suelo.

Gómez, M. (2008). Influencia de la aplicación de vinaza sobre la presencia, actividad y biomasa microbiana del suelo en el cultivo de maíz dulce (*Zea mays*) (Doctoral dissertation, Tesis de Magister en Ciencias Agrarias Enfasis Suelos).

Guerra Sandoval, B. G. (2018). Tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria de productos lácteos San Salvador-cantón Riobamba, mediante Fitorremediación con humedales artificiales empleando totora (Bachelor's thesis, Universidad Nacional de Chimborazo, 2018).

Gupta, R. K., & Abrol, I. P. (1990). Reclamation and management of alkali soils. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 60(1), 1-16.



- Harris, T. A. (2001). *Rolling bearing analysis*. John Wiley and sons.
- Hidrocarburos, c. a. a. (2003). Norma oficial mexicana Nom-143-SEMARNAT-2003, que establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos.
- Hodgson, J. (1987). Muestreo y descripción de suelos. Reverté.
- INEGI. (2015). Sistema de Cuentas Nacionales.
- INEGI. 2012. Prontuario de información geográfica municipal de los Estado Unidos Mexicanos. Cárdenas, Tabasco. Clave geoestadística 27002. Consultado: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/27/27002.pdf> 05/06/2014.
- Lamz Piedra, A., & González Cepero, M. C. (2013). La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. *Cultivos Tropicales*, 34(4), 31-42.
- Lavell, A. (1996). Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. *Ciudades en riesgo*.
- López Sánchez, J. (2014). Estudio geoquímico de elementos traza en suelos de la Región de Murcia y detección de anomalías/contaminación (Doctoral dissertation, Universidad de Murcia).
- Martel-Valles, J. F., Foroughbakch-Pournavab, R., & Benavides-Mendoza, A. (2016). Produced waters of the oil industry as an alternative water source for food production. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(4), 463-475.
- Martínez, V. E. (2001). Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Terra latinoamericana*, 19(1), 9-17.
- McNeal, B. L., & Coleman, N. T. (1966). Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity 1. *Soil Science Society of America Journal*, 30(3), 308-312.
- Mijaylova-Nacheva, P., Ramírez-Camperos, E., & Cuevas-Velasco, S. (2007). Treatment of organic synthesis wastewater using anaerobic packed bed and aerobic suspended growth bioreactors. *Water science and technology*, 55(7), 235-243.
- Morales Gamarra, R. (2008). Impacto de la gestión ambiental y turístico cultural en la conservación de las huacas de moche, valle de moche.
- Morales-Bautista, C., Domínguez-Rodríguez, V., & Adams, R. H. (2011). Estudio cinético del intercambio catiónico con Ca(OH)_2 y evaluación de la fertilidad en un suelo arcilloso contaminado con aguas congénitas. *Bioagro*, 23(2), 129-134.
- Murray, R. M., Orozco, M. G., Hernández, A., Lemus-Flores, C., & Najera Gonzalez, O. (2014). El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo.
- Noguera, M. A., & Vélez, J. A. (2011). Evaluación de algunas propiedades físicas del suelo en diferentes usos. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 28(1), 40-52.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreos y análisis.
- Otero, L., Francisco, A., Gálvez, V., Morales, R., Sánchez, I., Labaut, M., ... & Rivero, L. (2007). Caracterización y evaluación de la salinidad. Registro CENDA, 1689-2007.



Palma-López, D. J., Cisneros, D. J., Moreno, C. E., & Rincón-Ramírez, J. A. (2007). Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable. Colegio de Postgraduados-ISPROTAB-FUPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México, 195.

Palma-López, D. J., Jiménez Ramírez, R., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zúñiga, F., Gavi Reyes, F., & Palma-Cancino, D. Y. (2018). Actualización de la clasificación de suelos de Tabasco, México.

Patiño Angulo, D. F., & Campos Alanís, J. (2014). Memoria de las actividades realizadas en el Proyecto Comunitario Sostenible en la Región de Papantla-Espinal, Veracruz, ejecutado por Red Acción Ambiente para la gerencia de desarrollo social de Petróleos Mexicanos.

PEMEX, 2001. Anuario estadístico. PEMEX, México.

Porta Casanellas, J., & López-Acevedo Reguerín, M. (2008). Introducción a la Edafología uso y protección del suelo (No. 631.4 P8307i Ej. 1 021906). Mundi-Prensa.

Pulido Madrigal, L., González Meraz, J., & Villarreal Pulido, M. (2009). Metodología para el diagnóstico, manejo y control de la salinidad, aplicada en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora, México.

Pupisky, H., & Shainberg, I. (1979). Salt Effects on the Hydraulic Conductivity of a Sandy Soil 1. Soil Science Society of America Journal, 43(3), 429-433.

Quintero, P., & Silvia, L. (2012). Evaluación de la influencia de una cepa bacteriana en la biorremediación de un suelo arenoso contaminado con diésel, a escala de laboratorio.

Rendón, L. A. Q., Agudelo, E. A., Hernández, Y. A. Q., Gallo, S. A. C., & Arias, A. F. O. (2010). Determinación de indicadores para la calidad de agua, sedimentos y suelos, marinos y costeros en puertos colombianos. Gestión y ambiente, 13(3), 51-64.

Restoration of brine and oil contaminated marshlands by cationic exchange and chemical-biological stabilization. In 12th International Environmental Petroleum Conference. International Environmental Petroleum Consortium (<http://ipec.utulsa.edu>) Houston, Texas (pp. 7-11).

Revollo Mallma, R. (2015). Estudio geofísico por potencial espontáneo y resistividad en la variante de geotomografía eléctrica para la captación de agua subterránea en el sector cruce la joya, distrito la joya, provincia y región Arequipa.

Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods, (methodsofsoilan3), 417-435.

Rubio, R. F. (1996). Suelos contaminados. IGME. generados por la disposición no controlada de polvo de acería sobre suelo (Bachelor's thesis, QUITO).

Ruiz Hinojosa, M. G. (2013). Diseño de un sistema de tratamiento de los lixiviados.

Sánchez Requejo, V. (2018). Determinación de parámetros físicos y químicos, y su influencia en las características organolépticas en la quebrada el Herrero, Soritor, 2015.

Serrato S. R., A.O (2002). Aplicación de lavados y estiércol para recuperar suelos salinos en la comarca lagunera, Mexico. Terra 20: 329-336.

Serrato S. R., Ortiz A. O (2002) Aplicación de lavado y estiércol para recuperar suelos salinos en la comarca lagunera, México. Terra 20: 329-336.

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



Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and soil*, 241(2), 155-176.

Weinzettel, P., Varni, M., Dietrich, S., & Usunoff, E. (2009). Evaluación de tres dispositivos de tomografía eléctrica para la identificación de horizontes petrocálcicos en el suelo. *Ciencia del suelo*, 27(1).



IX. Anexos.

9.1. Anexos A.

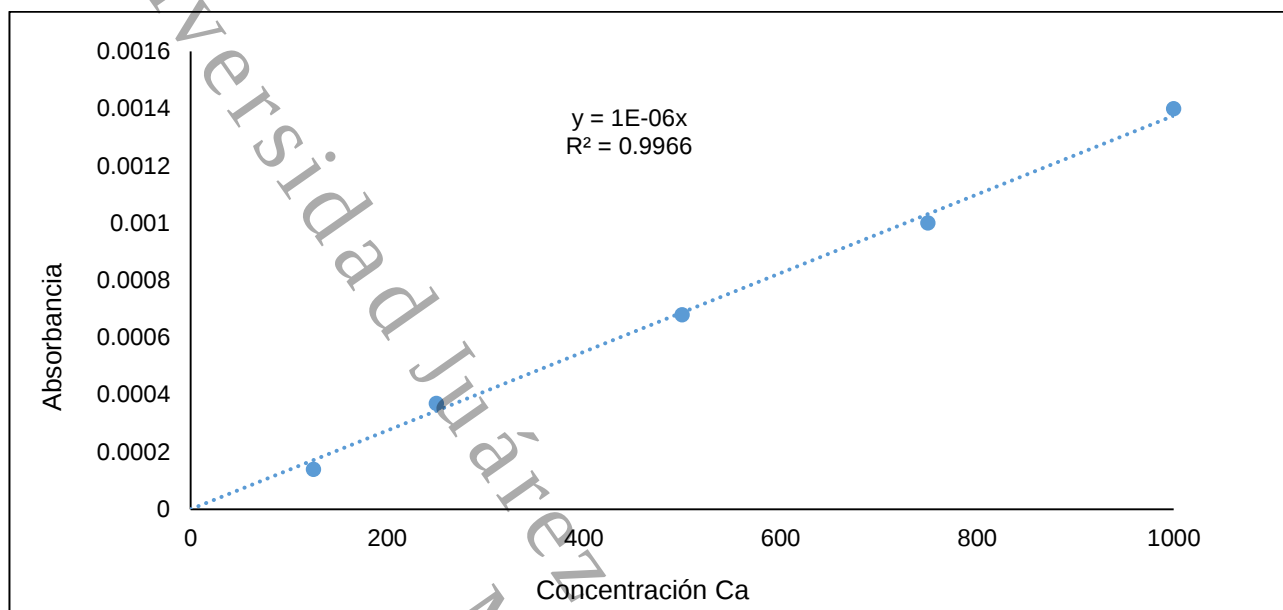


Figura 26. Curva de calibración para el ion calcio

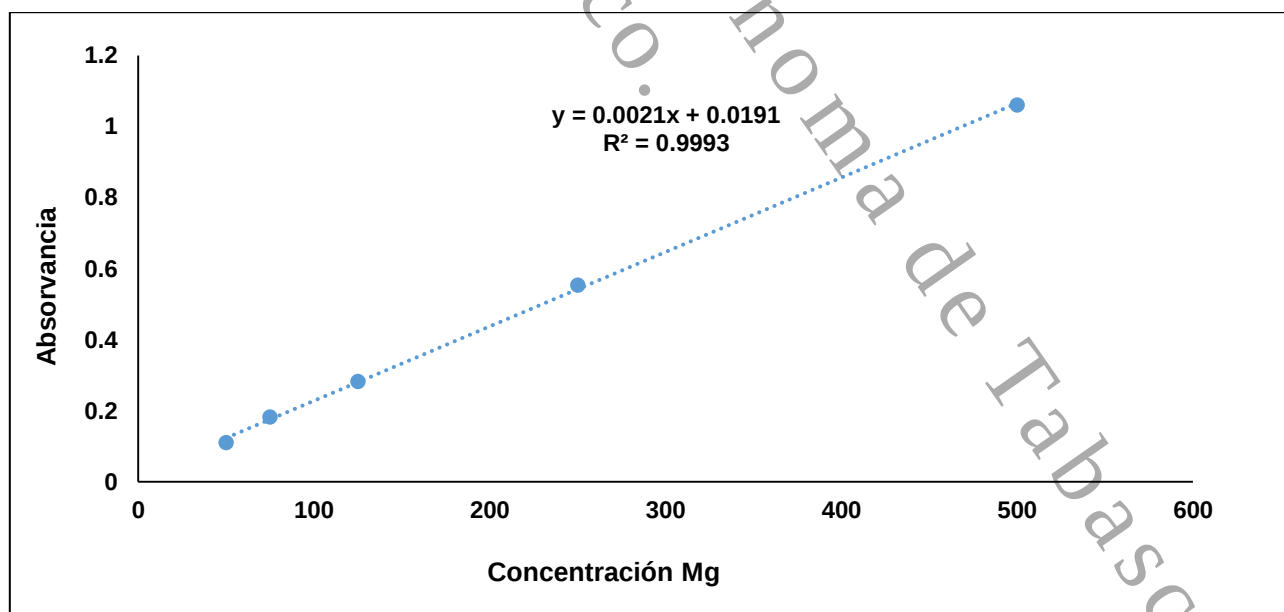


Figura 27. Curva de calibración para el ion magnesio

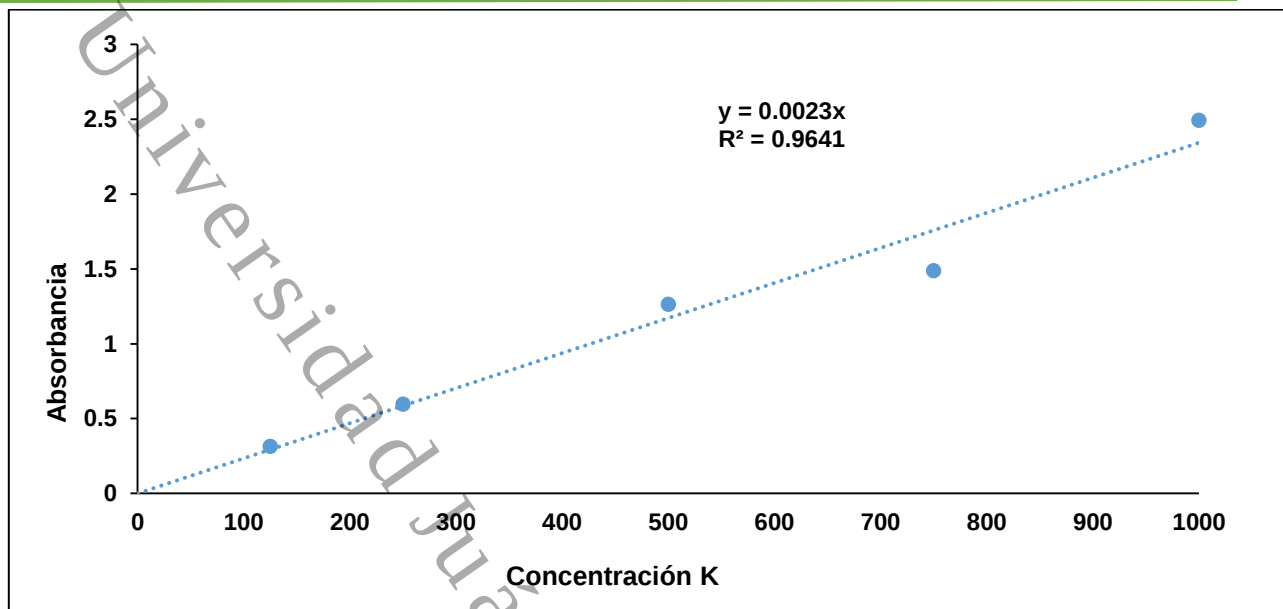


Figura 28. Curva de calibración para el ion potasio

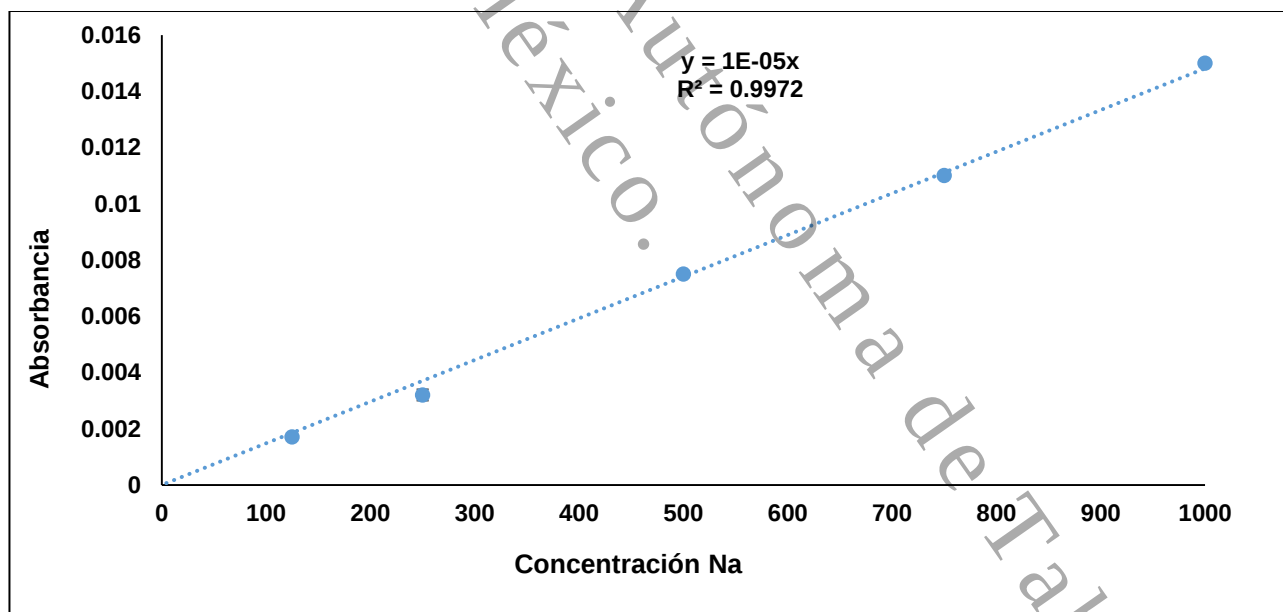


Figura 29. Curva de calibración para el ion sodio

9.2. Anexos B.

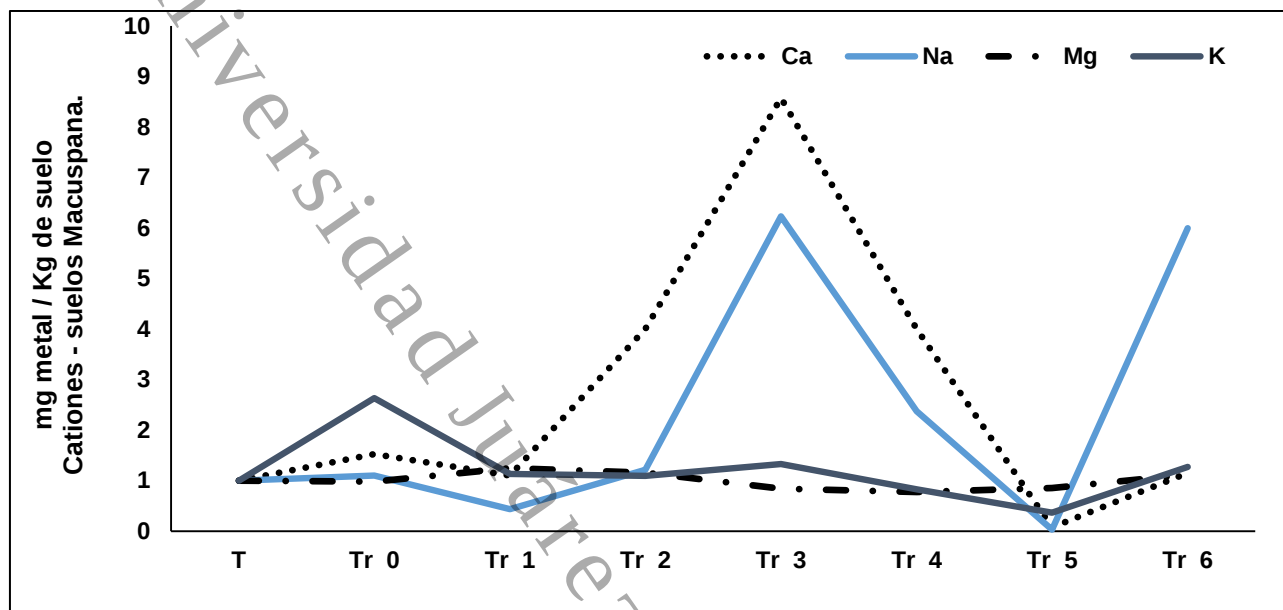


Figura 30. Comportamiento de Cationes intercambiables en suelo Macuspana según el tiempo de tratamiento.

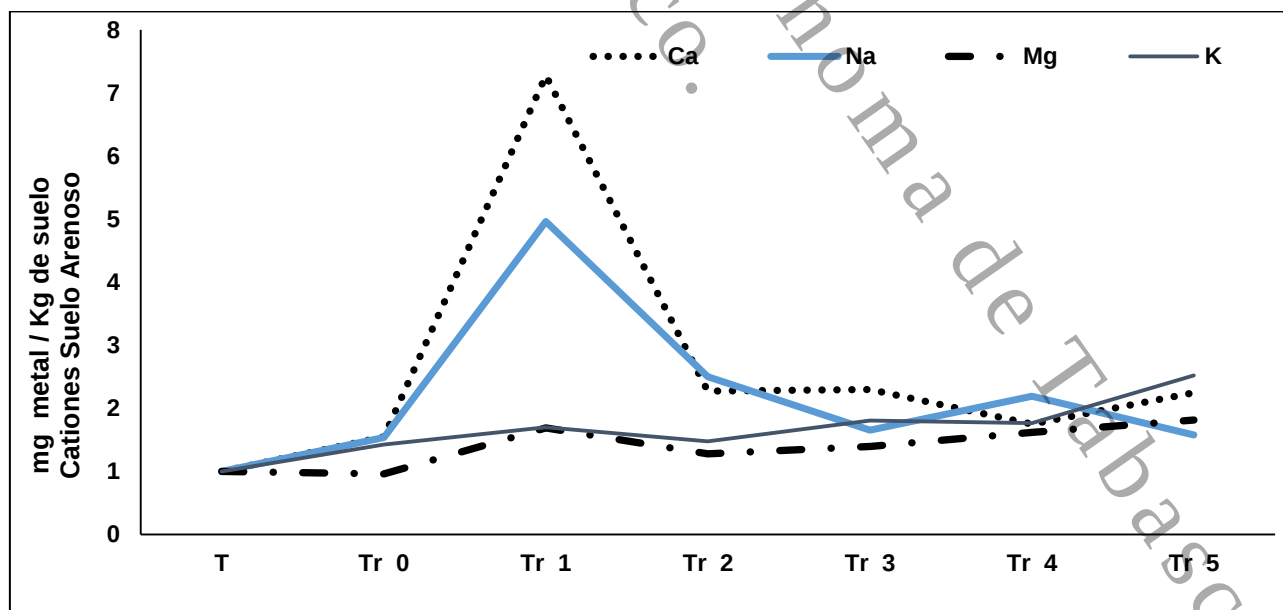


Figura 31. Comportamiento de Cationes intercambiables en suelo Paraíso según el tiempo de tratamiento.

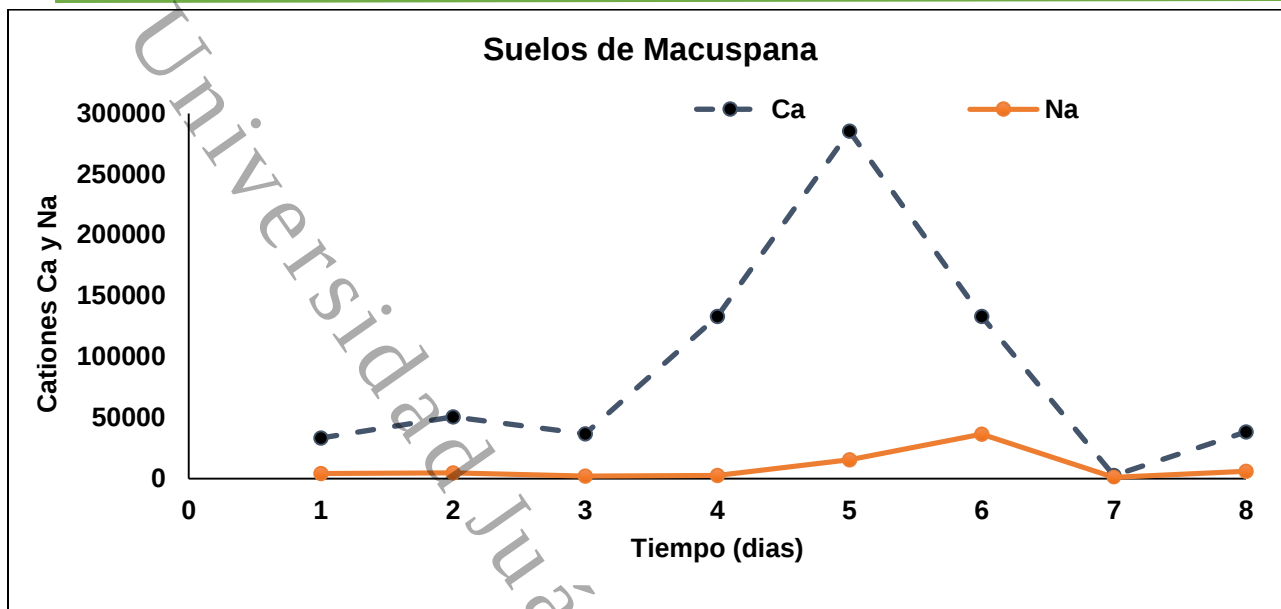


Figura 32. Cationes Ca^{++} y Na^+ Macuspana

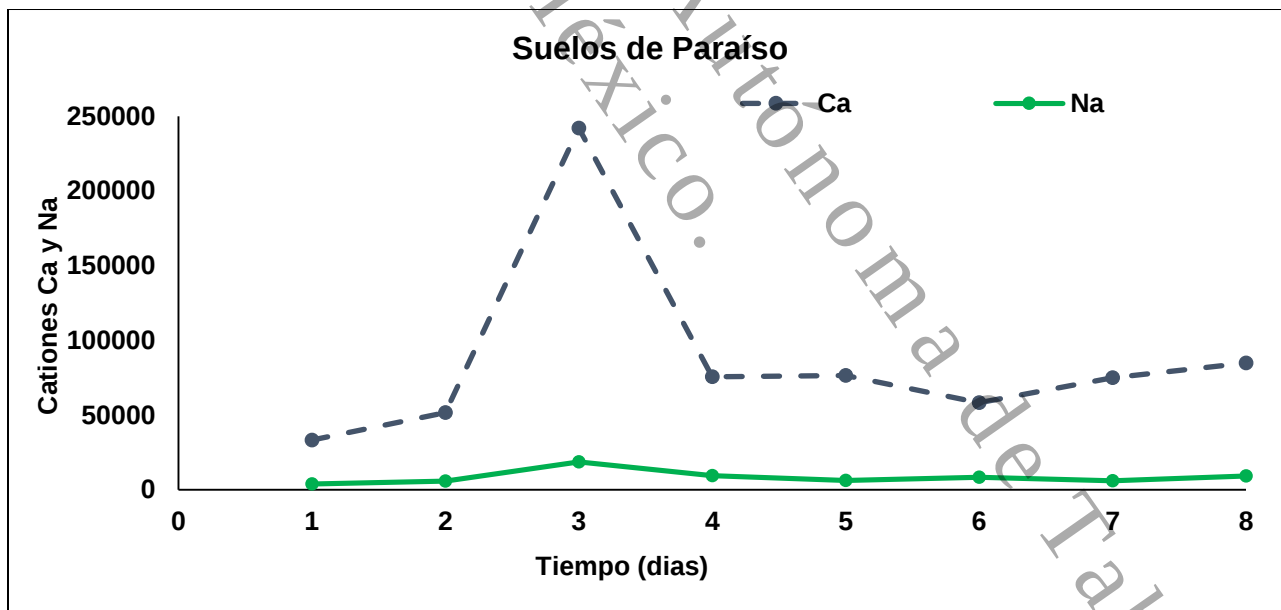


Figura 33. Cationes Ca^{++} y Na^+ Paraíso



9.3. Anexos C

9.3.1. Cálculos de K_G , RAS, PSI.

El cálculo del PSI se realizó de la siguiente manera:

- Se requirió calcular el RAS (relación de absorción de sodio) para cada replica con la siguiente formula:

$$\text{RAS} = \text{Na} / ((\text{Ca} + \text{Mg})^{1/2})$$

- Después se realizó el cálculo del coeficiente de Gapon (K_G), mediante la siguiente ecuación:

$$(\text{NaX}) / (\text{Ca}^{1/2} \text{X}) = K_G (\text{Na}^+) (\text{Ca}^{++})^{1/2}$$

Donde:

NaX= sodio intercambiable.

Ca++= calcio soluble.

Ca^{1/2}= calcio intercambiable.

Na+= Sodio soluble.

- El RSI (relación de sodio intercambiable) se calcula con la ecuación:

$$\text{RSI} = K_G + \text{RAS}$$

$$\text{PSI} = (\text{RSI} / (1 + \text{RSI})) * 100$$