



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL

**VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA SALINIDAD EN SUELOS DEL
DISTRITO DE RIEGO 014, MEXICALI BAJA CALIFORNIA**

T E S I S

PRESENTA:

LEONARDO SEBASTIAN PADILLA ARZALUZ

DIRECTORES DE TESIS:

DR. EN C. GUSTAVO ALVAREZ ARTEAGA

M EN C. ABEL IBÁÑEZ HUERTA

Toluca, Estado de México: Noviembre de 2017

Esta investigación se realizó con fondos y bajo el auspicio del proyecto “Actualización del diagnóstico del Riesgo de afectación del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto sobre los suelos del Valle de Mexicali Baja California, México” en colaboración con la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación de la Facultad de Ciencias UNAM, Campus Juriquila,

Instituciones participantes.

Comisión Federal de Electricidad

Programa Universitario de Estudios Sustentables (UNAM)

UMDI-Juriquilla, UNAM

Facultad de Planeación Urbana y Regional, UAEM.

Universidad de Berkeley, USA

INDICE

Resumen	1
Introducción	3
Fundamentos de la investigación.....	6
Antecedentes	6
Justificación	11
Planteamiento del problema	11
Hipótesis.....	12
Objetivos	12
I. Marco teórico	13
1.2 La salinización del suelo	13
Las fuentes de sales del suelo	14
Tipo de sales en el suelo	16
1.3 Clasificación de suelos salinos.....	17
1.4 Efecto de las sales en suelos y vegetación	20
1.5 Métodos de evaluación de la salinidad.....	26
II. MATERIALES Y MÉTODOS	28
2.1 Caracterización de la zona de estudio.....	28
2.1.1 Caracterización regional.....	28
2.1.2 Clima.....	30
2.1.3 Geología	31
2.1.4 Hidrología.....	31
2.1.5 Edafología.....	36
2.1.6 Uso de suelo y vegetación.....	37
2.2 Metodología	40
2.2.1 Delimitación de la zona de estudio.	41
2.2.2 ubicación y muestreo	42
2.2.3 Trabajo de campo.....	44
2.2.4 Trabajo de laboratorio	44
2.2.5 Análisis de la variabilidad espacial de la salinidad	45
2.2.6 generación de cartografía partir del método IDW.....	47
III. RESULTADOS.....	49

3.1 Indicadores de salinidad del suelo	49
3.1.2 pH del suelo.....	52
3.1.3 Conductividad Eléctrica.....	58
3.1.4 Porcentaje de Sodio Intercambiable	62
IV. Discusión	68
4.1 Muestreo.....	68
4.2 Implicaciones de la salinidad sobre las actividades productivas	68
V. Conclusiones	75
VI. Recomendaciones	76
VII. Bibliografía.....	79
VIII. Anexos.....	82
Índice de figuras	82
Índice de tablas	83

Resumen

La salinidad es un problema que amenaza la calidad de los suelos agrícolas en todo el mundo, tan sólo en América Latina 31, 000,000 Ha. presentan este problema, destacando México, Perú, Colombia, Ecuador y Chile entre los más afectados. Éste es un factor limitante en la producción de alimentos pues los cultivos pierden su potencial de rendimiento en estas condiciones.

La salinidad del suelo puede ocurrir por efectos naturales, sin embargo, la principal causa es el mal manejo de la agricultura en cuestiones como: aplicación incorrecta del método de riego, falta de drenaje en los suelos, mal manejo de los fertilizantes, empleo de aguas residuales para el riego y uso inadecuado de estiércoles y otros residuos animales.

La salinidad tiene un efecto negativo en el desarrollo de los cultivos ya que en estas condiciones el potencial osmótico del suelo supera al del sistema de las plantas limitando así la entrada del agua en la raíz, además de ello la salinidad trae consigo otros problemas como: Absorción limitada de los nutrimentos, afecta la translocación y el reciclado de iones en la planta, el exceso de ciertos iones puede provocar toxicidad en las plantas, acumulación de Cl, Na y B en distintas partes de las plantas, como las semillas, los tallos y las hojas, se producen una serie de modificaciones debido a las variaciones de pH, que afectan a la disponibilidad de los nutrimentos.

Es por esto que en la presente investigación se ha desarrollado una comparación de la distribución y aumento de las sales en una de las zonas más afectadas por esta, que es el distrito de riego 014 en el municipio de Mexicali, Baja California.

Se realizaron dos campañas de muestreo de suelos en los años de 2010 y 2016, esto con la intención de conocer la variabilidad espacial de las sales en el suelo. En laboratorio se obtuvieron los siguientes indicadores de salinidad: potencial de hidrogeno (pH), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la conductividad eléctrica (CE), los cuales están relacionados directamente con el contenido de sales en el suelo y por medio de ellos es posible determinar su nivel de afectación.

A partir de los datos obtenidos se generó cartografía digital de cada indicador que muestra las tendencias espaciales y temporales en la distribución de la salinidad y sodicidad para la zona de estudio, detectándose variaciones entre ambos años.

A partir de la información obtenida, será posible identificar áreas de mayor afectación y posteriormente aplicar las medidas oportunas de mitigación o remediación en los suelos estudiados.

Introducción

A nivel mundial, la degradación del suelo se ha constituido como uno de los problemas ambientales más graves; la FAO en su último reporte sobre el Estado Mundial del Recurso Suelo (FAO and ITPS, 2015), estima que aproximadamente el 33 % de los suelos del planeta están sujetos a algún tipo e intensidad de degradación, por lo que de incrementarse esta cifra, se estaría comprometiendo la seguridad alimentaria de la población, así como los múltiples servicios eco sistémicos que presta el suelo. Un gran número de estudios indican que los cambios de uso de suelo y/o la intensificación de su manejo generalmente propician la alteración de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, causando su degradación (Geissen et al., 2009; Ozgoz et al., 2013; Lal, 2015).

Las principales consecuencias de estas alteraciones son la erosión del suelo, su desequilibrio de nutrientes, disminución de los almacenes de carbono, pérdida de biodiversidad, sellamiento, acidificación, contaminación y salinización (Lal & Rattan, 2015).

La salinización del suelo, un tipo de degradación química que ha cobrado importancia a nivel mundial por darse principalmente en grandes zonas agrícolas bajo irrigación y de manera particular en México, en los distritos de riego (DR) del norte y noroeste del país, sobre todo en aquellas regiones donde predominan climas cálido-secos. Este régimen climático favorece elevadas tasas de evapotranspiración con lo que el agua de riego, generalmente con altas concentraciones de sales en dilución, una vez que es aplicada al suelo se evapora, dejando en la superficie las sales cristalizadas. Cuando este manejo no es racionalizado, las sales seguirán acumulándose hasta el punto en que inhabilita la capacidad productiva de los suelos.

Se considera que las causas principales de salinización en estas zonas agrícolas provienen en primer término de los materiales geológicos sobre los que se desarrollan estos suelos y en segunda instancia, de la aplicación de agua de riego que contiene en disolución altos contenidos de sales (Porta, 2006). La salinización del suelo se acelera cuando estos dos factores coinciden con prácticas inadecuadas de manejo como el riego excesivo o la extracción de volúmenes de agua de acuíferos salinos y sobreexplotados (FAO and ITPS, 2015).

Fuentes oficiales mexicanas estiman que entre el 26 y el 30% del área de estos DR pudiera estar afectada por exceso de sales en diferente grado y por manto freático superficial (Fernandez, 1991; IMTA, 1997).

El presente estudio que forma parte del Proyecto de investigación antes mencionado, denominado "Estudio de evaluación ambiental del Campo Geotérmico Cerro Prieto, en Mexicali, Baja California, Fase IV" financiado con fondos de la Comisión Federal de Electricidad ha sido el complemento del estudio para conocer los niveles de afectación de los suelos en el valle.

Esta fase del proyecto general se realizó en suelos agrícolas del Valle de Mexicali, Baja California, pertenecientes al DR 014 Rio Colorado, que cuenta con una extensión de más de 200 mil ha. Históricamente, este DR surge como alternativa productiva cuando se decide reencausar las aguas del Río Colorado y aprovecharlas para irrigar los suelos de la región. Así es como bajo la figura de ejidos, el gobierno Mexicano propicia la colonización de esta zona con agricultores provenientes de otras regiones del país y les dota de tierras y financiamiento para desarrollar la actividad agrícola comercial.

Durante más de un siglo, el Valle de Mexicali ha sido un importante productor de cereales, algodón y hortalizas para el mercado nacional e internacional; sin embargo la intensificación de las malas prácticas

agrícolas, el aporte de aguas para riego de baja calidad, así como la explotación de la energía geotérmica dentro del complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto el cual es una planta de energía geotérmica de México, la 2.^a mayor central del mundo, con una capacidad instalada de 720 MW para generación de electricidad por medio de turbinas de vapor, lo cual genera salmueras (aguas residuales con altas concentraciones de sal) y lo cual es una más de las causas que han propiciado alteraciones importantes sobre la condición actual de los suelos, provocando su degradación química, principalmente por acumulación de sales.

Bajo esta perspectiva, el estudio pretende conocer la diversidad espacio temporal de la salinidad en los suelos de una porción del Valle de Mexicali mediante la determinación de los indicadores de salinidad, (pH), (CE) y (PSI).

Fundamentos de la investigación

Antecedentes

Las actividades económicas en el Valle de Mexicali: un recuento histórico

La actividad agrícola en el Valle de Mexicali tiene su origen en los primeros años del Siglo XX, cuando un grupo de inversionistas norteamericanos inician la explotación agrícola del Valle Imperial, contiguo al lado mexicano y conciben a las tierras del Valle de Mexicali como su extensión natural. De esta forma, los inversionistas adquieren doscientas mil hectáreas con aval del gobierno mexicano con el compromiso de colonizar estas tierras completamente despobladas. Puede definirse al año de 1901 como inicio de las actividades agrícolas cuando el valle recibe por primera vez el aporte de aguas del Río Colorado, principalmente para el cultivo de algodón. Cabe mencionar que tanto la propiedad de la tierra como de los medios de producción quedó a cargo de empresas extranjeras. Durante este tiempo, la producción algodонера fue destinada principalmente para su exportación al vecino del norte (Secretaría de Fomento Económico de Baja California, 2009). Para 1937, tras la consolidación política del movimiento revolucionario, el gobierno federal determina la expropiación de las tierras, constituyendo cuarenta y cuatro ejidos y colonias agrícolas.

Bajo esta nueva perspectiva y por medio de la Comisión Nacional de Irrigación se emprenden grandes obras de infraestructura hidráulica para reencausar el agua del Río Colorado y dotar de riego a la zona; es así como se crea el DR 014 Río Colorado con una extensión superior a las 200 mil hectáreas, prevaleciendo la producción de algodón para el mercado norteamericano como la principal actividad.

Probablemente, parte de la problemática ambiental actual comienza a manifestarse a partir de 1957 cuando se decide incrementar la extracción del acuífero local para fines de riego de 700 a 1 200 hm³, aun a pesar de

que en 1955 se expidió un decreto para considerar al valle como zona de veda.

En la década de los sesentas aparece en el valle otro problema derivado del manejo de tierras, que es el incremento en el contenido de sales de las aguas del Colorado provenientes del lado norteamericano. Este hecho, junto con la aplicación de láminas de riego excesivas y la fuerte evapotranspiración producto del régimen climático, propiciaron el ensalitramiento de las tierras agrícolas, ocasionando la disminución de la fertilidad de los suelos y el decaimiento de la producción de algodón, trigo y hortalizas. Esta situación, se vio agravada por la caída de los precios internacionales del algodón por la aparición de las fibras sintéticas, dando por resultado un colapso de las actividades económicas dentro del valle. En respuesta a esta problemática, se inicia una importante diversificación del patrón de cultivos como el trigo, forrajes y oleaginosas, a la vez que se intensifica la actividad pecuaria (UACH, 2007).

Posterior a la disputa en cortes internacionales, en 1968, el gobierno Mexicano logra un convenio en el que la parte norteamericana se compromete a enviar a México un volumen anual de 1 850 hm³ de agua con no más de 1,300 ppm de sólidos totales disueltos. Los sitios de entrega de agua quedaron distribuidos de la siguiente manera:

Presa Morelos (con el 91%), los drenes Cooper, Milla 11 y Milla 21, aguas abajo de la presa Morelos, en el tramo en el que el Río Colorado constituye la frontera internacional (con el 1%), y el canal Sánchez Mejorada, que recibe agua del canal principal Este y del dren principal de Yuma (con el 8%) (Secretaría de Fomento Económico de Baja California, 2009).

En el periodo de 1967-1969 se realizó una campaña de perforación de pozos conocidos como serie "G", los cuales se utilizaron para tener un

mayor conocimiento geo hidrológico del Valle de Mexicali y Mesa de San Luis, los cuales tienen una profundidad que varía de 200 a 800 m. Algunos de estos pozos se equiparon y otros quedaron como de observación.

Para el periodo de 1971-1976, con la rehabilitación de gran parte del distrito que consistió en el revestimiento de canales, se produjeron notables cambios en el régimen de la recarga, al disminuir las pérdidas por infiltración. En el contexto productivo, la problemática laboral en los campos de California, propicia que del lado Mexicano, los productores atiendan la demanda de hortalizas para los norteamericanos mediante el cultivo por contrato. Bajo esta modalidad, las empresas extranjeras suministran financiamiento, asistencia técnica, insumos y maquinaria a cambio de un compromiso de venta.

Este fenómeno económico determinó la concentración gradual de tierras por arrendamiento en manos de unas cuantas empresas agroindustriales, sobre todo en las tierras con mayor aptitud productiva ubicadas en la porción sureste del valle (UACH, 2007).

En el periodo de 1972-1988 se construyeron los pozos pertenecientes a la batería de Mesa Arenosa de la cual se realizó un convenio con EUA de extracción máxima de 187 hm³/año, para no afectar el área de captación en el lado norteamericano. Durante la década de los setenta, la crisis petrolera y la caída de la economía nacional determinan el encarecimiento de los costos de producción y la inviabilidad económica para un gran número de productores dentro del valle, focalizándose la producción hacia los cultivos más rentables como el melón, cebollín, lechuga, calabacita, rábano, brócoli, coliflor y espárrago (UACH, 2007).

Un hecho importante durante estos años es el impulso a la generación eléctrica en el valle mediante la explotación del Campo Geotérmico de Cerro Prieto cuyo potencial la ubicaría con el tiempo entre las plantas geo

termoeléctricas más importantes del mundo por su capacidad de generación. (Valette-Silver, Thompson, & Ball, 1981)

A partir de los ochentas, la creciente demanda de agua determina la perforación de pozos para dotar de agua potable tanto a las comunidades asentadas en el valle como a los habitantes de la zona urbana de Mexicali, a la par, junto con el agua del Río Colorado, los pozos complementan la necesidad de los campos de cultivo, condición que predispone la sobreexplotación del acuífero superficial y el detrimento de su calidad por la concentración de sales.

El crecimiento poblacional en Mexicali que para el 2010 era de 936,826 habitantes según datos del INEGI, aumento para el 2016 a un total de 1,039,260 habitantes según datos de la CONAPO, la coexistencia de las diferentes actividades productivas dentro del valle y las crisis económicas determinan una mayor presión sobre los recursos agua y suelo, provocando su degradación, esto se refleja directamente en el abatimiento del acuífero y su deterioro por acumulación de sales, menor disponibilidad y calidad del agua proveniente del Río Colorado la cual está muy cercana a los límites permisibles para su uso en regadíos ver ilustración(1.1) y de la parte industrial, la expansión del complejo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP), que a decir de las comunidades aledañas de los ejidos Michoacán, Hidalgo, Nuevo León y Nayarit, ha repercutido en la salinización e inhabilitación parcial o total de sus terrenos agrícolas, así como probables riesgos a la salud humana por efecto de las emisiones a la atmósfera de gases tóxicos provenientes del CGCP (Ibáñez-Huerta, 2013).

La industria en Mexicali es diversificada, ocupando el primer lugar la de productos alimenticios donde se cuentan con pasteurizadoras de lácteos, embotelladoras, molinos de trigo, tortillerías y empacadoras de carne,

entre las más importantes. La industria maquiladora está altamente desarrollada, siendo Mexicali el pionero en México en esta rama industrial.

La industria eléctrica (complejo geotérmico de Cerro Prieto) por su cercanía a la zona de estudio tiene mayor influencia en cuanto a las alteraciones que el recurso suelo ha sufrido ya que se ha desarrollado gracias a las características geológicas del municipio de Mexicali, debido a que cuenta con una planta geo termoeléctrica que aprovecha el calor producido en el subsuelo y que es suficiente para abastecer a todo el estado y además exportar este energético.

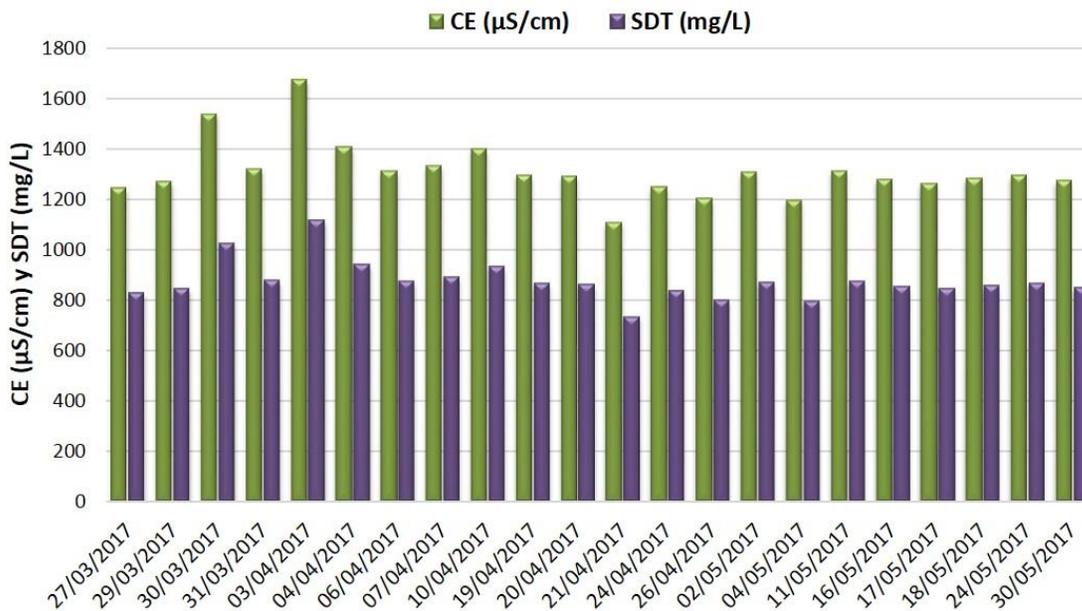


Ilustración 1 Concentración de sales y solidos disueltos en el rio colorado / Fuente: INTA

El siguiente gráfico de barras muestra la evolución de la (CE) y los (SDT) del agua del río Colorado desde el 27 de marzo de 2017 al 30 de mayo de 2017. Máximo valor aceptable de aptitud para riego: $CE \leq 1.800 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Justificación

La salinización del suelo es un problema socio ambiental que tiene implicaciones sobre la producción de alimentos y oferta de servicios ambientales que proporciona el suelo. Si bien la acumulación de sales es un proceso común en muchas zonas áridas y semiáridas en el mundo, su acumulación puede acelerarse por las prácticas de manejo del suelo con fines agrícolas, principalmente cuando son sujetas a riego constante. En el DR 014 Río Colorado, ubicado en mayor proporción dentro del Valle de Mexicali, la salinización del suelo se ha convertido en un problema que trasciende de las actividades productivas al ámbito social y económico.

Debido a que el aumento en la concentración de sales en el suelo tiene efectos inhibitorios sobre el desarrollo de los cultivos, generando pérdidas económicas en los productores y deterioro en la calidad de vida de los pobladores del valle se ha puesto especial atención en la dinámica del sodio y las sales dentro del área de estudio, para así establecer acciones correctivas o de mitigación frente a este fenómeno, ya que es imprescindible conocer la magnitud del problema lo cual se lograra mediante una metodología de análisis en campo, en laboratorio y en escritorio de la distribución espacial y temporal de los indicadores de salinidad. La generación de información sobre este fenómeno permitirá a autoridades y propietarios de tierras tomar decisiones pertinentes para frenar e inclusive disminuir la problemática.

Planteamiento del problema

La salinización de los suelos consiste en la acumulación de sales solubles (cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos de potasio, magnesio, calcio y sodio). Cuando estas sales entran en contacto con el medio acuoso, se disuelven y son transportadas a otros lugares; posteriormente con la

evaporación o percolación del agua que las transporta, las sales recristalizan y se depositan en el suelo (Richards, 1990).

En el Valle de Mexicali, Baja California, diversos estudios han vinculado a las actividades productivas como la generación de energía geotérmica y la agricultura con la acumulación de sales y metales pesados en el suelo, lo cual ha deteriorado su calidad y provocado conflictos entre las industrias locales y los ejidos agrícolas (Ramírez-Hernández & García, 2004; Moncada-Aguilar et al., 2010).

Para establecer las acciones conducentes que lleven a la mitigación de esta problemática, es necesario realizar estudios de campo, laboratorio y de escritorio para determinar su concentración y distribución en el suelo, así como el nivel de afectación para las actividades productivas. Una vez establecido el grado de concentración de sales y su distribución espacial, es posible establecer las alternativas de manejo adecuadas a escala local y regional.

Hipótesis

Mediante la comparación de dos etapas de muestreo en diferentes épocas en suelos del valle de Mexicali, comprendiendo un lapso de tiempo de 6 años, se generaran mapas y tablas de distribución para las dos etapas que mostraran el incremento y distribución de las sales en el valle debido a las actividades industriales, agropecuarias y ganaderas que se realizan dentro de la zona de estudio.

Objetivos

Objetivo general

Determinar la variabilidad espacial y temporal dentro de la zona de estudio en un lapso de 6 años 2010 a 2016 mediante estudios de campo, de laboratorio y escritorio, en el distrito de riego 014 Mexicali, Baja California México, de los parámetros relacionados con los niveles de

salinidad en el suelo, como lo son el potencial de Hidrogeno (pH), Conductividad Eléctrica (CE) y Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI).

Objetivos particulares

- Realizar el análisis e interpretación de los indicadores de salinidad en suelos de la zona de estudio para el año 2016.
- Evaluar y comparar los cambios en la distribución espacial de los indicadores de salinidad en dos fases del estudio general para los años 2010 y 2016.
- Generar cartografía temática sobre la distribución espacial de cada uno de los indicadores de salinidad en el suelo que permita establecer identificar los cambios y tendencias de distribución y concentración de sales en el suelo.

I. Marco teórico

1.2 La salinización del suelo

El incremento de la salinidad en el suelo por factores naturales y antrópicos se ha convertido en un grave problema en las zonas áridas y semiáridas del mundo, ya que afecta las actividades agrícolas, (Maas & Grattan, 1986; Porta, 2006). El incremento de estos compuestos en el suelo ha provocado que suelos originalmente aptos para la agricultura se transformen en suelos salinos, sódico-salinos y sódicos (Allison, 1973).

En ocasiones el incremento de la salinidad y sodicidad se relaciona con procesos antrópicos (uso de agua de riego de mala calidad y el mal manejo). Aunado a esto, la evapotranspiración de las zonas áridas y semiáridas, propicia la acumulación de sales y de sodio en la superficie del suelo y en la zona radicular; esto genera procesos de contaminación y degradación del suelo, aguas superficiales y freáticas (Badia Villas, n.d.)

Suelo salino: Su Conductividad Eléctrica (CE) es mayor a 4 mmhos/cm ó bien 0,4 dsm/m (decisiemens sobre metro), a 25°C y con un Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) menor a 15 y pH menor a 8,5. Se lo reconoce por la presencia de costras blancas en el suelo, recibe los nombres de "salitre blanco" y de "solonchacks"

Los cloruros y los sulfatos son las principales sales solubles, el contenido de bicarbonatos es relativamente bajo y no se encuentra carbonato. El contenido de sodio soluble (Na) supera a la suma de Calcio (Ca) + Magnesio (Mg), pero las relaciones de adsorción de Na no son elevadas.

Los suelos salinos casi siempre están floculados por el exceso de sales y la falta de altos contenidos de sodio intercambiable y por ello tiene importancia en la infiltración del agua en el suelo, que es igual o más elevada que un suelo de igual textura pero sin presencia de sales.

Suelo salino sódico: es el proceso combinado de salinización y acumulación de sodio. Su CE es mayor a 4 mmhos/cm a 25°C y el PSI es mayor que 15. El pH raramente es mayor de 8,5 cuando hay presencia de sales y el suelo está floculado.

Suelo sódico: La CE es menor de 4 mmhos/cm a 25°C, el PSI es mayor de 15 y el pH se encuentra entre 8,5- 10. Generalmente se le llama "salitre negro" ó "solonetz". La materia orgánica se dispersa y se deposita sobre la superficie del suelo adquiriendo ese color negro distintivo. El Na dispersa las arcillas y ellas se transportan hacia las capas más bajas, formando así costras impermeables.

Las fuentes de sales del suelo

La presencia de las sales en el suelo se da por el intemperismo de las rocas y minerales de la corteza terrestre, donde su acumulación puede ser *in situ* o pueden dispersarse por el viento o el agua. Las fuentes

secundarias de acumulación de sales son las de tipo atmosféricos y marinos, estos últimos son introducidos a los continentes como cristales en suspensión mediante brisa marina o gotas de lluvia altamente salinas (sales atmosféricas).

El proceso artesiano se relaciona con la elevación de las aguas subterráneas salinas por capilaridad a la superficie del suelo, causando su afloramiento. La salinización de las aguas subterráneas se da por su contacto con estratos salinos o aguas marinas (Richards, 1990; Bredemeier, Merino, & Lancho, 2012). En zonas inundables, la mezcla de agua dulce con salinas conlleva la redistribución de las sales y su posterior recristalización cuando el agua se evapora.

Los fenómenos artificiales o antrópicos de acumulación de sales en el suelo han cobrado importancia debido al aumento de los procesos de transformación y degradación del suelo, causado por el cambio de áreas naturales a usos de suelo agrícolas, industriales, depósitos urbanos entre otros (Figura 1.1) (Tanji, 1996). El uso de agua de riego de mala calidad, de altas cantidades de fertilizantes, de lodos residuales, uso extensivo de abonos, entre otros son las principales entradas de sales al suelo causando la degradación del recurso (Oster *et al.*, 1996, Tanji, 1996).



Ilustración 1.1 Paisaje dominado por la acumulación de sales en terrenos de uso común aledaños a terrenos agrícolas. Valle de Mexicali, B.C. / Fuente: Ibañes et al., (2016)

Tipo de sales en el suelo

De acuerdo a Porta (1994), las sales solubles que se acumulan en el suelo son la halita (NaCl), mirabilita (Na_2SO_4), Carbonatos y bicarbonatos de sodio y calcio (Na_2CO_3 , NaHCO_3), así como boratos y nitratos de sodio, aunque con menor frecuencia bicarbonatos. Estas sales se caracterizan por ser más solubles que el yeso por lo que son fácilmente transportables por corrientes de agua y pueden infiltrarse con facilidad entre las capas del suelo (Figura 1.2) (Richards, 1990; Tanji, 1996,).

Los problemas ocasionados por la acumulación de sales (toxicidad), en el suelo y en las plantas, está relacionado con la solubilidad y la concentración y su efecto está relacionado con la tolerancia al estrés hídrico de cada especie cultivada, por lo que en función de la concentración de sales, es posible predecir sus efectos potenciales sobre las plantas (Flynn, 2015).



Ilustración 1.2 Nodo número 16 una de las zonas más afectadas por la salinización, ubicada dentro del Complejo Geotérmico Cerro Prieto / Fuente: Ibañes et al., (2013)

1.3 Clasificación de suelos salinos

Los suelos afectados por sales y sodio son tradicionalmente evaluados a partir de la Conductividad Eléctrica (CE) y el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), ambos se obtienen mediante el método de extracción a partir de la pasta de saturación del suelo de acuerdo al manual de ISRIC (Reeuwijk, 2002). La tabla 1.1 muestra los sistemas de clasificación de suelos salinos más empleados y descritos por Bohn et al. (1985) y Richards (1990).

Tabla 1.1 Clasificación de los suelos salinos y salinos sódicos

Clasificación	Suelos no salinos	Suelos salinos	Suelos sódicos	Suelos salino-sódicos
Tradicional	CE < 4 dS/m⁻¹ PSI < 15	CE > 4 dS/m⁻¹ PSI < 15	CE < 4 dS/m⁻¹ PSI > 15	CE > 4 dS/m⁻¹ PSI > 15
Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo	CE < 2 dS/m⁻¹ PSI < 13	CE > 2 dS/m⁻¹ PSI < 13	CE < 2 dS/m⁻¹ PSI > 13	CE > 2 dS/m⁻¹ PSI > 13

Fuentes: (Bohn et al., 1985; Richards, 1990)

La reducción del límite de la CE y el PSI, dada por la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo se relaciona con la mayor sensibilidad de especies de importancia comercial (Bohn *et al.*, 1985). Adicionalmente, se recomienda la determinación del pH como referente del tipo de reacciones de las sales, lo que permite identificar la especie salina. En ese caso el pH menor a 8.5 está relacionado con reacciones neutras de las sales que son dadas por la presencia de sales de NaCl, Na₂SO₄, MgSO₄, MgCl, CaSO₄. Esta reacción es característica de los suelos salinos. El pH de 8 a 10 indica reacciones alcalinas relacionadas con la presencia de carbonatos, bicarbonatos y altos contenidos de sodio y/o magnesio, que dominan sobre el resto de cationes en el complejo de intercambio. Esta reacción es característica de los suelos sódicos y salino-sódicos (Aceves, 1989).

Desde el punto de vista agrícola, los procesos de salinización y sodificación del suelo tiene gran importancia, por lo que se han establecido diferentes escalas de afectación como la que se muestra en la tabla 1.2

Tabla 1.2 Clasificación de suelos salinos y salinos sódicos y su efecto en la producción

Clasificación	Intervalos		Efectos sobre las plantas
	CE(dSm ⁻¹)	PSI	
-Suelos-			
Ligeramente salinos	2-4		Altera rendimientos sensibles
Medianamente salinos	4-8		La mayoría de los cultivos reducen su rendimiento
Fuertemente salinos	8-12		Solo cultivos tolerantes
Extremadamente salinos	>12		No apto para cultivos convencionales (Plantas halófilas)
Suelos sódicos		-7	
Ligeramente sódicos		7-15	Reducción de la producción de 20 a 40% en suelos arcillosos
Medianamente sódicos		15-20	Reducción del 40 al 60%
Fuertemente sódicos		20-30	Reducción de producción del 60 al 80%
Extremadamente sódicos		+30	Reducción a más de 80%

Fuente: Aceves (1989).

1.4 Efecto de las sales en suelos y vegetación

El efecto de la salinidad sobre las plantas es diverso y variable. Existe una clasificación generalizada que agrupa las plantas en halófitas y no halófitas. Las primeras se refieren a aquellas plantas que poseen mecanismos de resistencia a la salinidad, aunque su grado de tolerancia es muy variable. La mayor parte de las plantas cultivadas, se consideran como no halófitas, siendo las más tolerantes la mayoría de los cereales.

En general, los paisajes de los suelos salinos se caracterizan por desarrollar una vegetación escasa, con frecuentes claros.

Los efectos de la salinidad se podrían agrupar bajo tres aspectos diferentes: relaciones hídricas, balance de energía y nutrición (Martínez Raya, 1996).

Relaciones hídricas: La concentración de sales solubles eleva la presión osmótica de la solución del suelo. Si tenemos en cuenta que el agua tiende a pasar de las soluciones menos concentradas a las más concentradas, con objeto de diluir éstas últimas e igualar las presiones osmóticas de ambas, se comprende que cuando la concentración salina de la solución del suelo es superior a la del jugo celular de las plantas, el agua tenderá a salir de éstas últimas hacia la solución del suelo. Este efecto llevó a Shimper (1903) a plantear la teoría de la sequedad fisiológica, en la que se postula que en medios salinos, aunque exista una humedad elevada, las plantas sufren estrés hídrico, se secan y acaban muriendo.

Balance energético: No obstante, esta teoría no describe completamente todos los efectos perjudiciales de la salinidad, ya que en ocasiones las plantas no sufren estrés hídrico sino que disminuyen considerablemente su altura. Para explicar este efecto, Bernstein (1961) desarrolló la teoría del ajuste osmótico, la cual propone que las plantas, al aumentar la presión osmótica de la solución del suelo, se ven obligadas

a una adaptación osmótica de sus células para poder seguir absorbiendo agua; adaptación que requiere un consumo de energía que se hace a costa de un menor crecimiento. Aceves (1979) propone la teoría de la división y el crecimiento celular, en la cual la disminución del crecimiento se atribuye a que las sales afectan a la división celular, producen un engrosamiento prematuro de las paredes celulares y limitan el crecimiento de forma irreversible.

Nutrición. En el aspecto nutricional, se produce una serie de importantes modificaciones, debido, por un lado, a las variaciones de pH que afectan a la disponibilidad de los nutrientes, y por otro, a las interacciones ocasionadas por la presencia en exceso de determinados elementos. Tal sucede con los cloruros y nitratos y fosfatos, el calcio y el sodio o los del potasio y sodio. La dominancia de calcio provoca antagonismos, entre otros, sobre el potasio, magnesio, hierro, boro y zinc. Sin embargo, existen relaciones de sinergismo entre potasio y el hierro y entre el magnesio y fósforo.

Igualmente la presencia en exceso de ciertos iones puede provocar toxicidad, debido a su acumulación en distintas partes de las plantas, como pueden ser las semillas, los tallos y las hojas. Los más significativos, en este aspecto, son los cloruros, el sodio y el boro.

La alcalinización del perfil produce una serie de consecuencias desfavorables para las propiedades fisicoquímicas del suelo. Los cambios estacionales producen el hinchamiento y contracción de las arcillas sódicas formándose una estructura prismática fuertemente desarrollada. Finalmente, como el medio se ha vuelto fuertemente alcalino, la cristalinidad de las arcillas disminuye y se vuelven inestables. La conductividad eléctrica ha sido el parámetro más extendido y el más ampliamente utilizado en la estimación de la salinidad. Se basa en la

velocidad con que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sales en solución. Esta unidad era representada en mho (por ser la unidad inversa al ohmio), porque la conductividad es la inversa de la resistencia, pero este nombre no está en las actuales normas por eso hasta hace unos años se expresaba en mmhos/cm, hoy día las medidas se expresan en dS/m (dS=deciSiemens), siendo ambas medidas equivalentes ($1 \text{ mmhos/cm} = .1 \text{ dS/m}$). Por tanto la CE refleja la concentración de sales solubles en la disolución. Para distinguir suelos salinos de no salinos, se han sugerido varios límites arbitrarios de salinidad. Se acepta que las plantas empiezan a ser afectadas de manera adversa cuando el contenido en sales excede del 1%. La clasificación americana de suelos, Soil Taxonomy, adopta el valor de 2 dS/m como límite para el carácter salino a nivel de gran grupo y subgrupo, pues considera que a partir de ese valor las propiedades morfológicas y fisicoquímicas del perfil (y por tanto la génesis) quedan fuertemente influenciadas por el carácter salino. Mientras que el laboratorio de salinidad de los EE.UU. ha establecido el límite de 4 dS/m para que la salinidad comience a ser tóxica para las plantas, es decir que el agua salada entra en el suelo, la planta trata de absorberla a través de las raíces como si fuera agua normal, pero el agua salada no permite que se realice ósmosis a través de los tejidos de la planta, esta es tan densa que la solución salada en realidad saca agua de la planta, deshidratándola y eventualmente matándola.



Ilustración 1.3 *Nodo número 10. Sorgho (Sorghum sp.). Punto de muestreo ubicado al centro norte del distrito donde se presentan niveles medios de salinidad con afectaciones parciales en el rendimiento de los cultivos / Fuente: Ibañes et al., (2013)*



Ilustración 1.4 *Vista parcial de la zona de estudio donde se puede observar que el terreno es totalmente plano, un factor más que propicia la salinización / Fuente: Ibañes et al., (2010)*

La distribución de la vegetación se regula por algunos factores edáficos como el pH, salinidad y nutrientes disponibles, para solventar esto, las plantas han encontrado estrategias de adaptación para establecerse en condiciones ecológicas específicas. Las plantas pueden clasificarse dependiendo de las condiciones del suelo, en particular con respecto a las concentraciones de sales solubles y pueden considerarse como halófitas y glicófilas. La presencia de sales en la solución del suelo (en la zona radicular) puede causar cambios en las plantas de tipo nutricional, balance de energía efectos osmóticos o pueden tener afectaciones secundarias por cambios en las propiedades del suelo (Tanji, 1996). Las alteraciones están relacionadas con una reducción del crecimiento, retardo en la germinación, marchites, cambio de coloración de las hojas, reducción de biomasa, reducción del área foliar, muerte de las plantas (Bresler *et al.*, 1982).

La concentración de solutos afecta el potencial osmótico de la solución del suelo en el que se encuentran las raíces. El cambio del potencial osmótico interno y externo de la planta dificulta la entrada de agua o propicia la salida del agua de las plantas. Esto causa una desecación osmótica de las células; además causa déficit de agua disponible, y por lo tanto una menor absorción por las plantas, ya que se presenta una reducción de la presión de conducción del agua en el xilema. El déficit de agua y la concentración de sales provoca deficiencia nutricional ya que disminuye la absorción de iones importantes como el potasio y nitrógeno entre otros, importantes en los procesos metabólicos. La disminución de la tasa de crecimiento de las plantas está relacionada con el aumento del gasto energético, por ajustes bioquímicos para el desarrollo (Tanji, 1990). La presencia de compuestos como el sodio y el cloro pueden causar alteraciones metabólicas, propiciando una menor síntesis de proteínas y una menor tasa fotosintética y de respiración. De manera secundaria las alteraciones

en las propiedades físicas y químicas del suelo causan la disminución de la germinación de las semillas y desarrollo de las plántulas por encostramiento, así como estrés hídrico en las plántulas por la disminución de infiltración del agua de las zonas radiculares (Van Hoorn, 1998).



Ilustración 1.5 Nudo de muestreo número 13. Algodón (Gossypium sp.). Punto de muestreo ubicado al centro del distrito donde se presentan altos niveles de salinización bajando considerablemente la productividad de la planta / Fuente: Ibañes et al., (2016)

Las diferentes concentraciones de salinidad no siempre es un problema ya que la distribución de algunas comunidades vegetales (halófilas) se encuentra determinada por esta condición. Las estrategias de adaptación de estos organismos contemplan un sin número de mecanismos de respuesta como son: la inclusión, exclusión, proceso importante ya que se establece un ajuste al interior de la planta permitiendo el aprovechamiento del agua. En las plantas moderadamente sensibles bajo moderada salinidad puede haber acumulación de sales en las raíces y en

los tallos para evitar la exposición de las hojas y así disminuir los efectos directos sobre la fotosíntesis (Tanji, 1996). Además puede darse la eliminación de las sales mediante glándulas de secreción, caída de hojas senescentes, translocación a otros órganos. Dentro de las plantas de importancia agrícola pueden citarse las siguientes especies tolerantes (Tabla).

Tabla 1.3 Valores de tolerancia a la salinidad de cultivos comerciales en Mexicali

Cultivo	CE dS m ⁻¹
Frijol	4 a 10
Maíz	8 a 12
Espinaca	2 a 14
Betabel	4 a 14
Algodón	8 a 26
Remolacha	7 a 23

Fuentes: INTAGRI, AgroEs

1.5 Métodos de evaluación de la salinidad

La capacidad del agua para conducir la electricidad aumenta con la concentración de sales. De esta forma, midiendo la conductividad eléctrica del agua mediante un electrodo, se puede estimar su salinidad de forma rápida y fiable. Dicha conductividad eléctrica del agua depende de la temperatura por lo que, para realizar comparaciones válidas la conductividad eléctrica debe expresarse en relación a una temperatura de referencia que habitualmente es de 25°C. esto quiere decir que cuanto mayor es la conductividad mayor es la concentración de sales del agua. Los aparatos que se usan para medir la conductividad eléctrica se llaman conductímetros.

Mediante análisis de laboratorio para la medición de la salinidad en los suelos se realizó lo que comúnmente se denomina "pasta saturada del suelo", para posteriormente obtener el extracto de saturación que es donde se medirá la conductividad eléctrica. El procedimiento se lleva a cabo añadiendo agua destilada a una muestra de suelo, mezclándolos hasta hacer una pasta que esté saturada de agua. Se obtiene entonces el extracto de saturación por filtración de la pasta mediante una bomba de succión, y se realiza la medida de conductividad eléctrica del mismo. Con este valor de conductividad eléctrica en extracto de saturación (CEes) se puede clasificar el grado de afectación por salinidad del suelo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Caracterización de la zona de estudio

El distrito de riego 014 se encuentra en el estado de Baja California, en el municipio de Mexicali, dentro del llamado valle de Mexicali. La zona de estudio es una extensión de territorio de aproximadamente 32980 hectáreas, es un clima desértico con escasas lluvias con una temperatura media anual de 22.4 °C, una precipitación media anual de 79 mm. La superficie es plana con altitudes que van de los 3 a los 15 mts sobre el nivel del mar.

2.1.1 Caracterización regional

El Valle de Mexicali pertenece a la cuenca hidrológica del Río Colorado, dividida en cuenca alta y cuenca baja. La cuenca alta la conforman 4 estados de la unión americana: Wyoming, Colorado, Utah y Nuevo México y la cuenca baja está integrada por 3 estados de la unión americana: Arizona, Nevada y California y dos de México (Baja California y Sonora), en total: 9 estados y dos países involucrados.

El distrito de riego 014 en Mexicali B. C. se encuentra en el Valle de Mexicali (Figura 2.1), definido con la clave 0210 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se ubica en el extremo norte del estado de Baja California, en el municipio de Mexicali; colinda al norte con Estados Unidos de América, al este con el acuífero Valle de San Luis Río Colorado, Sonora, al oeste con Laguna Salada y al sur con el Golfo de California. El Valle de Mexicali cubre una superficie de 4908 km² (Figura No. 1) y se localiza entre los paralelos 32° 43' 7.2" y 31° 38' 52.3" de latitud norte y 115° 48' 54.2" y 114° 43' 8.9" de longitud oeste del Meridiano de Greenwich.

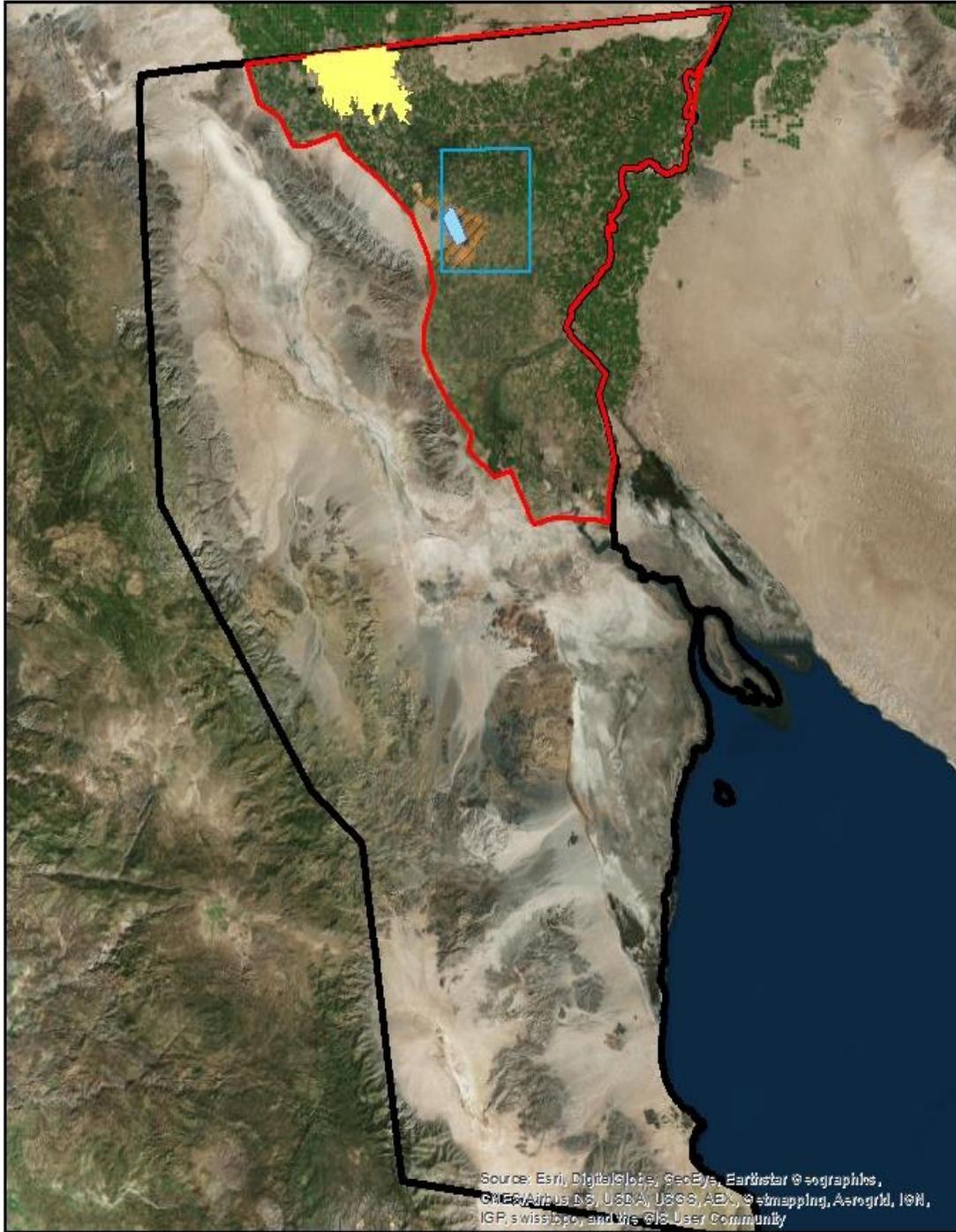


Ilustración 2.1 Vista general del Municipio de Mexicali (negro), Valle de Mexicali (rojo) y el área de estudio (azul). / Fuente: Proyecto "Actualización del diagnóstico del Riesgo de afectación del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto sobre los suelos del Valle de Mexicali Baja California, México"

2.1.2 Clima

Tomando como referencia la información histórica proporcionada por las estaciones meteorológicas a cargo de las diferentes instituciones públicas y académicas dentro de la región, los principales subtipos climáticos de acuerdo a García (2004) son los siguientes:

BW(h´) hs(x) (e´). Muy seco cálido con temperatura media anual mayor de 22° C y del mes más frío inferior a 18° C, siendo el porcentaje de lluvia invernal mayor a 18 mm, pero menor de 36 mm. La precipitación media anual es de 89 mm y la evaporación de 2458.9 mm (Datos de la estación Bataques a cargo de CNA, 2010). Estas condiciones son representativas de la región norte y centro del Valle de Mexicali y la zona de Laguna Salada.

BWhw(x´) Muy seco, semicálido con invierno fresco. Régimen de lluvias en verano con % de lluvia invernal mayor de 10.2 y menor de 18 mm. La precipitación media anual es de 79.4 mm y la evapotranspiración de 2410.4 mm (Datos de la estación Col. Juárez a cargo de CNA, 2010), representativo de la porción este y suroeste del Valle de Mexicali.

De acuerdo a los datos de la estación Cerro Prieto (CFE), los vientos dominantes provienen de dos direcciones y en dos periodos del año: el primero de diciembre a mayo del noroeste con una velocidad promedio de 2.23 m/s y el segundo durante los meses de junio a noviembre con vientos del sureste y una velocidad promedio de 2.29 m/s.

El clima prácticamente en todo el municipio de Mexicali es muy seco-cálido por ende el distrito de riego en estudio que es solo una porción de este territorio, cuenta solo con un clima que es el mismo del municipio, muy seco cálido.

2.1.3 Geología

La composición litológica del valle está dominada por materiales de depósitos del Pleistoceno de dos tipos: fluviales y aluviales.

Los depósitos aluviales provienen del arrastre de materiales detríticos de la parte serrana de la parte oeste del municipio de Mexicali y están constituidos por limos y arenas de grano fino y medio de cuarzo y feldespatos. Los depósitos fluviales proceden de los cauces más importantes dentro de la zona, principalmente los ríos Colorado y Hardy y están constituidos por acumulaciones intermitentes de arcillas, limos y arenas o mezclas de ellos (INEGI, 1983).

La porción del valle, delimitada por el polígono de trabajo se ubica en una zona tectónica muy activa debido a que prácticamente forma parte del sitio de contacto entre la placa del Pacífico y la Norteamericana. Dentro del municipio de Mexicali se localiza un sistema de fallas conocido como Laguna Salada – Cucapáh con orientación noroeste – sureste (González, 1986). El sismo más reciente ocurrió el 4 de abril de 2010 con una intensidad de 7.2 grados en la escala de Richter (Sistema Sismológico Nacional, 2010).

En cuanto a la geología según el plan de ordenamiento ecológico del ayuntamiento de Mexicali el tipo de roca que predomina en Mexicali es la roca sedimentaria. Sin embargo la zona de estudio no está dentro de las clasificaciones de roca que el INEGI tiene en sus bases de datos debido a que la zona de estudio es muy pequeña y se encuentra sobre depósitos aluviales

2.1.4 Hidrología

El estado de Baja California posee escasos recursos hídricos debido a la baja precipitación pluvial y a la limitada presencia de lagos, ríos, arroyos y manantiales. El río Colorado es el más importante de la entidad y la

principal fuente de agua dulce del estado, tiene una extensión de 96 kilómetros y es el único que cuenta con agua todo el año.

El municipio de Mexicali es el único que no padece de escasez de agua, gracias a que el 88% del total de los recursos hidrológicos del Estado se localizan en el Valle de Mexicali, de los cuales el río Colorado aporta el 57%. Como alivio para abastecer la demanda en el resto del estado se construyó el acueducto Mexicali-Tijuana y el de Valle de Guadalupe-Ensenada.

El campo geotérmoelectrico Cerro Prieto y sus alrededores son parte de la región hidrológica del Río Colorado cuyo recorrido dentro del municipio tiene una longitud de 187 Km. Su caudal es utilizado para consumo humano y riego agrícola, para lo cual se tiene asignado un volumen de 1850 234 m³/año.

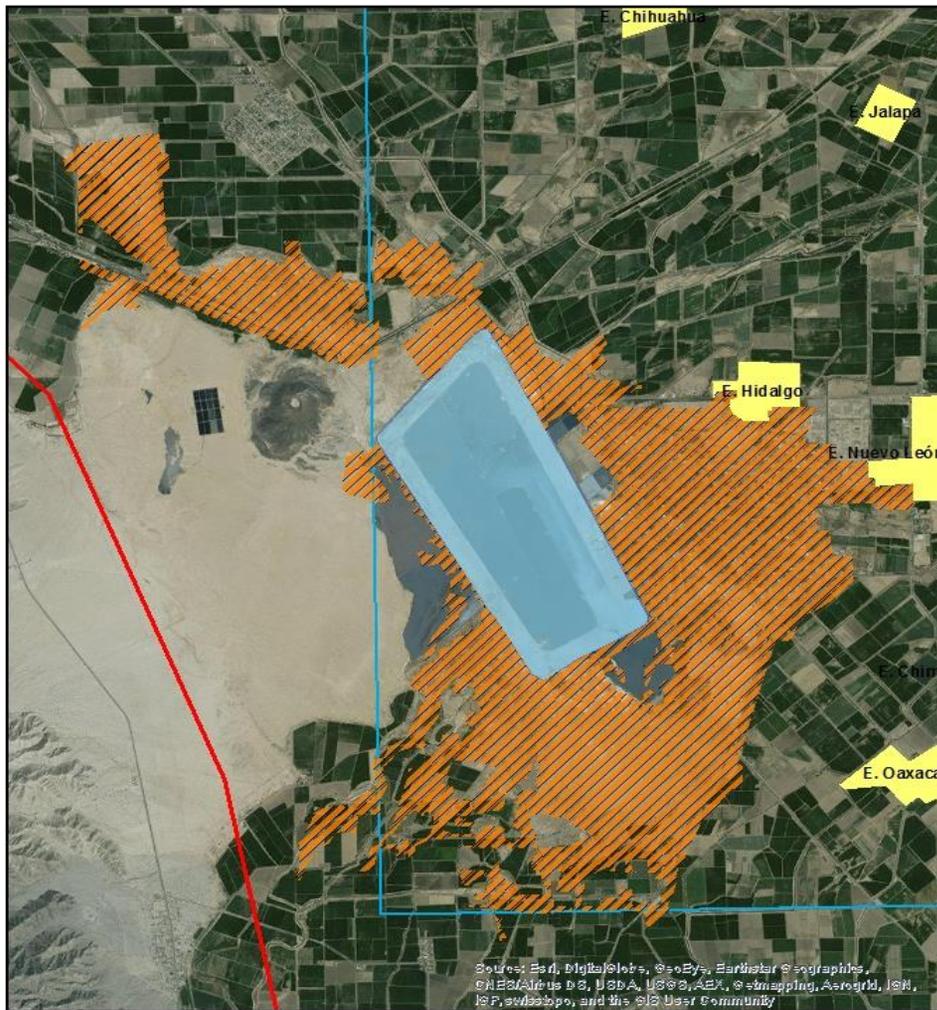


Ilustración 2.2 Planta geo termoelectrica Cerro Prieto. / Fuente: Proyecto "Actualización del diagnóstico del Riesgo de afectación del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto sobre los suelos del Valle de Mexicali Baja California, México"

El sistema de drenes agrícolas cuenta con aproximadamente 1425 km de red primaria y secundaria, en tanto que los canales de conducción de agua de riego tiene una extensión de 3442 km de red primaria y secundaria, recubiertos con concreto hidráulico. Por lo que concierne a la hidrología subterránea, el acuífero del Valle de Mexicali tiene una recarga media anual de 700 millones de m³ y junto con el caudal del Río Colorado, proveen al Distrito de Riego 014 de agua para las actividades agrícolas. Se han indicado incrementos en la salinidad proveniente del agua del Río Colorado y se estima que actualmente alcanza las 1000 ppm, con incrementos anuales de 6.4 ppm. El agua del acuífero tiene una concentración de 1800 ppm con incremento anual de 21.8 ppm (SFE-BC, 2009)

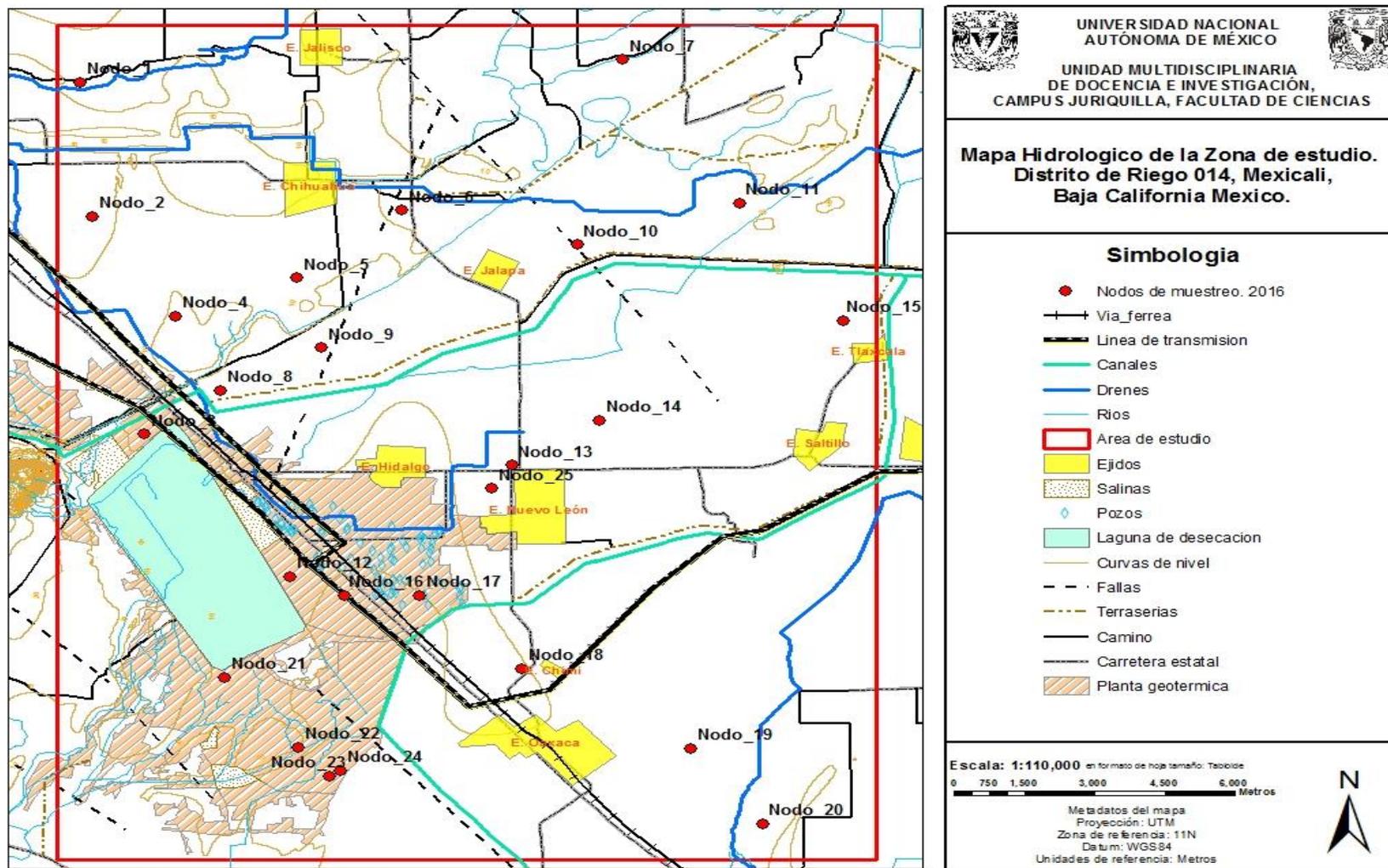


Ilustración 2.3 Mapa Hidrológico de la zona de estudio / Fuente: Proyecto "Actualización del diagnóstico del Riesgo de afectación del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto sobre los suelos del Valle de Mexicali Baja California, México



Ilustración 2.4 Panorámica del canal primario Reforma dentro del Valle de Mexicali, B.C. / Fuente: Ibáñez et al., 2010)

El Rio Colorado, alimentador de esta cuenca, nace en las montañas rocallosas, en la Cordillera Front, al norte del estado de Colorado, con extensión aproximada de 2,334 km, y junto a sus tributarios, sirve a más de 30 millones de personas.

2.1.5 Edafología

Los suelos predominantes en el Estado de Baja California son los llamados yermosoles y xerosoles que se les caracteriza por tener una capa superficial de tonalidades claras y un subsuelo rico en arcilla y que son característicos de zonas áridas y semiáridas, pobres en materia orgánica, los cuales con agua de riego y fertilización adecuada son capaces de elevada producción agrícola.

Por otro lado los suelos en el valle de Mexicali mediante estudios actuales realizados para esta investigación (Ibáñez-Huerta & García-Calderón 2010; Ibáñez-Huerta, 2013) e (INEGI 2002-2007) determinaron la génesis y clasificación de los suelos para el Valle de Mexicali, identificando la prevalencia de diferentes grupos de suelo (IUSS Working Group WRB, 2006) que a continuación se mencionan en la tabla

Tabla 2.1 Grupos de suelo registrados en el Valle de Mexicali, B.C.

Nombre del grupo de suelo	Clasificación WRB, 2006
Arenosoles próticos	Solonckaks hipersálicos
Cambisoles háplicos (calcáricos)	Solonetz cálcicos, mólicos y cálcicos
Regosoles háplicos	Fluvisoles sálicos
Vertisoles cálcicos	

Fuentes: Ibáñez-Huerta & García-Calderón (2010) e Ibáñez et al. -Huerta (2013)

2.1.6 Uso de suelo y vegetación

La vegetación en el valle de Mexicali es muy limitada ya que corresponde al clima desértico donde predominan las plantas xerofilas (de clima seco, como los mezquites agaves y cactus). A diferencia de los lugares donde las precipitaciones son mayores como las altas montañas, se dan bosques de coníferas.

Los tipos de vegetación y el uso de suelo dominantes en la zona son el matorral desértico micrófilo, vegetación halófila (*Tamarix sp*, *Plechea sericea*, *Atriplex sp*) matorral de desiertos arenosos, vegetación de galería y agricultura de riego (INEGI, 2001).

Los principales procesos de cambio de uso de suelo dentro de la zona consisten en la remoción de remanentes de vegetación natural para establecer zonas de cultivo o asentamientos humanos próximos a éstas.

Así, sólo el 62 por ciento de la superficie del valle es susceptible de explotación agrícola. El grado de mecanización agrícola es de los más avanzados en esta tecnología.

El uso del suelo es agrícola, industrial y turístico. El agrícola está concentrado en el Valle de Mexicali con más de 200 mil hectáreas de tierras fértiles, que está clasificado en los de alta productividad, mediana, baja y muy baja. El de mediana productividad ocupa el primer lugar en producción, le sigue el de alta productividad. El industrial se encuentra concentrado en la zona urbana, algunas empresas están ubicadas a lo largo de la vía del ferrocarril y por lo regular son industrias de transformación. El turístico está ubicado principalmente en el río Hardy y el puerto de San Felipe.



Ilustración 2.5-2.10 Actividades agrícolas en el Valle de Mexicali, B.C. / Fuente: Ibáñez et al. 2010



Ilustración 2.11-2.15 Actividades industriales dentro del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto. Mexicali, B.C. / Fuente: Ibañez et al. 2016

2.2 Metodología

Preparación y análisis de muestras de suelo superficial

Se hicieron perfiles en el suelo para obtener muestras de suelo que representaran de la mejor manera la esencia del suelo. Estas muestras de suelo fueron debidamente identificadas, con informaciones de la parcela (cultivos, insumos y ubicación geográfica, topográfica y catastral), del responsable de la muestra (nombre, dirección, localidad, teléfono) y profundidad de muestreo

Obtención de indicadores de salinidad: pH, CE, PSI

Mediante equipo de laboratorio se realizaron estudios para obtener las concentraciones de los indicadores de salinidad y sodicidad (pH), (CE), (PSI).

Evaluación de tendencias de salinización en suelos 2010, 2016

Se evaluaron los resultados obtenidos en laboratorio para conocer si existió una variabilidad en los niveles de concentración de los tres parámetros indicadores de salinidad y sodicidad.

Generación de cartografía temática mediante el método de interpolación IDW

Mediante el uso de software ArcGis 10.2 se realizó la interpolación de los datos obtenidos en esta última etapa (2016), mediante el uso del método de la distancia inversa ponderada, con el cual se generaron los mapas de distribución de la salinidad a partir de los datos obtenidos en campo (2016) y los datos que ya se tenían con anterioridad (2010), para así realizar una comparación entre las 2 épocas y conocer la dinámica que las sales han tenido en el transcurso de 6 años.

2.2.1 Delimitación de la zona de estudio.

La zona de estudio se localiza al centro del distrito de riego 014 Rio Colorado debido a la cercanía del complejo geotérmico de cerro prieto la cual cuenta con una extensión territorial de 33,000 hectáreas donde fueron distribuidos estratégicamente los 25 puntos de muestreo.

Para efecto de esta investigación, se generó cartografía digital a partir de la carta topográfica 1:50,000 de INEGI (2014), sobre la cual se definió un polígono de estudio con una superficie de 32979 hectáreas y coordenadas de los puntos extremos

	X	Y
Punto 1 NE	676727.5878	3599224.725
Punto 2 SE	677052.6689	3579026.211
Punto 3 SO	660748.5245	3578727.513
Punto 4 NO	660414.1804	3598961.646

2.2.2 ubicación y muestreo

Sobre el mapa digital se sobrepusieron las capas digitales referentes al uso de suelo, geología y suelos. Los criterios de decisión para la ubicación de 25 puntos de muestreo consistieron en a) su proximidad a los terrenos del complejo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) (distancia máxima de 13 km del centro del complejo); b) representación de los diferentes grupos de suelo, definidos en estudios previos y c) preferentemente su proximidad con caminos y brechas de acceso. Para cada punto de muestreo se obtuvieron coordenadas de ubicación y se trazaron rutas para realizar los recorridos en campo.

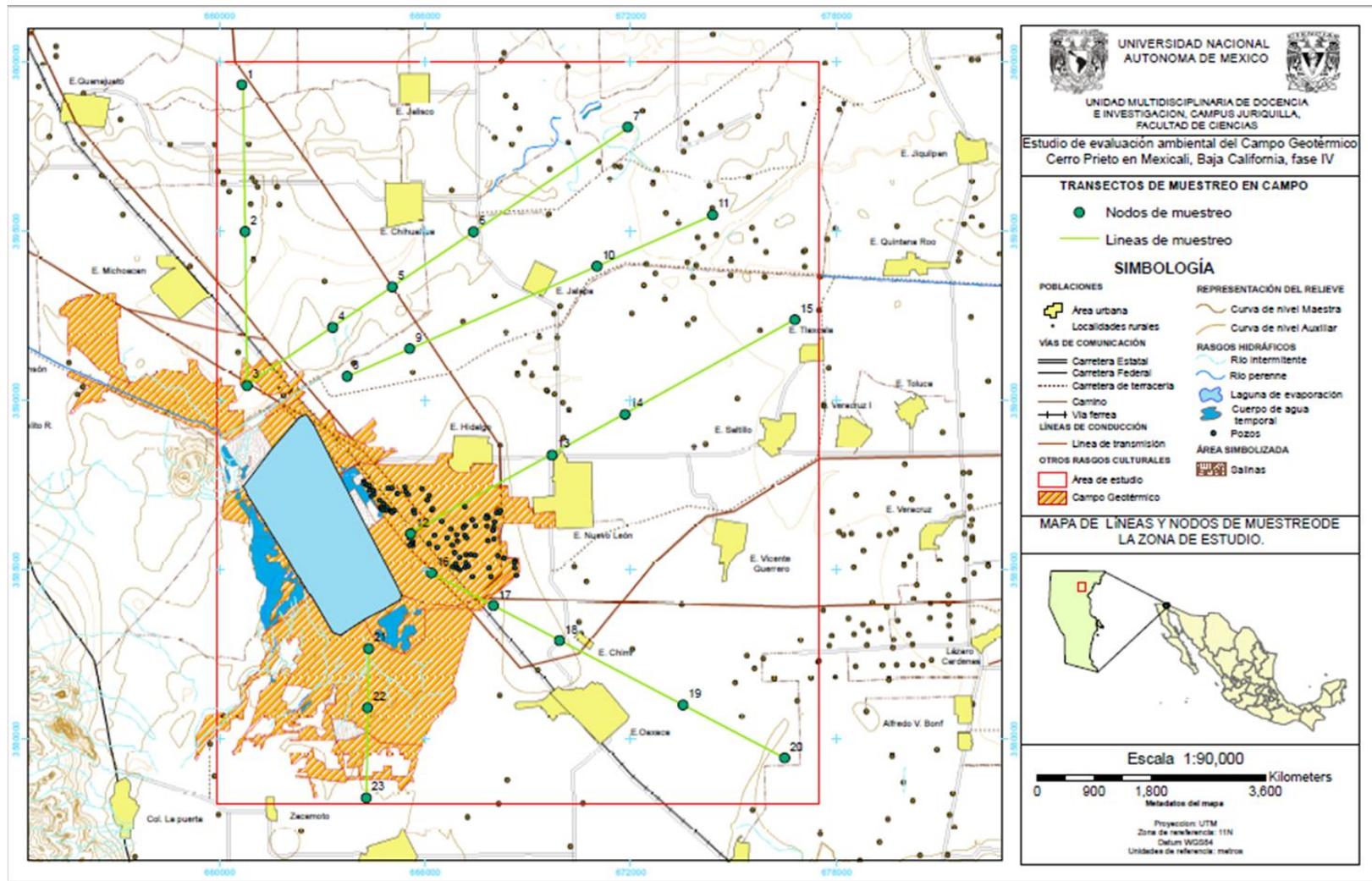


Ilustración 2.16 Mapa de la zona de estudio transectos y puntos de muestreo definidos. / Fuente: Proyecto "Actualización del diagnóstico del Riesgo de afectación del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto sobre los suelos del Valle de Mexicali Baja California, México"

2.2.3 Trabajo de campo

En cada punto de muestreo se tomaron muestras de suelo bajo un esquema de cinco repeticiones en puntos concéntricos dentro de una circunferencia de 20 m de diámetro. Cada muestra que se tomó a una profundidad de 30 cm fue registrada embolsada y etiquetada para su posterior análisis en laboratorio (figura 2.17)



Ilustración 2.17 Toma de muestras de suelo para su análisis en laboratorio. / Fuente: Ibáñez et al., 2016

2.2.4 Trabajo de laboratorio

La preparación de las muestras de suelo consistió en su secado a temperatura ambiente, triturado y tamizado en malla de 2 mm de apertura y almacenamiento en botes de polietileno.

Para el análisis de suelo se tomaron muestras representativas, reduciendo el tamaño de la muestra mediante cuarteos sucesivos hasta obtener una cantidad aproximada de 500 g. Los análisis de laboratorio se realizaron considerando los métodos establecidos por el ISRIC (2002) y la Norma Oficial Mexicana 021 (cita) que establece los métodos para determinar la fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.

Salinidad del suelo.

Para determinar la condición salina del suelo, se obtuvieron los cationes y aniones del extracto de la pasta de saturación, de acuerdo a la NOM-021. A los extractos de saturación se les registró el pH y la Conductividad Eléctrica mediante un potenciómetro marca Korning y un conductímetro marca Hanna.

La determinación de cationes solubles (Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio), al igual que de aniones solubles (Cloruros, Sulfatos, Bicarbonatos y Carbonatos) se realizó a partir del extracto de la pasta de saturación y fueron realizados en el Laboratorio del Instituto de Geología UNAM. Posteriormente se obtuvieron los resultados los cuales fueron procesados para obtener el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) y el Rango de Adsorción de Sales (RAS) con los cuales se establecieron el índice de salinidad y/o sodicidad de los diferentes puntos de muestreo de acuerdo a los procedimientos propuestos por Richards (1990).

2.2.5 Análisis de la variabilidad espacial de la salinidad

Con objeto de entender la dinámica de la variabilidad en espacio y tiempo de la degradación de los suelos de la región, se retomaron datos de una fase de la investigación general obtenidos en el año de 2010 cuya información corresponde con el espacio geográfico y procedimientos analíticos realizados para este estudio. Bajo este marco, se pretende comparar los niveles de

salinidad entre 2010 y 2016 a partir de los mismos indicadores (pH, C.E., PSI y RAS).

A partir de los datos generados en ambas fases del estudio general y con base en la georreferenciación de cada punto, se realizó un análisis de la variabilidad espacial mediante el método de Interpolación Distancia Inversa Ponderada (IDW), empleando la paquetería de Arc Gis (V. 10.1). De esta forma se generaron mapas digitales de variabilidad espacial para los siguientes parámetros: pH, C.E. y PSI

Cabe mencionar que el método IDW determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación.

Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra. Por ejemplo, al interpolar una superficie de poder adquisitivo de los consumidores para analizar las ventas minoristas de un sitio, el poder adquisitivo de una ubicación más distante tendrá menos influencia porque es más probable que las personas compren cerca de sus casas.

Las herramientas de interpolación IDW (Distancia inversa ponderada) y Spline son consideradas métodos de interpolación determinísticos porque están basados directamente en los valores medidos circundantes o en fórmulas matemáticas especificadas que determinan la suavidad de la superficie resultante.

2.2.6 generación de cartografía partir del método IDW

Para la generación de mapas se trabajó con dos interpoladores que nos ayudarían a conocer la distribución de las sales a partir de puntos de muestreo con valor z. Los interpoladores que se usaron fueron el kriging y el método de distancia inversa ponderada (IDW)

Kriging. Es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores z.

Está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no solo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones.

El método kriging es similar al de IDW en que pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones

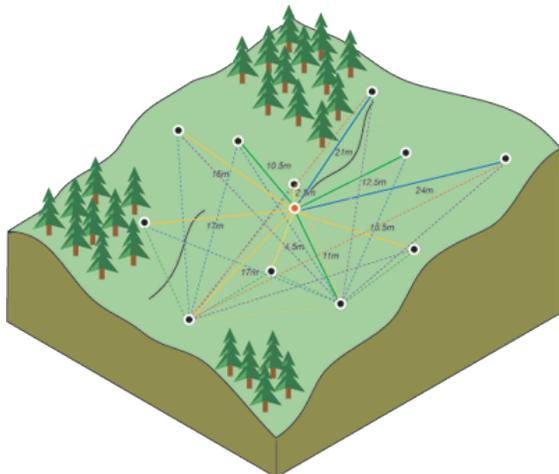


Ilustración 2.18 método de interpolación Kriging / Fuente: ESRI

Distancia Inversa Ponderada (IDW). La interpolación mediante distancia inversa ponderada determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación

El valor de salida para una celda que utiliza la distancia inversa ponderada (IDW) se limita al rango de valores utilizados para la interpolación. Dado que la IDW es un promedio de distancia ponderada, el promedio no puede ser mayor que la entrada máxima o inferior que la entrada mínima. Por lo tanto, no puede crear crestas o valles si estos extremos aún no se han muestreado (Watson y Philip 1985).

Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra. Por ejemplo, al interpolar una superficie de poder adquisitivo de los consumidores para analizar las ventas minoristas de un sitio, el poder adquisitivo de una ubicación más distante tendrá menos influencia porque es más probable que las personas compren cerca de sus casas.

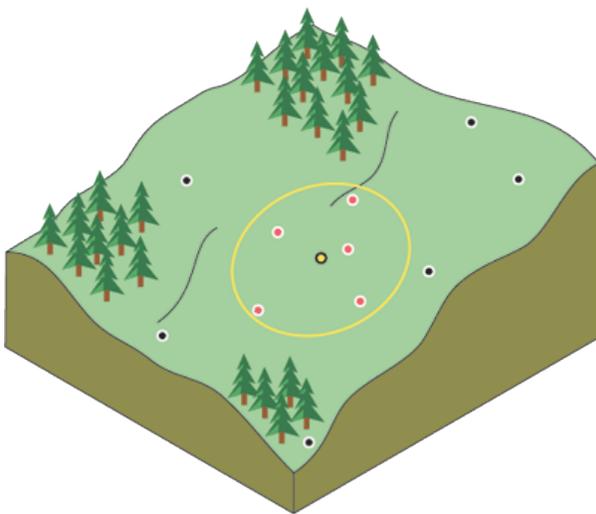


Ilustración 2.18 método de interpolación IDW / Fuente: ESRI

III. RESULTADOS

3.1 Indicadores de salinidad del suelo

Uno de los retos a los cuales nos hemos tenido que enfrentar ha sido el de interpretar la dinámica de la salinidad en los suelos afectados por la actividad del hombre y más aún en este distrito de riego, debido a que pertenece a una de las regiones mar áridas de México, donde la evaporación es mayor que las precipitaciones y como la distribución y concentración de las sales en el suelo es muy variable debido a las diferentes circunstancias del entorno que lo afectan sería erróneo dar un resultado exacto, pero por otro lado hemos podido acercarnos lo mayor posible a la realidad, con la ayuda de indicadores, estudios de suelo y modelos digitales estadísticos calculamos la variabilidad espacial de la sal en el distrito y nos dimos una idea de hacia dónde están aumentando las concentraciones de sal.

La salinidad como en la zona de estudio está ampliamente distribuida en el globo terráqueo y también como aquí se incrementa a medida que se presentan cambios climáticos mayores como los procesos geomorfológicos de sedimentación, erosión y redistribución de materiales; así como cambios en la hidrología superficial y subterránea.

Además de las extensas áreas afectadas que en los últimos 6 años se han incrementado debido fundamentalmente a los efectos del regadío, donde para garantizar el suministro de agua y tener agricultura, se ha implantado el riego, sin haber previsto la instalación de sistemas de drenaje, lo que ha conllevado al incremento de la salinidad de los suelos, agravando esto el valle de Mexicali va de los 3 a los 15 metros sobre el nivel del mar, existiendo muy poca pendiente para el dren del suelo.

Este problema se ha intensificado con otras fuentes adicionales como el uso de fertilizantes, la calidad del agua de riego y por las particularidades climáticas que aumentan las concentraciones de sal.

Por consecuencia de este aumento hemos visto que los suelos poseen problemas de salinidad, ya que en la zona radicular de las plantas, es restringido o totalmente imposible su crecimiento y desarrollo. Sin embargo es posible obtener aceptable productividad de plantas tolerantes a la sal, esto basado en que el problema ha sido correctamente diagnosticado, sobre la base del conocimiento y magnitud del problema.

Los puntos de muestreo para la zona de estudio se establecieron estratégicamente partiendo de la ubicación del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto e irradiando los transectos y puntos de muestreo hacia la zona agrícola aledaña a este complejo industrial y tomando en cuenta los sitios de interés en base a la información disponible sobre actividades y procesos que pudieran afectar al distrito. La planeación y el procedimiento de muestreo como la localización y el número de muestras fue fundamental para actividades posteriores que dieron a conocer la dinámica de las sales así como de su evidente aumento. A continuación se presentan los resultados para los indicadores de salinidad.

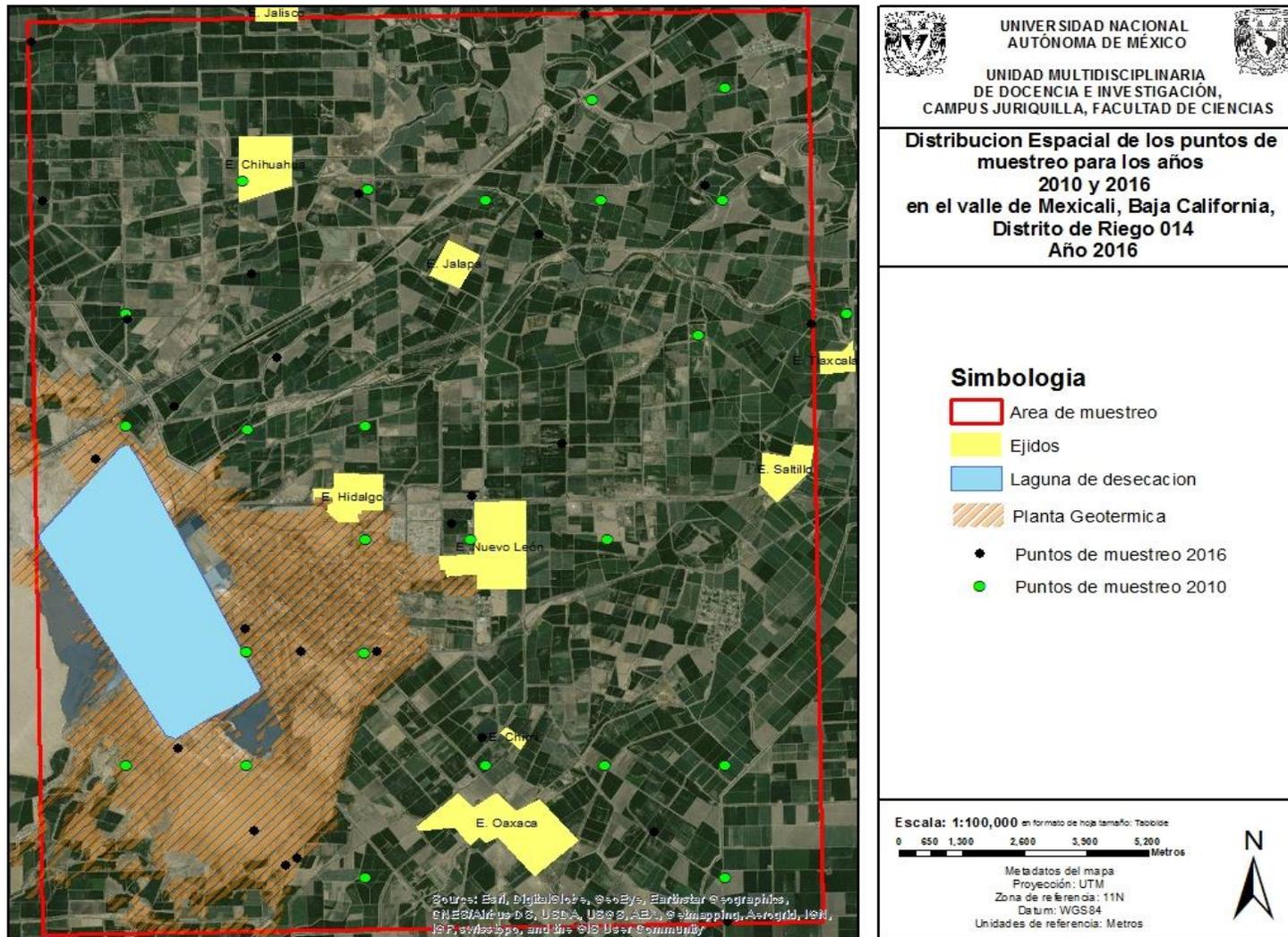


Ilustración 3.1 Puntos de muestreo para los años 2010 y 2016 / Fuente: Proyecto "Actualización del diagnóstico del Riesgo de afectación del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto sobre los suelos del Valle de Mexicali Baja California, México.

3.1.2 pH del suelo

El pH del suelo nos ha aportado una información de suma importancia. Una de la más importante deriva del hecho de que las plantas tan solo pueden absorber los minerales disueltos en el agua, con esto encontramos que la variación del pH modifica el grado de solubilidad de los minerales en el suelo. Por ejemplo, el aluminio y el manganeso son más solubles en el agua edáfica a un pH bajo, y cuando tal hecho ocurre, pueden ser absorbidos por las raíces, siendo tóxicos a ciertas concentraciones. Por el contrario, determinadas sales minerales que son esenciales para el desarrollo de las plantas, tal como el fosfato de calcio, son menos solubles a un pH alto, lo que tiene como resultado que bajo tales condiciones sean menos disponibles a ser absorbidos y nutrir las plantas. Obviamente en la naturaleza, existen especies vegetales adaptadas a ambientes extremadamente ácidos o básicos.

Los valores del pH se reducen a medida que la concentración de los iones de hidrógeno incrementan, variando entre un rango de 0 a 14. Los valores por debajo de 7.0 son ácidos, valores superiores a 7.0 son alcalinos y/o básicos, mientras que los que rondan el valor de 7.0 son denominados neutrales. Por cada unidad de cambio en pH hay un cambio 10 veces en magnitud en la acidez o alcalinidad (por ejemplo: un pH 6.0 es diez veces más ácido que uno de pH 7.0, mientras que un pH 5.0 es 100 veces más ácido que el de pH 7.0 es por eso que las variaciones de pH en el suelo del distrito de riego son muy poco variables.

El pH del suelo es generalmente considerado adecuado en agricultura si se encuentra entre 6 y 7. En algunos suelos, incluso con un pH natural de 8, pueden obtenerse buenos rendimientos agropecuarios. Sin embargo, a partir de tal umbral las producciones de los cultivos pueden mermarse. En la mayoría de los casos, los pH altos son indicadores de la presencia de sales solubles,

por lo que se requeriría acudir al uso de cultivos adaptados a los ambientes salinos. Del mismo modo, un pH muy ácido, resulta ser otro factor limitante para el desarrollo de los cultivos. En este caso el pH oscila entre 7 y 7.8 lo que quiere decir que los suelos que se estudiaron en el distrito son un tanto alcalinos

Para este estudio se generaron los mapas de distribución espacial para los años de 2010 y 2016, mismos que se presentan a continuación:

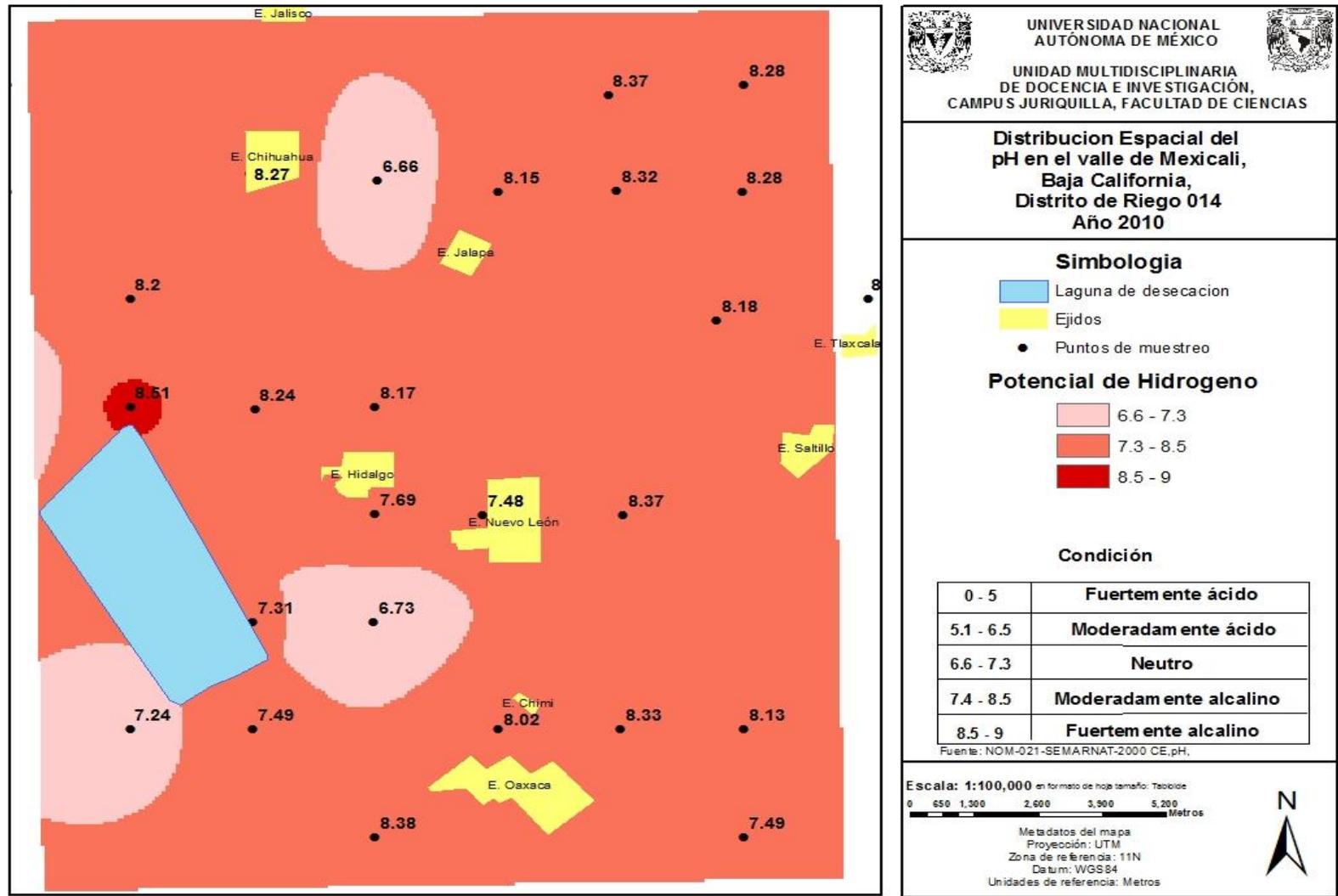


Ilustración 3.2 Mapa de distribución espacial del pH para el año 2010 / Fuente: Proyecto "Actualización del diagnóstico del Riesgo de afectación del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto sobre los suelos del Valle de Mexicali Baja California, México"

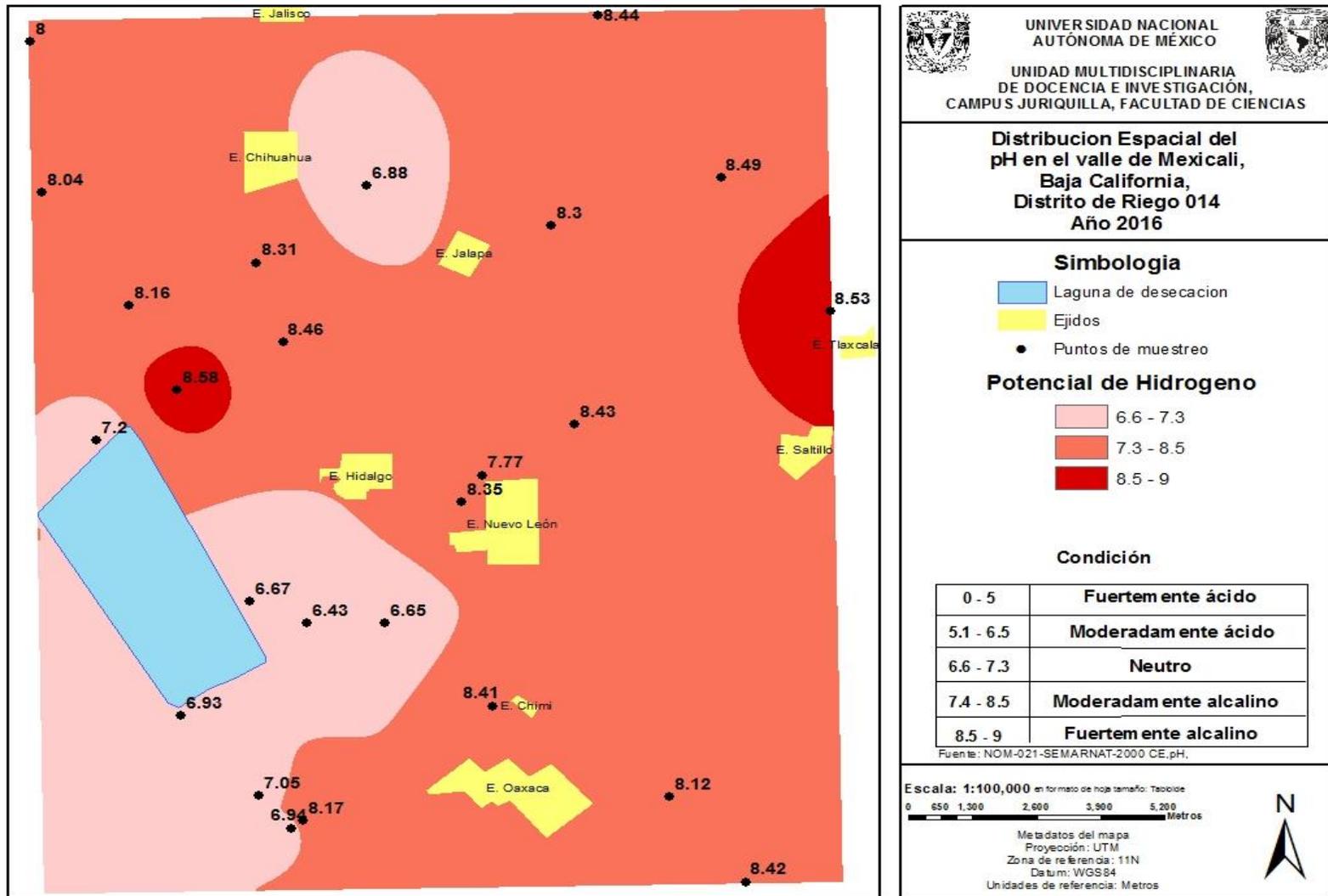


Ilustración 3.3 Mapa de distribución espacial para el año de 2016. / Fuente: Proyecto "Actualización del diagnóstico del Riesgo de afectación del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto sobre los suelos del Valle de Mexicali Baja California, México"

Tabla 3.1 Cambios en la condición de pH para los suelos de la zona de estudio en el periodo 2010 – 2016

pH						
Condición	Superficie (2010)		Superficie (2016)		Perdida/Ganancia	
	Hectáreas	%	Hectáreas	%	Hectáreas	%
Fuertemente ácido	0	0	0	0	0	0
Moderadamente ácido	0	0	0	0	0	0
Neutro	3161.21	9.5	7685.15	23.3	4523.94	13.71
Moderadamente alcalino	29682.42	90	24270.9	73.59	-5411.52	-16.40
Fuertemente alcalino	132.07	0.4	1019.31	3.09	887.24	2.69
TOTAL	32975.7	100%	32975.36	100.00%		

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 1.5 se muestran los parámetros obtenidos en el sitio de estudio para el caso del pH en los años 2010 y 2016. Como se puede observar los valores de pH para el año 2010 fluctúan de neutro a moderadamente alcalinos (6.4 a 8.58). El 90 por ciento de la superficie tiene un pH moderadamente alcalino, en consecuencia, si tenemos un suelo alcalino, por mucho fósforo que este tenga de forma natural, o por mucho hierro que apliquemos, la planta presentará carencias de fosforo y de hierro, puesto que estos elementos a pesar de estar en el suelo, se encuentran retenidos por el calcio, formando un compuesto insoluble que la planta no puede asimilar.

Para la fase de estudio desarrollada en noviembre de 2016, se tomó la misma cantidad de muestras distribuidas en toda la zona de estudio en diferente lugar, esto para conocer si se han dado cambios en el comportamiento del pH del suelo. Para esta nueva fase se determinó que en una fracción reducida de suelos prevalecieron condiciones ligeramente ácidas, lo que no se había presentado en la fase anterior. Entre los factores que pudieran incidir en este cambio aparente puede mencionarse la gran variabilidad en las condiciones fisicoquímicas de los suelos, probablemente el uso excesivo de fertilizantes así como las condiciones de drenaje deficiente en algunos suelos. En el caso de los suelos con pH moderadamente alcalino, que representaban 29682 hectáreas para el 2010, disminuyó a 24270 hectáreas para el 2016 como lo muestra la siguiente gráfica, para los suelos fuertemente alcalinos para el 2010 cubrían una superficie de solo 132 hectáreas lo cual aumento para el 2016 a 1019 hectáreas.

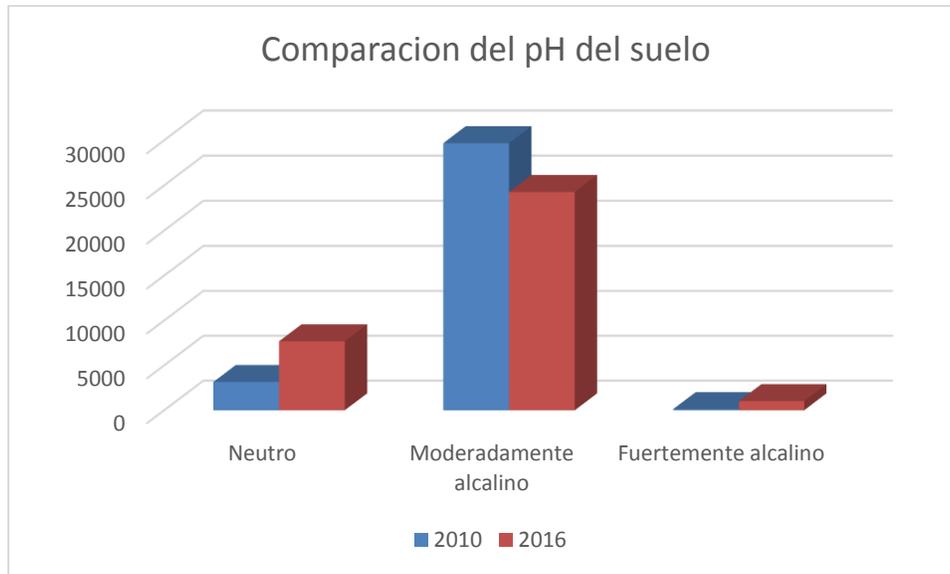


Ilustración 3.4 Clases de pH para los suelos de la zona de estudio. / Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico es un buen indicador de la presencia de sales en el suelo; La determinación de este indicador es fundamental para tomar las decisiones de manejo del suelo, adicionalmente, su conocimiento permite tener elementos para decidir: a) el tipo de cultivo y variedad a establecer de acuerdo a su tolerancia a los niveles de salinidad presentes en el suelo, b) el sistema de cultivo, ya sea surcos o en melgas y c) La intensidad en el manejo del agua en los sistemas de riego.

La importancia del contenido de sales a través del valor de CE, permite tomar la decisión de utilizar el suelo para fines agrícolas o no hacerlo. A continuación se muestran los mapas de distribución espacial y tabla de coberturas por clase de CE para los años de 2010 y 2016

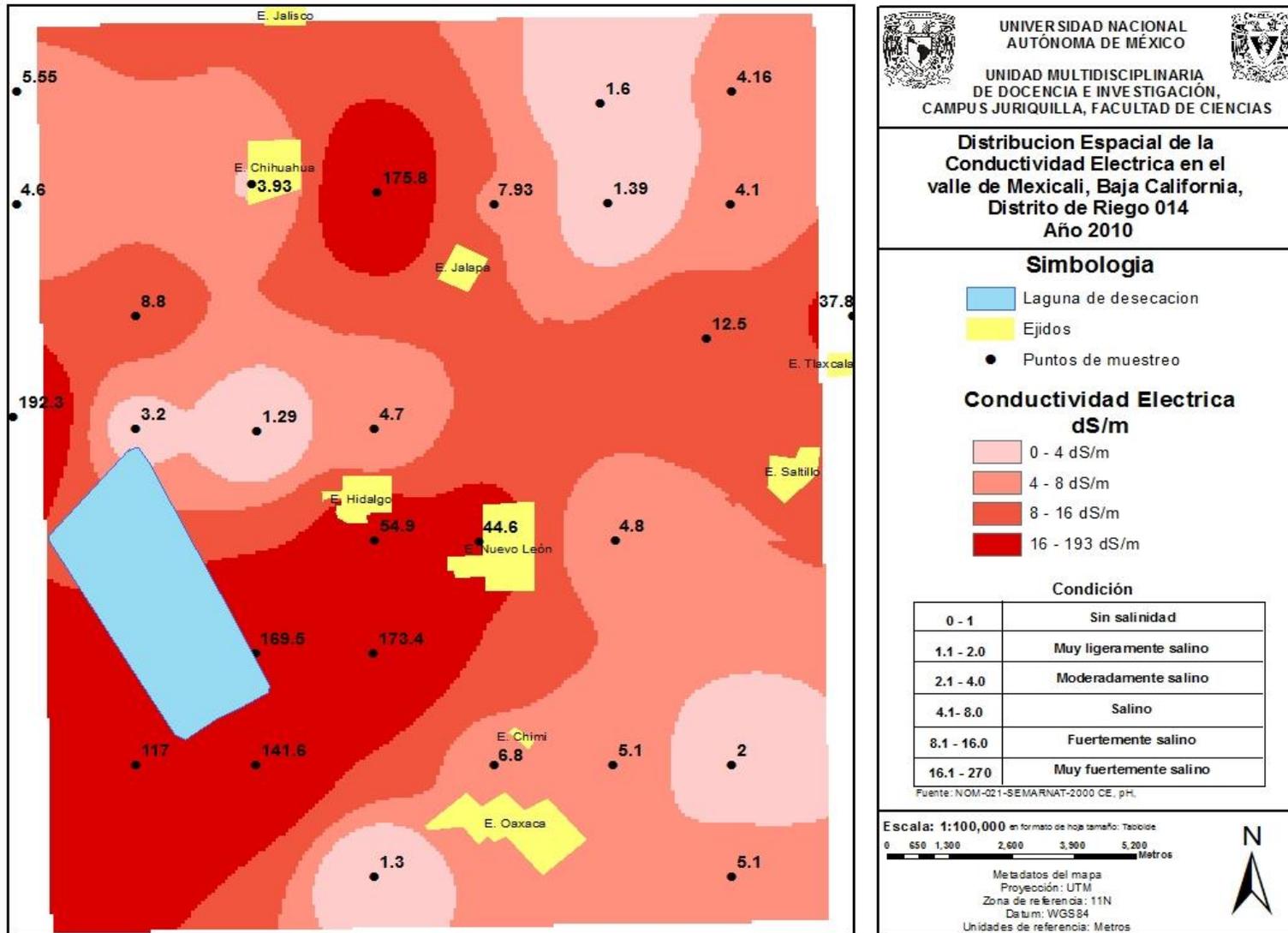


Ilustración 3.5 Mapa de distribución espacial de la conductividad eléctrica para 2010. / Fuente: Proyecto "Actualización del diagnóstico del Riesgo de afectación del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto sobre los suelos del Valle de Mexicali Baja California, México"

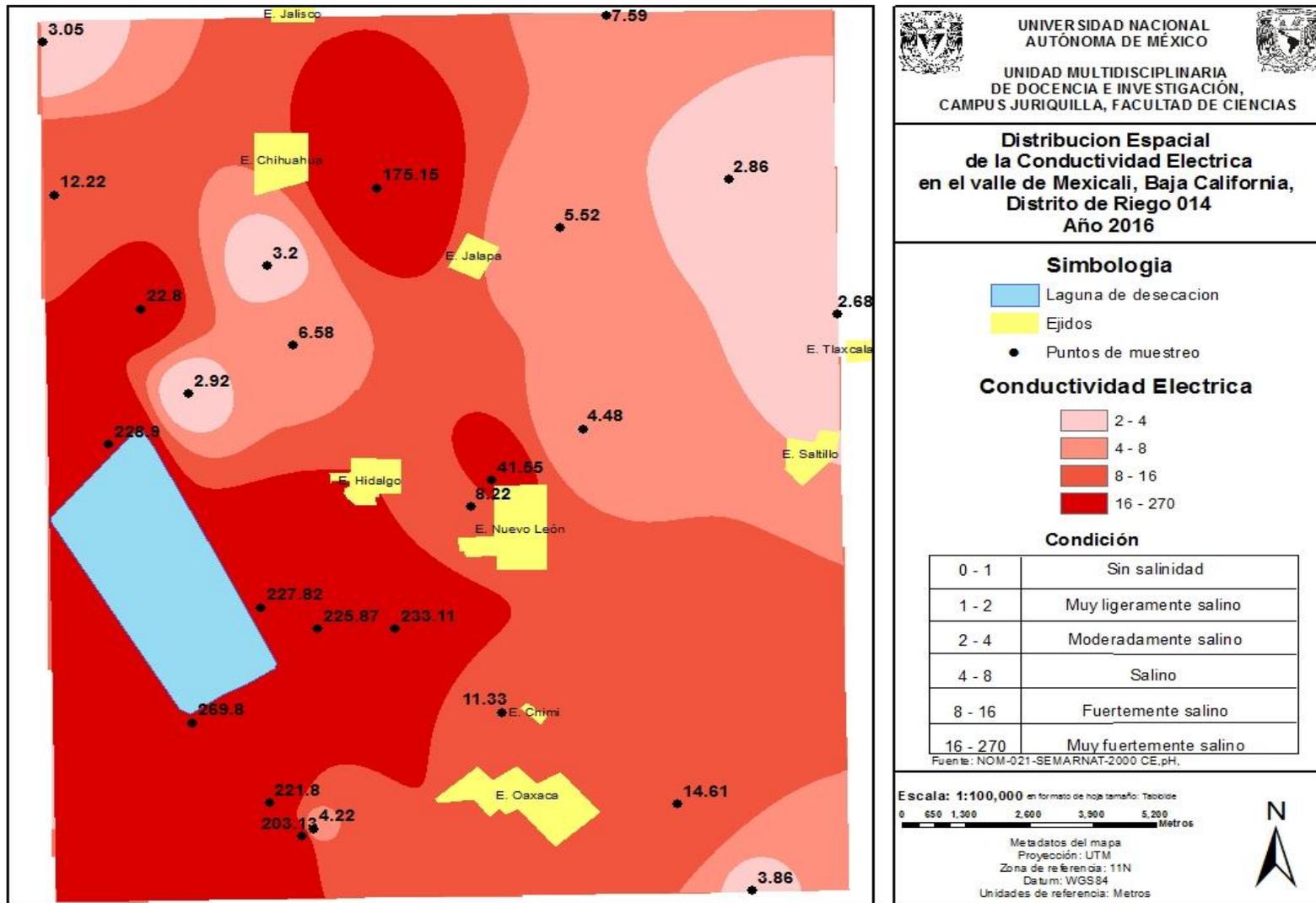


Ilustración 3.6 Mapa de distribución espacial para la conductividad eléctrica e 2016. / Fuente: Proyecto "Actualización del diagnóstico del Riesgo de afectación del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto sobre los suelos del Valle de Mexicali Baja California, México"

Tabla 3.2 Clases de Conductividad Eléctrica para los suelos de la zona de estudio

CE						
Condición	Superficie (2010)		Superficie (2016)		Perdida/Ganancia	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Sin salinidad	0	0	0	0		
Muy ligeramente salino	0	0	0	0		
Moderadamente salino	4046.8	12.27	3374.67	7.23	-672.13	-5.04
Salino	12235.96	37.1	7464.43	22.15	-4771.53	-14.95
Fuertemente salino	9561.47	28.99	12071.6	39.91	2510.13	10.92
Muy fuertemente salino	7135.26	21.63	9986.58	30.69	2851.32	9.06
TOTAL	32979.49	99.99%	32979.97	99.98%		

Fuente: Elaboración propia

La conductividad eléctrica como se muestra en la tabla 3.2, para el año 2010 registraba suelos moderadamente salinos a suelos muy fuertemente salinos y los suelos con mayor presencia en la zona eran los suelos salinos con un 37 % del total (12,235 hectáreas aproximadamente).

Para el año 2016 se observa un cambio en la conductividad eléctrica ya que lo que nos indica la conductividad eléctrica es que se están intensificando los procesos de acumulación de sales ya que ahora el suelo con mayor presencia es el fuertemente salino con un 39% (12,071 hectáreas) del total mientras que los suelos salinos ahora son del 22% del total (7,464 hectáreas)

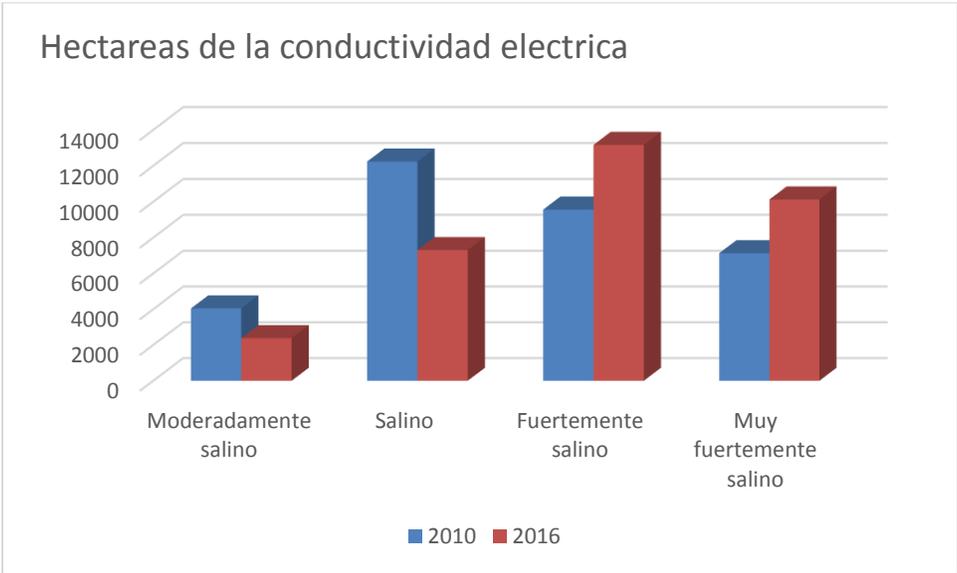


Ilustración 3.7 Cobertura para las clases de conductividad eléctrica / Fuente: Elaboración propia

3.1.4 Porcentaje de Sodio Intercambiable

Los suelos sódicos contienen alta cantidad de Sodio intercambiable y bajo nivel de sales solubles es por esto que cuando el porcentaje de sodio intercambiable es mayor a 15 los suelos presentan principios de sodicidad.

El exceso de Sodio intercambiable tiene efecto adverso sobre el crecimiento de plantas y estructura del suelo y su acumulación se traduce en reducción en los rendimientos de cultivos.

En los suelos sódicos, las partículas de arcilla tienden a separarse. Este proceso de disociación técnicamente se denomina dispersión. Las fuerzas que mantienen unidas a las partículas de arcilla se interrumpen por los iones de Sodio.

Quedan por consiguiente establecidas las siguientes categorías de suelos

Tabla 3.3 Valores de referencia para suelos salinos y salino sódicos

Clasificación	Valores de CE/PSI	
Suelos no salinos	< 4 dSm ⁻¹	PSI < 15%
Suelos salinos	> 4 dSm ⁻¹	PSI < 15%
Suelos sódicos	< 4 dSm ⁻¹	PSI > 15%
Suelos salino sódicos	> 4 dSm ⁻¹	PSI > 15%

Fuente: Aceves (1989)

A continuación se muestran los mapas de variabilidad espacial para Porcentaje de Sodio Intercambiable y su tabla de cobertura por clases para los años 2010 y 2016

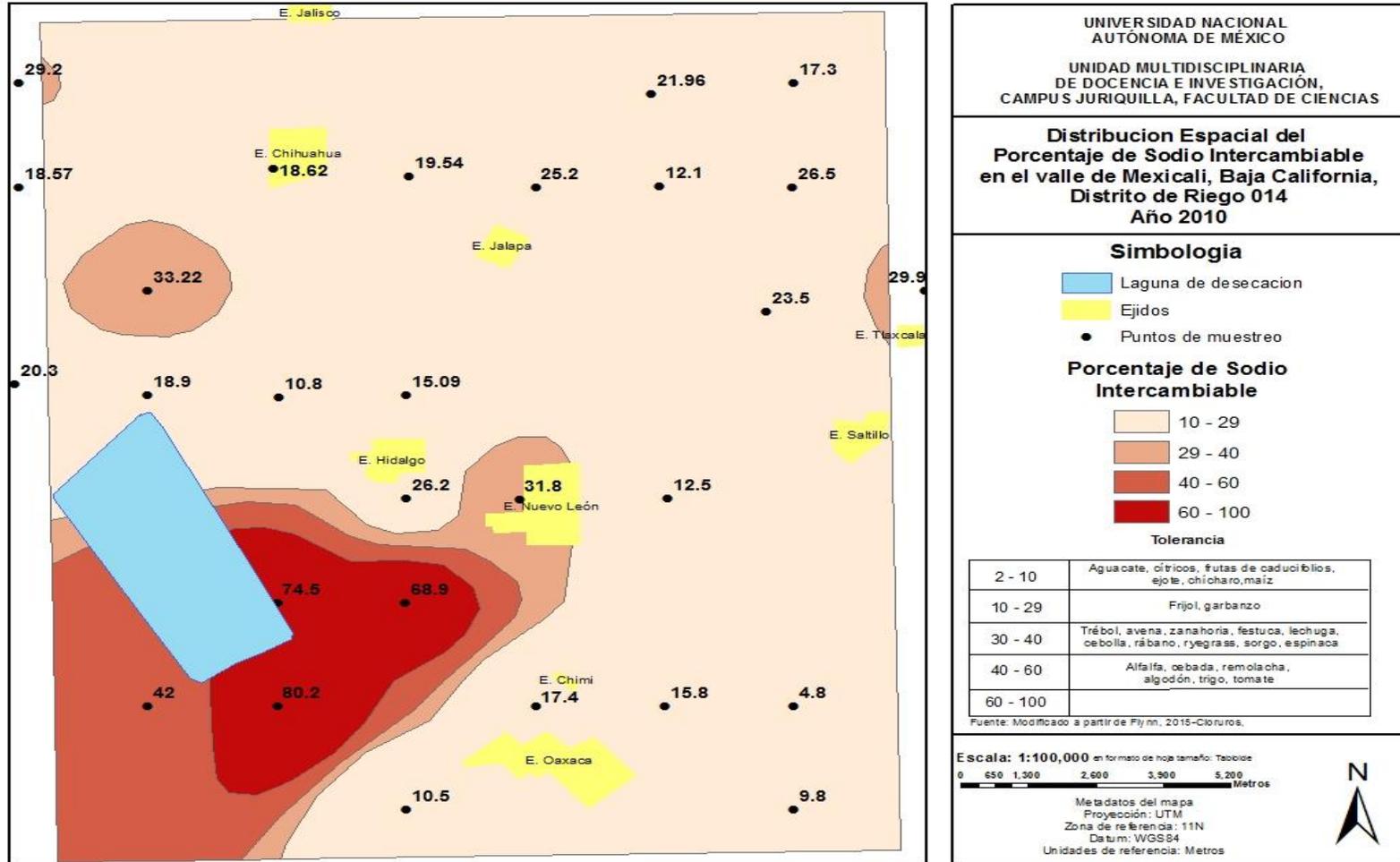


Ilustración 3.8 Mapa de distribución espacial para el Porcentaje de Sodio Intercambiable en 2010. / Fuente: Proyecto “Actualización del diagnóstico del Riesgo de afectación del Complejo Geotermoelectrico Cerro Prieto sobre los suelos del Valle de Mexicali Baja California, México”

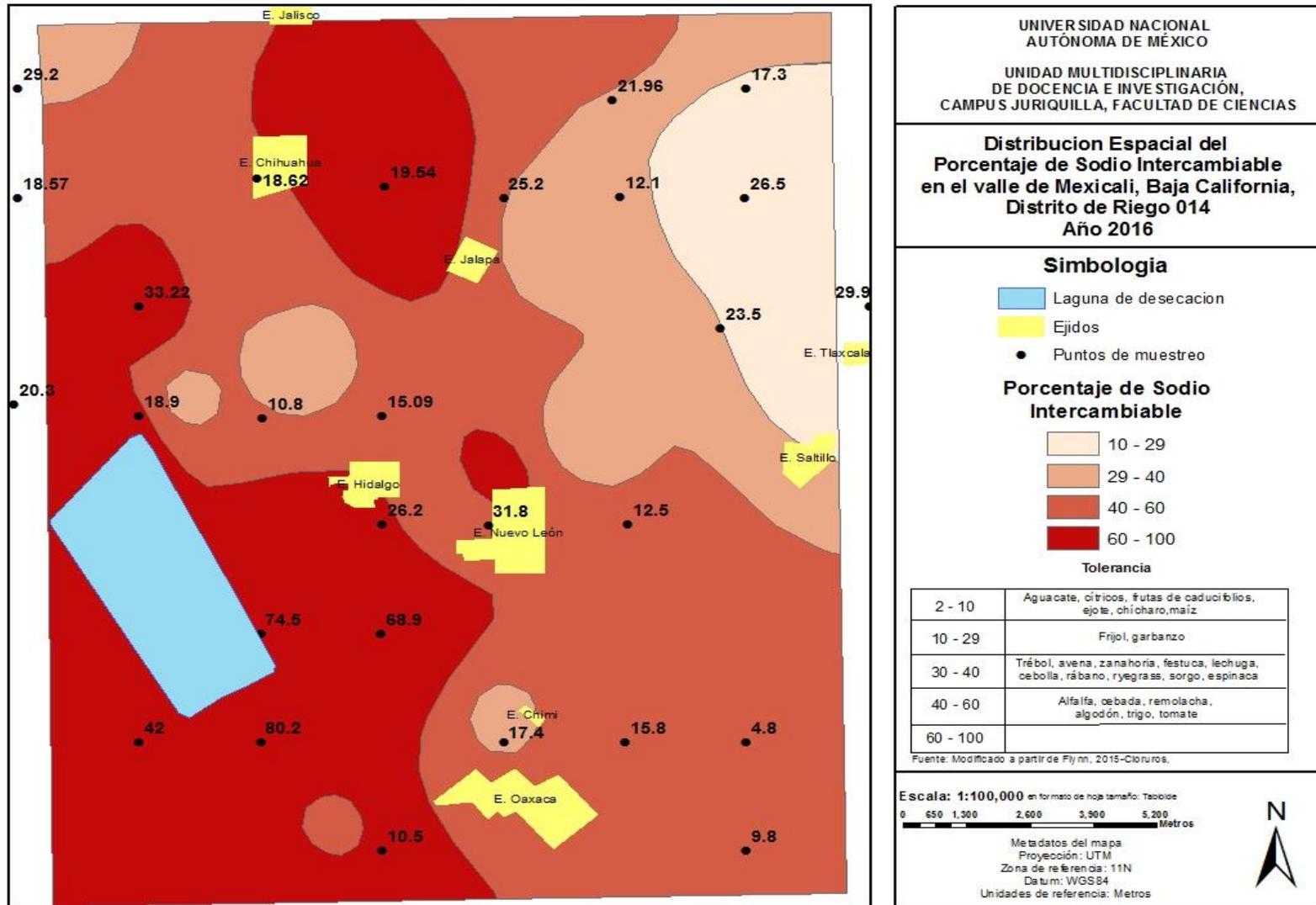


Ilustración 3.9 Mapa de distribución espacial para el Porcentaje de Sodio Intercambiable en 2016. / **Fuente:** Proyecto "Actualización del diagnóstico del Riesgo de afectación del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto sobre los suelos del Valle de Mexicali Baja California, México"

Tabla 3.4 Cobertura de las clases de Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) para los suelos de la zona de estudio

Porcentaje de Sodio Intercambiable						
Condición	Superficie (2010)		Superficie (2016)		Perdida/Ganancia	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Ligeramente sódicos	0	0	0	0		
Medianamente sódicos	25337.63	76.82	2384.5	7.23	-22953.13	-69.59
Fuertemente sódicos	2168.61	6.57	4863.45	14.74	2694.84	8.17
Muy fuertemente sódicos	3066.08	9.29	14182.47	43	11116.39	33.71
Extremadamente sódicos	2407.28	7.29	11547.91	35.01	9140.63	27.72
TOTAL	32979.6	99.97%	32978.33	99.98%		

Fuente: Elaboración propia

El PSI presente en el año 2010 era de 76 % en suelos medianamente sódicos (25,337 hectáreas), 6.5 % fuertemente sódicos (2,168 hectáreas), 9.2 % muy fuertemente sódicos (3066 hectáreas) y 7.2 % eran extremadamente sódicos (2,407 hectáreas).

6 años después los suelos se volvieron más sódicos existiendo con el 43 % (14,182 ha) suelos muy fuertemente sódicos, 35% (11,547 ha) extremadamente sódicos, 14% (4,863 ha) fuertemente sódicos y con el 7 % (2,384 ha) suelos medianamente sódicos. A continuación se presenta una gráfica de la variación del porcentaje de sodio intercambiable que se ha dado en 6 años en los suelos del distrito 014 en Mexicali baja california

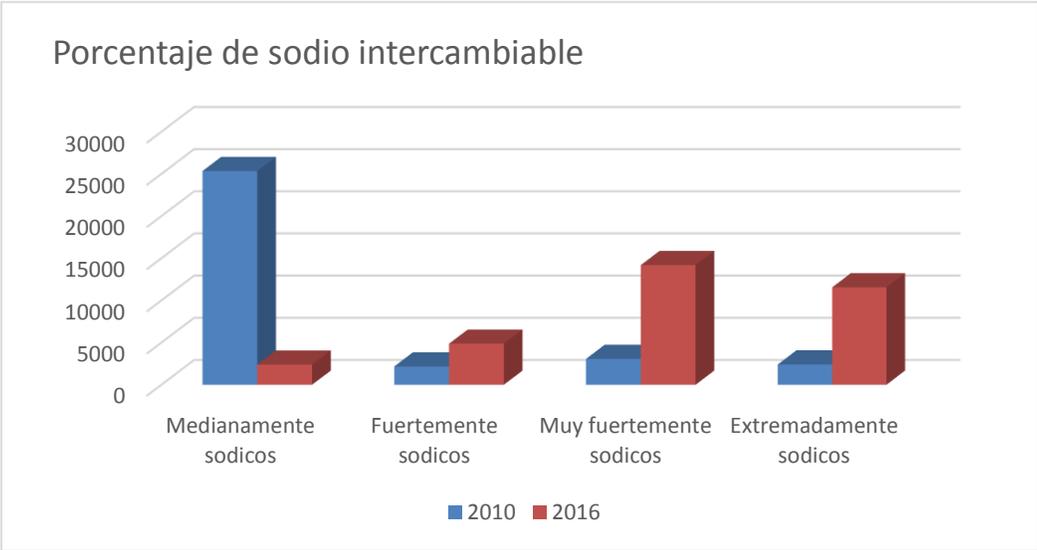


Ilustración 3.9 Porcentaje de sodio intercambiable / Fuente: Elaboración propia

IV. Discusión

4.1 Muestreo

El muestreo de 25 puntos que se realizó estratégicamente para este estudio y que no necesariamente coincide con el muestreo igualmente de 25 puntos del estudio anterior (2010), puede variar irrisoriamente debido a que se realizaron en diferentes épocas, diferentes condiciones y en diferentes lugares. Sin embargo los promedios para los tres indicadores aumentaron cuantiosamente y tienden a ser similares, siendo que coinciden en gran parte con las características de la edafología del lugar donde la salinidad aumenta cerca del complejo donde los suelos son de la clase solonchak (Mapa Digital en Línea INEGI 2002- 2007)

Con esto, si bien puede haber pequeñas variaciones en los datos debido a las circunstancias en tiempo y espacio de los muestreos, no es algo que afecte de manera significativa a los resultados obtenidos.

4.2 Implicaciones de la salinidad sobre las actividades productivas

Los suelos del distrito de riego 014 en Mexicali, B. C. tiene una tendencia natural a la salinización ya que está localizado en una zona árida, pero no es la causante principal, agudizando esta situación también se empezaron a utilizar para los sembradíos agua proveniente del Rio Colorado y del canal Wellton-Mohawk, provenientes del bombeo subterráneo que presentaban altos niveles de concentración de sales.

La proporción de las sales totales que se encuentran en el distrito indican que en el transcurso de 6 años han aumentado considerablemente los niveles de salinidad, ya que los promedios en términos de conductividad eléctrica han aumentado, como lo muestran los resultados, que para el 2010 la condición "fuertemente salino" cubría una superficie de 9561.47

hectáreas que representan el 28.99 % del total de la superficie en estudio y la condición "muy fuertemente salino" cubría una superficie de 7135.26 hectáreas que representa el 21.63 % del total, algo que para el 2016 aumento, siendo para la condición "fuertemente salino" de 13164.37 hectáreas representando ahora el 39.91 % y para la condición "muy fuertemente salino" de 10124.1 hectáreas representando ahora el 30.69 % del total del área de estudio.

Para los puntos de muestreo se escogió un método estratégicamente, mediante una ubicación geográfica primeramente analizada en escritorio que fue el punto de partida para posteriores modificaciones, tomando en cuenta los sitios de interés en base a la información disponible sobre actividades y procesos que pudieran afectar al distrito. La planeación y el procedimiento de muestreo como la localización y el número de muestras fue fundamental para actividades posteriores que dieron a conocer la dinámica de las sales así como de su evidente aumento.

La profundidad del muestreo fue de hasta 1:60 metros de profundidad, esto para obtener un mejor resultado de la condición del suelo mediante la recolección de muestras para el posterior análisis en laboratorio

En la toma de la muestra se tuvo en cuenta que cada una fuera del mismo volumen que las demás para así representar la misma sección transversal del suelo y misma cantidad de cada muestra

Existe una relación directa entre la CE y el desempeño del crecimiento vegetal. "Los niveles elevados de CE en el sustrato pueden ser una señal de demasiado contenido de sodio y cloruro en el agua; y que pueden ser resultado del exceso de fertilización," comenta Fisher.

La salinidad presente en el distrito ha sido crucial para el desarrollo de diferentes cultivos siendo claro que el aumento causa estragos en los cultivos ya que La salinidad afecta el ritmo de la absorción de los

minerales nutritivos como el Potasio (K^+), Nitrato (NO_3^-), Fósforo ($PO_4^{=}$), Calcio (Ca^{2+})., aunque también algunas plantas son más tolerables que otras a la sal. Debido a que la salinidad está en aumento hemos obtenido otros parámetros que delaten la presencia de esta, como lo es el conocer los niveles de la conductividad eléctrica, pH y el porcentaje de sodio intercambiable, con esto sabemos que cuanto mayor sea la cantidad de sal disuelta más fácilmente podrá conducir la corriente eléctrica entonces serán mayores los niveles de salinidad pues aumentará la conductividad del medio acuoso. Si se hiciera lo mismo sustituyendo la sal por azúcar se vería que la disolución resultante no es conductora, debido a que el azúcar no es un electrolito.

Los efectos de la sal han comenzado a disminuir el desarrollo de las plantas debido a que los sistemas radicales no se desarrollan en forma óptima, un sistema radical afectado por la salinidad es menos profundo (raíz), tiene menos ramificaciones y es menos eficiente a la absorción de nutrientes y agua.

Cada cultivo presenta una tolerancia distinta, además de que se ve afectado por otros factores como el clima, manejo y método de riego que se lleven.

Por ejemplo el frijol, la cebolla, la zanahoria y la fresa son algunos cultivos que son muy sensibles a la sal, el algodón, la cebada, la remolacha y los espárragos son algunos cultivos que son muy tolerantes a la sal en el distrito de riego los valores de la conductividad eléctrica son demasiado altos ya que van de los 3 hasta los 654 ds/m.

El exceso de fertilización, la baja tasa de lixiviación y la mala calidad del agua, han ocasionado que aumente la CE.

Las mediciones de CE no indican cuál tipo de sal está presente, ni tampoco especifican cuáles nutrientes están disponibles para el consumo de las

plantas; sin embargo, ayudan a los productores a decidir si las aplicaciones de fertilizante son excesivas o son insuficientes.

Cuando la CE en el sustrato es demasiado alta, se requiere una prueba de suelo realizada por un laboratorio para diagnosticar las causas del problema (por ejemplo: sodio del agua o nitrógeno del fertilizante). Las raíces sufren daños a altos niveles de CE y aumenta la susceptibilidad de las plantas a enfermedades como el Pythium.

Los niveles de pH elevados también representan un problema para las semillas en germinación y los esquejes que están enraizando. Considerando los valores obtenidos para este indicador químico, se pueden establecer las siguientes restricciones para algunos de los cultivos dentro de la zona de estudio (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 principales cultivos en el valle de Mexicali y su tolerancia a los niveles de pH

cultivo	Nivel óptimo de pH
Cebada	6 – 6.7
Algodón	5.5 - 6
Sorgo	5.5 – 7.5
Maíz	5.5 - 7
Cebollín	6.5 - 7
Alfalfa	6.2 – 7.5
Esparrago	6 - 6.8
Vid	6 – 6.5
Olivo	6 - 8
Nopal	6.5 – 8.5
Sandía	5 – 6.8
Melón	6 – 6.8
Trigo	5.5 – 7.5

Fuente: MA González Narváez. (2002)

El potencial de hidrogeno presente en el distrito de riego oscila entre 6.3 y 8.5 actualmente, donde la actividad principal es la agricultura con la producción de algodón, vid, sorgo, cebollín, alfalfa y trigo principalmente, ya que son unos de los cultivos más tolerantes a la salinidad del suelo, algo que ocasiona el aumento del pH haciéndolo más alcalino.

En el valle de Mexicali los suelos han ido intensificando su concentración de sales en la parte sur oeste de la región en estudio, debido a diversos factores entre los más comunes que son el uso de agua entubada, uso excesivo de fertilizantes, desertificación, suelos pobres en materia orgánica, poca cantidad de lluvias y temperaturas muy elevadas.

Es por esto que mucha gente ha abandonado las tierras de cultivo debido a que la producción agrícola ha ido disminuyendo.

Tabla 4.2 diferentes cultivos del valle y su tolerancia a diferentes valores de Conductividad Eléctrica dada en dS/m

cultivo	limite óptimo de CE dS/m
Cebada	8
Algodón	7.7
Sorgo	6.8
Maíz	1.7
cebollín	1.2
Alfalfa	2
Vid	1.5
Olivo	5
Nopal	1.5
Sandia	.9
Palmera datilera	4

Fuente: MA González Narváez. (2002)

La CE también es más alta en la zona sur oeste donde las tierras se han ido abandonando, en este caso este parámetro que indica la facilidad que la electricidad es transmitida y que es un buen indicador de la presencia de sales ya que siendo un electrolito conduce más fácilmente la electricidad por lo tanto entre más alta sea la conductividad más elevada es la concentración de sales. En la zona de estudio los resultados de CE van desde 2.68 en el valor más bajo en la parte Este de la zona de estudio y 269.8 para el valor más alto en la zona sur oeste dado en dS/m. Comparando lo que dice la tabla muy pocos cultivos podrían tener buena producción en las zonas donde la conductividad es muy alta como lo podemos notar en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 niveles de CE en dS/m

CE	Condiciones de salinidad y efecto sobre las plantas
<1	Suelo libre de sales. No existe restricción para ningún cultivo
1 - 2	Suelo muy bajo en sales. Algunos cultivos muy sensibles pueden ver restringidos sus rendimientos.
2 - 4	Suelo moderadamente salino. Los rendimientos de cultivos sensibles pueden verse afectados en su rendimiento.
4 - 8	Suelo salino. El rendimiento de casi todos los cultivos se ve afectado por esta condición de salinidad.
8 - 16	Suelo altamente salino. Solo los cultivos muy resistentes a la salinidad pueden crecer en estos suelos.
>16	Suelo extremadamente salino. Prácticamente ningún cultivo convencional puede crecer económicamente en estos suelos

Fuente: Castellanos, 2000.

El PSI oscila entre 25.3 y 95.9. Esta condición también aumentó en estos 6 años implicando también que existe una mayor cantidad de sodio intercambiable en el suelo. Como se muestra en la Tabla 4.4, algunos cultivos son más tolerantes al sodio intercambiable en el suelo como lo es el algodón que soporta valores superiores a 40 %, al contrario del maíz

que es muy sensible al sodio. Esta condición de cambio en los suelos ha propiciado el desplazamiento de algunos cultivos por otros de mayor tolerancia a la salinidad y sodicidad. Así también los valores de PSI se ha ido expandiendo hacia el sur centro de la zona de estudio acercándose hacia otras parcelas donde aún se siembra algún cultivo

Tabla 4.4 Tipos de cultivos del valle que presentan tolerancia con el sodio intercambiable

cultivo	limite óptimo de PSI
Cebada	30 - 40
Algodón	Más de 40
Sorgo	20 - 40
Maíz	Menos de 15
cebollín	15 - 40
Alfalfa	30 - 40
Esparrago	40 - 50

Fuente: MA González Narváez. (2002)

Con los resultados mencionados podemos observar que de seguir la tendencia en el aumento de la salinidad, dentro de algunos años el suelo disminuirá su producción ya que si bien algunos cultivos podrán soportar y crecer en tan altos niveles de salinidad, no podrán dar resultados factibles en cuanto a los niveles de producción, algo que al final terminara por ser poca o nulamente rentable para el cultivo, por eso es que se exponen los resultados donde se hace énfasis hacia la dirección y el aumento en cantidad donde la salinidad está en aumento.

V. Conclusiones

Los resultados obtenidos de la investigación han revelado el grado de avance de la salinidad y sodicidad en los suelos de la zona de estudio en un lapso comprendido de 2010 a 2016.

Los análisis de campo y laboratorio indican variaciones en los diferentes indicadores de salinidad: para el caso del pH registró valores promedio de 7 en el año de 2010, para 2016 tendieron a desplazarse hacia una condición de moderadamente alcalinos (pH cercano a 8).

Para el caso de la conductividad eléctrica los resultados fueron similares ya que el promedio para el 2010 era 124 dS/m y para el año 2016 el promedio aumento a 167 dS/m, condición que podría explicarse por el incremento en la acumulación de sales en la capa superficial del suelo, sobre todo en los terrenos pertenecientes al Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto y aledaños.

El Porcentaje de Sodio Intercambiable paso de un promedio de 65 para el 2010, a 72 en 2016, denotando también incrementos en las concentraciones de sodio disponible, principalmente en la zona agrícola aledaña al complejo, condición que podría estar relacionada con la aplicación de riego para lavado de sales en los terrenos de cultivo y el desplazamiento de sales de mayor solubilidad.

Si bien la cartografía generada a partir de los estudios de campo y laboratorio para los indicadores de pH, PSI y CE para los años de 2010 y 2016, tiene tendencias similares en la distribución de las concentraciones, también resulta evidente el ligero incrementos que estos indicadores de salinidad están teniendo en los suelos, lo cual también está justificado por datos de laboratorio, esta condición principalmente se manifiesta hacia el poniente de la zona de estudio, donde se ubican los ejidos de Nuevo

León e Hidalgo, cercanos a los terrenos del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto.

Los terrenos donde se registró el avance de las sales actualmente están considerados como de uso agrícola por lo que es de esperarse que los cultivos estén propensos a una disminución en su rendimiento a consecuencia de la acumulación salina.

Una consecuencia de esta salinización del suelo es la pérdida de fertilidad, lo que perjudica o imposibilita el cultivo agrícola. Una de las formas que se está llevando a cabo para frenar o revertir este proceso es mediante costosos lavados de los suelos para lixiviar las sales, o pasar a cultivar plantas que toleren mejor la salinidad. Con esto no se está dando una solución factible ya que aparentemente es una forma de frenar el avance de las sales pero por lo costoso y tardado no resulta viable para los productores, sino más bien resultaría mejor comenzar a mitigar los efectos de la salinización desde los primeros momentos de la producción. Por otro lado, en la planificación de los sistemas de riego modernos éste es un parámetro que se considera desde el comienzo, pudiendo de esta forma prevenirse la salinización dimensionando adecuadamente las estructuras y estableciendo prácticas de riego adecuadas.

VI. Recomendaciones

Es altamente recomendable el monitoreo continuo de los indicadores de salinidad para determinar el avance de este problema en los terrenos agrícolas.

Se considera factible capacitar a los productores para que mediante pruebas de campo puedan monitorear con mayor frecuencia el desarrollo de los cultivos, así como aplicar análisis de laboratorio periódicos para determinar la condición de las sales en el suelo.

Dependiendo de las condiciones físicas y químicas del suelo, es importante establecer paquetes tecnológicos que consideren dosis adecuadas de fertilizantes, así como la aplicación de abonos orgánicos que puedan aportar nutrientes a los suelos agrícolas.

Es indispensable conocer el comportamiento hídrico de los suelos para determinar dosis óptimas de láminas de riego a fin de reducir la concentración de sales solubles sin incrementar el contenido de sodio intercambiable que resulta altamente tóxico para los cultivos

Fisher también recomienda que un laboratorio realice una prueba de agua completa al menos una vez al año; así como pruebas semanales internas del agua de riego sin químicos y del agua inyectada. Los productores deben realizar pruebas en los cultivos principales cada quince días, para poder llevar a cabo las medidas correctivas que se requieran, antes de que las plantas experimenten demasiado estrés.

Es importante continuar con los estudios que hasta ahora se han realizado y que han generado fundamentos importantes para establecer el grado de afectación de los suelos y potenciar las estrategias que respalden las políticas de desarrollo económico, desde un enfoque sustentable y responsable, que diagnostique la situación, vulnerabilidad, necesidades e intereses de las comunidades de una forma participativa en un ambiente saludable para el intercambio de ideas que eleven la calidad de vida a través, de mejores empleos y oportunidades de negocios; así también es de suma importancia adaptar los planes de desarrollo municipal y conocer los alcances que traerá esta adaptación de políticas y programas que desempeñaran un papel fundamental en el ordenamiento ambiental y territorial del valle de Mexicali, para que directa o indirectamente exista también la generación de nuevos empleos junto con el marco de cooperación entre naciones y comunidades fronterizas, con la cual se

busque el total y mejor aprovechamiento de los recursos que en este caso es el suelo quien es por ahora el objeto de estudio, pero que no deja de estar fuertemente relacionado con todos los demás recursos.

El sector agrícola se verá vigorosamente beneficiado si se sabe aprovechar el monitoreo de la dinámica de la salinidad en los suelos en el distrito, ya que ayudará a corregir de manera anticipada los factores que estén llevando al valle de Mexicali a tal grado de salinización

VII. Bibliografía

- Aceves, E. (1989). *Los suelos ensalitrados y los métodos para su recuperación*. Universidad Autónoma de Chapingo.
- Allison, F. E. (1973). *Soil organic matter and its role in crop production*. Amsterdam; New York: Elsevier Scientific Pub. Co.
- Badia Villas, D. (n.d.). SUELOS AFECTADOS POR SALES.
- Bohn, L.H., MacNeal, L.B., O'Connor, A. G. (1985). *Soil Chemistry. A Wiley-Interscience Publication*. New York, EUA: Interscience.
- Bredemeier, M., Merino, A., & Lancho, J. F. G. (2012). Water and carbon in forests: challenges for forest management under the pressures of climate change. *European Journal of Forest Research*, 131(6), 1639–1642.
- FAO and ITPS. (2015). *Status of the world's Soil Resources. Main Report*. Rome, Italy.
- Fernandez, R. (1991). The economic evolution of the imperial (USA) and Mexicali (Mexico) Valleys. *Journal of Borderlands*, 6(2), 1–22.
- Flynn, R. (2015). *Interpreting soil tests: Unlock the secrets of your soil*.
- Francisco, S., Valette-Silver, J. N., Thompson, J. M., & Ball, J. W. (1981). Third symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico relationship between water chemistry and sediment mineralogy in the cerro prieto geothermal field: a preliminary report (.). San Francisco.
- Geissen, V., Sánchez-Hernández, R., Kampichler, C., Ramos-Reyes, R., Sepulveda-Lozada, A., Ochoa-Goana, S., ... Hernández-Daumas, S. (2009). Effects of land-use change on some properties of tropical soils — An example from Southeast Mexico. *Geoderma*, 151(3–4), 87–97. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.011>
- Ibáñez-Huerta, A. (2013). Estudio de los suelos afectados por sales como base para evaluar la influencia del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto sobre la zona agrícola aledaña. Valle de Mexicali, Baja California. México. México D.F.
- Ibáñez-Huerta, A., & García-Calderón, N. E. (2010). *Evaluación de las emisiones de la Planta Geotérmica Cerro Prieto sobre el recurso suelo*. México D.F.
- IUSS Working Group WRB. (2014). *World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106*. <http://doi.org/10.1017/S0014479706394902>

- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4. <http://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability (Switzerland)*, 7(5), 5875–5895.
- Lal, R., & Rattan. (2015). Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895. <http://doi.org/10.3390/su7055875>
- Maas, E. V., & Grattan, S. R. (1986). Salt tolerance of plants. *Applied Agricultural Research*, 1(1), 12–16.
- Moncada-Aguilar, A. M., Ramírez-Hernández, Jorge, Quintero-Núñez, M., & Avendaño-Reyes, L. (2010). Origin of Salinity in Groundwater of Neighboring Villages of the Cerro Prieto Geothermal Field. *Water Air Soil Pollut*, 213, 389–400.
- Oster, J. D., Shainberg, I., & Abrol, I. P. (1996). *Reclamation of Salt-Affected Soils*. EUA.: Marcel Dekker Inc.
- Ozgoz, E., Gunal, H., Acir, N., Gokmen, F., Birol, M., & Budak, M. (2013). Soil quality and spatial variability assessment of land use effects in a typical haplustoll. *Land Degradation & Development*, 24(3), 277–286.
- Porta, C. J. & A.-L. M. (2006). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. (2nd ed.). Madrid, España: Mundi Prensa.
- Ramírez-Hernández, J., & García, S. G. (2004). Chemical evolution of disposal brine of the Cerro Prieto geothermal field during its transport toward surrounding soils, Mexico. *Environmental Geology*, 46(6), 721–726. <http://doi.org/10.1007/s00254-004-1075-3>
- Reeuwijk, L. Van. (2002). Procedures for Soil Analysis. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC). *Wageningen. Netherlands*. Retrieved from http://scholar.google.com.mx/scholar?q=International+soil+reference&btnG=&hl=en&as_sdt=0%2C5#0
- Richards, L. A. (1990). *Suelos salinos y sódicos. Diagnóstico y rehabilitación*. México: Limusa.
- Secretaría de Fomento Económico de Baja California. (2009). *Estudio bibliográfico sobre la salinidad del Valle de Mexicali*.
- UACH. (2007). *Dictamen Técnico para determinar la calidad de suelos adyacentes al Campo Geotérmico de Cerro Prieto, B.C.* Texcoco, México.

ESRI. (2016). conceptos del conjunto de herramientas de interpolacion. 18/10/2017, de Environmental Systems Research Institute Sitio web: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-idw-works.htm>

INTAGRI. (2001). La Conductividad Eléctrica del Suelo en el Desarrollo de los Cultivos Extraído de <https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-conductividad-electrica-del-suelo-en-el-desarrollo-de-los-cultivos> - Esta información es propiedad intelectual de INTAGRI S.C., Intagri se reserva el derecho de su publicación y reproducción total o parcial.. 18-10-2017, de INTAGRI S. C. Sitio web: <https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-conductividad-electrica-del-suelo-en-el-desarrollo-de-los-cultivos>

AgroEs. (2013). Tolerancia de los cultivos a la salinidad. 18-10-2017, de AgroEs.es Sitio web: <http://www.agroes.es/agricultura/agua-riegos-regadios/323-tolerancia-cultivos-salinidad-agricultura>

MA González Narváez. (2002). Tipos de cultivos que presentan tolerancia al pH. 18-10-2017, de MA González Narváez Sitio web: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/5978/71/tablas%20de%20cultivos.pdf>

VIII. Anexos

Índice de figuras

Ilustración 2	Concentración de sales y solidos disueltos en el rio colorado....	10
Ilustración 1.1	Paisaje dominado por la acumulación de sales en terrenos de uso común aledaños a terrenos agrícolas. Valle de Mexicali, B.C.....	16
Ilustración 1.2	Nodo número 16 una de las zonas más afectadas por la salinización, ubicada dentro del Complejo Geotérmico Cerro Prieto.....	17
Ilustración 1.3	Nodo número 10. Sorgo (Sorghum sp.).....	23
Ilustración 1.4	Vista parcial de la zona de estudio donde se puede observar que el terreno es totalmente plano, un factor más que propicia la salinización.....	23
Ilustración 1.5	Nodo número 13. Algodón (Gossypium sp.).....	25
Ilustración 2.1	Vista general del Municipio de Mexicali.....	29
Ilustración 2.2	Planta geo termoeléctrica Cerro Prieto.....	33
Ilustración 2.3	Mapa Hidrológico de la zona de estudio.....	35
Ilustración 2.4	Panorámica del canal primario Reforma dentro del Valle de Mexicali, B.C.....	36
Ilustración 2.5-2.10	Actividades agrícolas en el Valle de Mexicali, B.C.....	39
Ilustración 2.11-2.15	Actividades industriales dentro del Complejo Geotermoeléctrico Cerro Prieto. Mexicali, B.C.....	40
Ilustración 2.16	Mapa de la zona de estudio transectos y puntos de muestreo definidos.....	43
Ilustración 2.17	Toma de muestras de suelo para su análisis en laboratorio.....	44
Ilustración 2.18	método de interpolación Kriging.....	47
Ilustración 2.18	método de interpolación IDW.....	48
Ilustración 3.1	Puntos de muestreo para los años 2010 y 2016.....	51
Ilustración 3.2	Mapa de distribución espacial del pH para el año 2010.....	54
Ilustración 3.3	Mapa de distribución espacial para el año de 2016.....	55
Ilustración 3.4	Clases de pH para los suelos de la zona de estudio.....	58
Ilustración 3.5	Mapa de distribución espacial de la conductividad eléctrica para 2010.....	59
Ilustración 3.6	Mapa de distribución espacial para la conductividad eléctrica e 2016.....	60

Ilustración 3.7 Cobertura para las clases de conductividad eléctrica.....	62
Ilustración 3.8 Mapa de distribución espacial para el Porcentaje de Sodio Intercambiable en 2010.....	64
Ilustración 3.9 Mapa de distribución espacial para el Porcentaje de Sodio Intercambiable en 2016.....	65
Ilustración 3.9 Porcentaje de sodio intercambiable.....	67

Índice de tablas

Tabla 1.2 Clasificación de los suelos salinos y salinos sódicos.....	17
Tabla 1.2 Clasificación de suelos salinos y salinos sódicos y su efecto en la producción.....	19
Tabla 1.3 Valores de tolerancia a la salinidad de cultivos comerciales en Mexicali.....	26
Tabla 2.1 Grupos de suelo registrados en el Valle de Mexicali, B.C.....	37
Tabla 3.1 Cambios en la condición de pH para los suelos de la zona de estudio en el periodo 2010 – 2016.....	56
Tabla 3.2 Clases de Conductividad Eléctrica para los suelos de la zona de estudio.....	61
Tabla 3.3 Valores de referencia para suelos salinos y salino sódicos.....	63
Tabla 3.4 Cobertura de las clases de Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) para los suelos de la zona de estudio.....	66
Tabla 4.1 principales cultivos en el valle de Mexicali y su tolerancia a los niveles de pH.....	71
Tabla 4.2 diferentes cultivos del valle y su tolerancia a diferentes valores de Conductividad Eléctrica dada en dS/m.....	72
Tabla 4.3 niveles de CE en dS/m.....	73
Tabla 4.4 Tipos de cultivos del valle que presentan tolerancia con el sodio intercambiable.....	74