



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
IZTACALA**

**Estudio comparativo de la Respiración Edáfica  
en suelos del Alto Mezquital, Ixmiquilpan,  
Hidalgo.**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**BIÓLOGO**

P R E S E N T A:

**CADENA LÓPEZ JOSUÉ GEOVANNY**



DIRECTOR DE TESIS:

**MAESTRO EN CIENCIAS FRANCISCO LÓPEZ GALINDO**

LOS REYES IZTACALA, ESTADO DE MÉXICO, 2016.

*“Cuando la sangre de tus venas retorne al mar  
y el polvo de tus huesos vuelva al suelo,  
quizás recuerdes que esta tierra no te pertenece a ti,  
sino que tú perteneces a esta tierra.”*

*“No andes detrás de mí, tal vez yo no sepa liderar;  
no andes delante de mí, tal vez yo no te siga;  
anda a mi lado para que podamos caminar juntos.”*

–Proverbios UTE (Nocht)–

## ***Dedicatoria***

Todo mi amor y respeto para mis profesores perpetuos: ***Daniel*** y ***Eusebia***, por darme vida, educarme, sostenerme y siempre guiarme; éste trabajo es suyo totalmente, reflejo de todas sus enseñanzas y cariño. Representan los cimientos de esta gran familia, por ustedes he logrado mis objetivos y por ustedes conozco la felicidad.

A mis hermanos *María del Rocío, Hilda Esther, José Daniel, Laura Patricia†* y *Claudia Araceli*, que siempre han estado ahí para cuidarme y aconsejarme, muchas gracias por el amor incondicional y por siempre tratarme como a uno de sus hijos. A mis otros hermanos: *Alma, Daniel, Nictehá, Tonatiuh, César, Israel, Fernanda, Mariano, Javier, Enrique* y *José Luis*. Y sobre todo a mis niños *Diego, Ximena* y *Alessandra*.

A mi Familia fortuita, diversa y muy querida: *Alan, Ulises, Manuel, Victor, Ángel, Samuel, Winnie, Tânia, Claudia, Mafer, Aldo, Puma, Valeria, Cristina, Poncho, Lalo, Anahí, Alejandra, Rosario* y *Chepe Escalera*. Agradezco profundamente su amistad y fraternidad, sin ustedes jamás hubiera superado muchos obstáculos y vivido tantas experiencias; continuemos dándole vida a ésta gran comunidad.

A toda la Familia Cadena y Familia López, por mostrar siempre unidad y respeto.

## *Agradecimientos*

La elaboración de este proyecto jamás hubiera sido posible sin el apoyo e intervención de grandes personas y comunidades, por lo que deseo manifestar mi mayor gratitud y reconocimiento para:

La Universidad Nacional Autónoma de México, sobre todo a la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, la cual considero mi segundo hogar, muchas gracias por permitirme formar parte de su comunidad y mostrarme el amor por la ciencia.

Al M. en C. Francisco López Galindo, muchas gracias Panchito por confiar y guiar ésta tesis, por otorgarme grandes conocimientos y consejos, por demostrar siempre humildad y ayuda desinteresada a los demás, por enseñarme a amar la Biología y sobre todo por su amistad.

Al Comité Sinodal: Dr. Daniel Jesús Muñoz Iniestra, M. en C. Mayra Mónica Hernández Moreno, Biol. Arnulfo Reyes Mata y Biol. Alfonso Soler Aburto; muchas gracias por las observaciones y correcciones de este proyecto, además por siempre brindarme apoyo y consejo cuando lo necesité.

A mis colegas y amigas: Cintia Berenice Pérez Minor, Érica María Valenzuela Camacho y Claudia Andrea Hernández Elizalde, muchas gracias por el apoyo en la realización de ésta investigación, además de enseñarme el verdadero trabajo en equipo.

A las comunidades de El Dexthí, La Palma-San Juanico, Barrio los Martínez y El Durazno; muchas gracias por siempre recibirme con una sonrisa, por brindarme apoyo cuando lo necesité y permitirme realizar éste estudio.

A mis compañeros de generación, muchas gracias por compartir, ésta gran experiencia llamada Licenciatura.

## CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	3
<b>ÍNDICE DE GRÁFICOS</b> .....	4
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	6
<b>RESUMEN</b> .....	8
<b>ABSTRACT</b> .....	9
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	10
<b>2. JUSTIFICACIÓN</b> .....	14
<b>3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	15
<b>3.1. Objetivo General</b> .....	15
<b>3.2. Objetivos particulares</b> .....	15
<b>4. ANTECEDENTES</b> .....	16
<b>4.1. Respiración del Suelo</b> .....	16
<b>4.2. Valle del Mezquital</b> .....	19
<b>5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
<b>5.1. Zonas áridas, semiáridas y desertificación</b> .....	21
<b>5.2. Breve descripción del sistema edáfico</b> .....	23
<b>5.3. Degradación de Suelo</b> .....	30
<b>5.3.1. Degradación Biológica del Suelo</b> .....	30
<b>5.3.2. Indicadores de degradación biológica en suelos</b> .....	31
<b>5.4. Respiración Edáfica</b> .....	33
<b>5.4.1. Métodos para la determinación de la respiración edáfica</b> .....	35
<b>6. DELIMITACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	40
<b>6.1. Localización Geográfica y Política</b> .....	41
<b>6.1.1. Superficies, Límites y Accesos</b> .....	41
<b>6.2. Ordenamiento Ecológico</b> .....	41
<b>6.3. Fisiografía</b> .....	42
<b>6.4. Geomorfología</b> .....	42
<b>6.5. Suelos</b> .....	42
<b>6.6. Hidrología</b> .....	42
<b>6.7. Vegetación y Uso de Suelo</b> .....	43
<b>6.8. Clima</b> .....	43
<b>6.9. Unidades de muestreo</b> .....	45
<b>6.9.1. Agroecosistemas de cultivo y agostadero</b> .....	45
<b>6.9.2. Ecosistemas naturales</b> .....	46

<b>7. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	48
<b>7.1. Fase Descriptiva (Gabinete)</b> .....	49
<b>7.1.1. Desarrollo del protocolo de investigación</b> .....	49
<b>7.1.2. Caracterización del área de estudio</b> .....	49
<b>7.2. Fase de Campo</b> .....	49
<b>7.3. Fase de Laboratorio</b> .....	50
<b>7.3.1. Respiración edáfica</b> .....	50
<b>7.3.2. Evaluación de propiedades físicas y químicas del suelo</b> .....	50
<b>7.4. Fase de Resultados e Interpretación</b> .....	51
<b>8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	52
<b>8.1. Delimitación y caracterización de los sitios investigados</b> .....	52
<b>8.2. Clave de identificación de los sitios de evaluación</b> .....	56
<b>8.3. Valoración de la respiración edáfica y tipos de tratamiento</b> .....	57
<b>8.3.1. Valoración con solución de hidróxido de sodio (NaOH)</b> .....	58
<b>8.3.2. Valoración con solución de hidróxido de potasio (KOH)</b> .....	65
<b>8.4. Índice de Respiración Edáfica Total</b> .....	73
<b>8.5. Propiedades Físicas de los suelos</b> .....	80
<b>8.5.1. Color</b> .....	80
<b>8.5.2. Textura del Suelo</b> .....	85
<b>8.5.3. Humedad</b> .....	90
<b>8.6. Propiedades químicas de los suelos</b> .....	94
<b>8.6.1. pH del Suelo</b> .....	95
<b>8.6.2. Materia orgánica del suelo</b> .....	99
<b>8.6.3 Nitrógeno del Suelo</b> .....	103
<b>8.7. Relación respiración del suelo–propiedades físicas y químicas</b> .....	107
<b>8.7.1. División de los Sitios Investigados</b> .....	110
<b>8.7.2. División de agroecosistemas y ecosistemas naturales</b> .....	119
<b>9. CONCLUSIONES</b> .....	125
<b>9.1. Respiración edáfica</b> .....	125
<b>9.2. Índice de Respiración Edáfica Total</b> .....	126
<b>9.3. Propiedades físicas y químicas</b> .....	126
<b>10. LITERATURA CITADA</b> .....	128
<b>ANEXO I: Fórmulas y cuadros</b> .....	140
<b>a) Proceso analítico para la evaluación de la respiración edáfica</b> .....	140
<b>b) Índice de Respiración Edáfica total</b> .....	142

c) Total de gráficos de Regresión Lineal de cada uno de los sitios y con ambos tratamientos .....	143
<b>ANEXO II: Cuadros y figuras .....</b>	<b>153</b>
a) Cuadros de resultados de los parámetros físicos y químicos de los suelos de cada una de las unidades.....	153
b) Figuras del área de estudio .....	156

### ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Formación Del Suelo .....	23
Cuadro 2. Proceso de Formación de Suelo .....	24
Cuadro 3. Componentes del Suelo.....	25
Cuadro 4. Clasificación del Suelo con base en los criterios adoptados por INEGI.....	26
Cuadro 5. Perfil del Suelo: Morfología.....	29
Cuadro 6. Codificación de Agroecosistemas y Ecosistemas Naturales .....	56
Cuadro 7. Respiración edáfica registrada en los 4 tiempos con Solución NaOH .....	59
Cuadro 8. Respiración edáfica registrada en los 4 tiempos con Solución KOH .....	68
Cuadro 9. Criterios de evaluación de la respiración edáfica.....	76
Cuadro 10. Índice de Respiración Edáfica total en los Sitios evaluados.....	78
Cuadro 11. Influencia de la Temperatura .....	79
Cuadro 12. Color de las unidades evaluadas e Índice de Respiración Edáfica Total .....	83
Cuadro 13. Estandarización del I.R.E., conforme a los escenarios valorados .....	84
Cuadro 14. Clase Textural de los sitios valorados.....	89
Cuadro 15. Interpretación de Humedad con Respecto a la Actividad Biológica.....	93
Cuadro 16. Humedad en los sitios evaluados .....	93
Cuadro 17. Intervalo de pH y relación con actividad biológica .....	97
Cuadro 18. pH e I.R.E.t. en cada sitio.....	98
Cuadro 19. Interpretación de análisis de Materia orgánica y Actividad Biológica.....	102
Cuadro 20. Materia Orgánica e Índice de respiración edáfica en los sitios .....	102
Cuadro 21. Interpretación de análisis de Nitrógeno y Actividad Biológica.....	106
Cuadro 22. Nitrógeno y Respiración en los sitios estudiados.....	106
Cuadro 23. Color de los Agroecosistemas e Índice de Respiración Edáfica Total.....	153
Cuadro 24. Clase textural de los Agroecosistemas .....	154
Cuadro 25. Humedad de los suelos en las unidades estudiadas.....	154
Cuadro 26. pH e I.R.E.t. en cada sitio evaluado .....	155
Cuadro 27. Materia Orgánica e Índice de respiración edáfica en las unidades .....	155
Cuadro 28. Nitrógeno y Respiración en los sitios evaluados .....	156

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1.</b> Temperaturas máximas y mínimas del área de estudio.....	44
<b>Gráfico 2.</b> Climograma del área de estudio.....	44
<b>Gráfico 3.</b> Diagrama de flujo de los métodos aplicados en la investigación.....	48
<b>Gráfico 4.</b> Promedio General de la R.E. en los 4 tiempos, solución NaOH.....	58
<b>Gráfico 5.</b> I.R.E. de los escenarios en los diferentes tiempos, Solución NaOH.....	60
<b>Gráfico 6 y Gráfico 7.</b> I.R.E. de los escenarios en los diferentes tiempos, Solución NaOH. ....	61
<b>Gráfico 8 y Gráfico 9.</b> I.R.E. de los escenarios en los diferentes tiempos, Solución NaOH. ....	61
<b>Gráfico 10.</b> Escenarios ordenados con base en la producción máxima de CO <sub>2</sub> (NaOH). ....	63
<b>Gráfico 11.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, todos los escenarios, NaOH.....	63
<b>Gráfico 12.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, No tratamiento Blanco, NaOH.....	64
<b>Gráfico 13.</b> Promedio General de los escenarios en los cuatro tiempos, solución KOH. ....	66
<b>Gráfico 14.</b> I.R.E. de ambos tratamientos en el promedio de los escenarios.....	67
<b>Gráfico 15.</b> Comparación de máxima producción entre ambos tratamientos.....	67
<b>Gráfico 16.</b> I.R.E. de los escenarios en los diferentes tiempos, Solución KOH.....	69
<b>Gráfico 17 y Gráfico 18.</b> I.R.E. de los escenarios en los diferentes tiempos, Solución KOH. ...	70
<b>Gráfico 19 y Gráfico 20.</b> I.R.E. de los escenarios en los diferentes tiempos, Solución KOH. ...	70
<b>Gráfico 21.</b> Escenarios ordenados con base en la producción máxima de CO <sub>2</sub> (KOH).....	71
<b>Gráfico 22.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, todos los escenarios, KOH.....	72
<b>Gráfico 23.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, no blanco, KOH.....	72
<b>Gráfico 24.</b> Índice de R.E. total en los escenarios, tratamiento NaOH.....	75
<b>Gráfico 25.</b> Índice de R.E. total en los escenarios, tratamiento KOH.....	75
<b>Gráfico 26.</b> Criterios de evaluación de los sitios estudiados, NaOH.....	77
<b>Gráfico 27.</b> Criterios de evaluación de los sitios estudiados, KOH.....	78
<b>Gráfico 28.</b> Color del suelo seco en el área de estudio.....	81
<b>Gráfico 29.</b> Color del suelo Húmedo en el área de estudio.....	82
<b>Gráfico 30.</b> Relación del I.R.E.t. (NaOH) con la textura del suelo de los agroecosistemas.....	86
<b>Gráfico 31.</b> Relación del I.R.E.t. (KOH) con la textura del suelo de los agroecosistemas.....	88
<b>Gráfico 32.</b> Relación del I.R.E.t. (NaOH) con la humedad del suelo de los agroecosistemas ...	91

<b>Gráfico 33.</b> Relación del I.R.E.t. (KOH) con la humedad del suelo de los agroecosistemas.....	92
<b>Gráfico 34.</b> Relación del I.R.E.t. (NaOH) con el pH del suelo de los agroecosistemas. ....	95
<b>Gráfico 35.</b> Relación del I.R.E.t. (KOH) con el pH del suelo de los agroecosistemas.....	97
<b>Gráfico 36.</b> Relación del I.R.E.t. (NaOH) con M.O. del suelo de los agroecosistemas.....	100
<b>Gráfico 37.</b> Relación del I.R.E.t. (KOH) con M.O. del suelo de los agroecosistemas. ....	100
<b>Gráfico 38.</b> Relación del I.R.E.t. (NaOH) con Nitrógeno del suelo de los agroecosistemas.....	104
<b>Gráfico 39.</b> Relación del I.R.E.t. (KOH) con Nitrógeno del suelo de los agroecosistemas.....	104
<b>Gráfico 40.</b> Análisis de clúster de la R.E. (NaOH) y los parámetros Físicos y Químicos.....	109
<b>Gráfico 41.</b> Análisis de clúster de la R.E. (KOH) y los parámetros Físicos y Químicos.....	114
<b>Gráfico 42.</b> Análisis de clúster de la R.E. (NaOH) y los parámetros Físicos y Químicos.....	118
<b>Gráfico 43.</b> Análisis de clúster de la R.E. (KOH) y los parámetros Físicos y Químicos. ....	122
<b>Gráfico 44 y Gráfico 45.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, Tratamiento NaOH.....	144
<b>Gráfico 46 y Gráfico 47.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, Tratamiento NaOH.....	144
<b>Gráfico 48 y Gráfico 49.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, Tratamiento NaOH.....	145
<b>Gráfico 50 y Gráfico 51.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, Tratamiento NaOH.....	145
<b>Gráfico 52 y Gráfico 53.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, Tratamiento NaOH.....	146
<b>Gráfico 54 y Gráfico 55.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, Tratamiento NaOH.....	146
<b>Gráfico 56 y Gráfico 57.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, Tratamiento NaOH.....	147
<b>Gráfico 58 y Gráfico 59.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, Tratamiento NaOH.....	147
<b>Gráfico 60 y Gráfico 61.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, Tratamiento KOH. ....	148
<b>Gráfico 62 y Gráfico 63.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, Tratamiento KOH. ....	148
<b>Gráfico 64 y Gráfico 65.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, Tratamiento KOH. ....	149
<b>Gráfico 66 y Gráfico 67.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, Tratamiento KOH. ....	149
<b>Gráfico 68 y Gráfico 69.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, Tratamiento KOH. ....	150
<b>Gráfico 70 y Gráfico 71.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, Tratamiento KOH. ....	150
<b>Gráfico 72 y Gráfico 73.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, Tratamiento KOH. ....	151
<b>Gráfico 74 y Gráfico 75.</b> Regresión lineal de R.E. contra tiempo, Tratamiento KOH. ....	151
<b>Gráfico 76.</b> Regresión lineal de Respiración edáfica contra tiempo, Tratamiento NaOH. ....	152
<b>Gráfico 77.</b> Regresión lineal de Respiración edáfica contra tiempo, Tratamiento KOH.....	152

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Vulnerabilidad en México de zonas en proceso de desertificación .....	11
<b>Figura 2.</b> Clasificación de áreas por Precipitación/Evapotranspiración .....	12
<b>Figura 3.</b> Área de Influencia por degradación Biológica en los suelos de México .....	31
<b>Figura 4.</b> Grupos funcionales y procesos/productos que componen un suelo fértil.....	33
<b>Figura 5.</b> Componentes en la respiración del suelo.....	34
<b>Figura 6.</b> Proceso de Respiración Edáfica.....	35
<b>Figura 7.</b> Cámara dinámica cerrada .....	36
<b>Figura 8.</b> Trampa alcalina.....	37
<b>Figura 9.</b> Cámara dinámica abierta .....	37
<b>Figura 10.</b> Cromatografía de CO <sub>2</sub> en suelo. ....	38
<b>Figura 11.</b> Ejemplo de Cromatografía de Gas-Sólido .....	39
<b>Figura 12.</b> Estado de Hidalgo, señalado el Alto Mezquital.....	40
<b>Figura 13.</b> Frasco con suelo y tapa modificada para la extracción del gas. ....	51
<b>Figura 14.</b> Localidad Dexthí-San Juanico, Ubicación del sitio de muestreo. ....	52
<b>Figura 15.</b> Localidad La Palma-San Juanico, Ubicación de los sitios de muestreo.....	53
<b>Figura 16.</b> Localidad Barrio Los Martínez, Ubicación del sitio de muestreo. ....	54
<b>Figura 17.</b> Localidad El Durazno, Ubicación de los sitios de muestreo. ....	55
<b>Figura 18.</b> Dispositivos utilizados en la evaluación del I.R.E.t. ....	57

<b>Figura 19.</b> Estructura generalizada del Dendograma por Conglomerados Jerárquicos.....	108
<b>Figura 20.</b> Características del Dispositivo utilizado en la evaluación de la R.E. ....	156
<b>Figura 21.</b> Ecosistema: Suelo Natural con Costra Microbiótica.	
<b>Figura 22.</b> Ecosistema: Suelo Natural sin Costra Microbiótica. ....	157
<b>Figura 23.</b> Agroecosistema: Agricultura de Temporal.	
<b>Figura 24.</b> Unidad de Cultivo: Parcela de Riego. ....	157
<b>Figura 25.</b> Unidad de Cultivo: Riego Auxiliar.	
<b>Figura 26.</b> Ecosistema: Mezquital Abierto de Suelos Salinos.....	158
<b>Figura 27.</b> Ecosistema: Mezquital Cerrado de Suelos Salinos.	
<b>Figura 28.</b> Unidad de Cultivo: Huerto Familiar. ....	158
<b>Figura 29.</b> Ecosistema: Mezquital en proceso de Desmonte.	
<b>Figura 30.</b> Unidad de Agostadero: Suelos Inundables. ....	159
<b>Figura 31.</b> Unidad de Agostadero: Pastizal Halófito.	
<b>Figura 32.</b> Bosque Banxú.....	159
<b>Figura 33.</b> Carta Topográfica Carta Topográfica Tasquillo, escala 1:50,000. ....	160

## RESUMEN

La respiración edáfica es un proceso natural donde se libera dióxido de carbono del suelo por factores como la respiración de organismos fosoriales, descomposición de materia orgánica o el simple intercambio de gases entre la atmósfera y pedósfera. Las investigaciones sobre éste proceso se han incrementado durante la última década, ya que es un elemento ecológico importante pero cuya dinámica no ha sido descrita con amplitud; además su determinación analítica permite utilizarlo como un indicador biológico altamente sensible para la evaluación de la calidad del suelo; factor prioritario para el manejo de zonas áridas y semiáridas. Por lo que, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la respiración edáfica y utilizarlo como parámetro indicador de la degradación biológica de los suelos del Alto Mezquital; la secuencia metodológica consistió en la evaluación del Índice de Respiración Edáfica (I.R.E.) bajo dos tratamientos de captura de carbono (NaOH 0.1 N y KOH 0.1 N), junto con la determinación de tres atributos físicos y tres químicos del suelo, relacionándolos por medio de análisis multivariados para conocer la dinámica general de la respiración en las unidades ambientales estudiados, éstas fueron: cuatro agroecosistemas de cultivo, tres agroecosistemas de agostadero y cinco ecosistemas naturales. Éstas evaluaciones permitieron categorizar la zona de estudio con una actividad biológica generalizada que va de media a moderadamente baja, humedades bajas, pH mayoritariamente alcalinos y cuyo contenido de nitrógeno se considera moderadamente pobre, por lo que se infiere que los suelos han sido severamente impactados por las actividades antrópicas.

Se observó que el tratamiento de captación de C que mejor se adaptó al estudio en zonas áridas fue el hidróxido de sodio cuyos resultados no son oscilatorios y presentan lógica con los modelos propuestos por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). De las unidades, la que presentó la mejor producción potencial de respiración fue el agroecosistema de cultivo de riego auxiliar (P-CMZ-RA-2) cuya actividad biológica es ideal y se considera un sistema estable; sin embargo, en todas las determinaciones analíticas, el agroecosistema de agostadero de suelos inundables (DUR-SN-SI), presentó los índices más bajos de respiración, cuya dinámica biológica es baja debido al uso que se le da al ser una zona de captación de agua, altamente compactada. El presente estudio permitió la estandarización de técnicas para la evaluación de la respiración del suelo, modelado para zonas áridas y semiáridas.

**Palabras Clave:** Respiración Edáfica, Alto Mezquital, Zonas áridas y semiáridas.

## **ABSTRACT**

The soil respiration is a natural process where soil carbon dioxide is released by factors such as breathing fossorial organisms, decomposition of organic matter or the simple exchange of gases between the atmosphere and pedosphere. Research on this attribute has increased over the last decade; it is an important ecological element but whose dynamics has not been described extensively, also its analytical determination allows use as a highly sensitive biological indicator for assessing soil quality, priority factor for the management of arid and semi-arid. The objective of this study was to evaluate the soil respiration and use it as a parameter indicator of biological degradation inside the Alto Mezquital. The methodological sequence consisted in the evaluation of Edaphic Respiration Index (I.R.E.), under two treatments carbon sequestration (NaOH 0.1 N and KOH 0.1 N), together with determination of six physical attributes and chemical; linking them through multivariate analysis to determine the overall dynamics of respiration in the units assessment, these were: four agroecological farming, three agroecosystems rangeland and five natural ecosystems. These assessments allow categorize the study area with a generalized biological activity ranging from average to moderately low, low humidities, mostly alkaline pH and nitrogen content which is considered moderately poor, so it infer that soils have been severely impacted by human activities.

It is observed that the treatment of C sequestration best adapted to arid study was the Sodium Hydroxide whose results are not oscillatory and makes sense with the models proposed by U.S. Department of Agriculture. From units, which resulted with the best production potential respiration was the agroecosystem Auxiliary Irrigation Farming (P-CMZ-RA-2) whose biological activity is ideal and is considered a stable system. However in all analytical determinations, the agroecosystem rangeland "floodable soils" (DUR-SN-SI), had the lowest rates of respiration, whose biological dynamics is low due to the use that is given, it is a water catchment area, highly compacted.

This study allowed the standardization of techniques for the evaluation of soil respiration, modeled for arid and semiarid areas.

**Keywords:** Soil Respiration, Alto Mezquital, Arid and semiarid areas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las zonas áridas y semiáridas cubren alrededor del 56% del territorio nacional, poseen una gran cantidad de recursos naturales que pueden ser explotados en medicina tradicional y utilizadas como zonas de ecoturismo, sin embargo éstas áreas han sido poco estudiadas (González y Smith, 1998). Estudios ecológicos realizados a nivel nacional, definieron que se caracterizan por una escasez de agua, cuya distribución de la precipitación pluvial es altamente errática y ocurre en pocos eventos siendo de tipo torrencial, por lo que limita sustancialmente el desarrollo de las actividades agrícolas y pecuarias. El flujo hídrico arrastra grandes cantidades de suelo, dejando una alta erosión en las zonas afectadas; el recurso perdido es de capas más fértiles, lo que conlleva a su degradación y posterior pérdida de capacidad productiva (Tarango, 2005).

Aunado a lo anterior, el sobrepastoreo, la excesiva deforestación y el mal manejo de tierras, afectan la capacidad de éstas regiones para producir bienes y servicios, además contribuyen a la pérdida de biodiversidad e invasión de especies exóticas (Sharma, 1998); teniendo como consecuencia el fenómeno de desertificación, entendido como el proceso de degradación de suelos, resultado de factores climáticos y de actividades humanas (FAO, 1993); siendo éste tema prioritario para México, ya que 125,460,475 ha de las tierras presentan este tipo de deterioro ecológico (SEMARNAT, 2006).

Para combatir ésta problemática, se han realizado estudios que permitan definir las zonas que pueden ser afectadas, haciendo énfasis en la necesidad de estudios integrales que determinen áreas en riesgo de desertificación (Figura 1), para su posterior protección, como el Programa Ambiental de Naciones Unidas (UNEP, 1992), en el que se definen que áreas con tasa anual de Precipitación/Evapotranspiración entre 0.05 y 0.65 unidades son altamente vulnerables al deterioro, encontrando gran cantidad de zonas en el país (Figura 2); además éste estudio resalta que el uso de indicadores y puntos de referencia biológicos en las investigaciones científicas permite resolver las dificultades de este tipo de evaluaciones.

Se considera que los indicadores biológicos del suelo constituyen una herramienta directa para la evaluación de tierras, además de que los efectos de daño ambiental deben ser interpretados en el contexto científico y socioeconómico, considerando las características ecológicas, sociales, geográficas, económicas y culturales de la región de estudio (García, 1986).



**Figura 1.** Vulnerabilidad en México de zonas en proceso de desertificación (INE, 1995).

En referencia a lo anterior, resalta la importancia de establecer indicadores de calidad del suelo, que permitan la caracterización funcional actual del ambiente edáfico como base para el desarrollo de técnicas y métodos que promuevan una agricultura sustentable; lo cual ha sido un problema recurrente sobre los estudios edafológicos. La necesidad de este tipo de información se ha vuelto cada vez más importante en términos de manejo de tierras, salud del ecosistema y de los ciclos biogeoquímicos (Cotler, 2003).

Un indicador edafológico se obtiene de la evaluación de las variables físicas, químicas o biológicas de fácil medición, sensibles a las variaciones en la función del suelo y del medio que permitan evaluar la situación edáfica actual y determine los puntos críticos para su aprovechamiento (Navarrete, *et al.*, 2011); un proceso de gran sensibilidad es la Respiración Edáfica (R.E.), entendida como la producción total de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) por unidad de área ( $\text{m}^2$ ,  $\text{km}^2$ , ha) y de tiempo (segundo, minuto y hora), tanto de suelos naturales como agrícolas, generada por la respiración de animales fosoriales (organismos adaptados a la vida subterránea), raíces de plantas, hifas micorrizas y en menor extensión, por la oxidación química de los compuestos de carbono (Luo y Zhou, 2006).

Estudios recientes, se han enfocado en este proceso ecológico, ya que se reconoce como la principal fuente de flujo de carbono originario de la superficie del suelo y uno de los componentes clave dentro del ciclo del carbono en los ecosistemas terrestres, además de que se ha considerado un evento influyente de los cambios ecológicos globales, debido a su participación

en los procesos de calentamiento global, ya que contribuye a determinar si un ecosistema se comporta como fuente de carbono o sumidero de CO<sub>2</sub> (Murcia-Rodríguez y Ochoa-Reyes, 2008).



**Figura 2.** Clasificación de áreas por Precipitación/Evapotranspiración (UNEP, 1992).

En síntesis con lo expuesto anteriormente, la región conocida como el Alto Mezquital, es una zona semiárida altamente impactada por la actividad antrópica, debido al uso agrícola y pecuario (López *et al.*, 1999). Siendo característica de los poblados de mayor importancia socioeconómica los sistemas de riego de temporal y de aguas residuales, carreteras, agua potable, luz, drenaje y actividades comerciales significativas; caso contrario a las zonas marginadas del valle y la sierra, ya que en los terrenos escarpados y elevados se registran menos de 500 milímetros de precipitación anual, caminos escabrosos, polvorientos y aislados. Dichas condiciones ambientales no permite el desarrollo de actividades económicas de alto valor agregado por parte de las poblaciones asentadas. Del total de la población de esta región, estimada en casi 100 mil habitantes, 46% habla alguna lengua indígena (Otomí) además de español y cerca del 2% habla exclusivamente Hñañhu (Filardo, 2001).

Asociado a las deficiencias de servicios sociales, el creciente deterioro de sus recursos naturales, la escasez de agua, la baja productividad y deficiencias en los alimentos, ha propiciado que los

grupos establecidos ahí carezcan de oportunidades para su desarrollo, por lo tanto los otomíes tienen la necesidad de emigrar en busca de trabajo asalariado, siendo el principal destino Estados Unidos. Ejemplo de ello es la etnia Hñañhu, comunidad perteneciente al pueblo Otomí (López *et al.*, 1997). Grupo que desde épocas prehispánicas, basa la mayoría de su desarrollo económico en el uso de *Agave lechuguilla* TORR., 1859 (Lechuguilla), donde las pencas son procesadas en un tallado manual, para obtener de la fibra los subproductos denominados *ixtle* y *xithé*; sin embargo ésta actividad es considerada de bajo valor debido a que aún se desarrolla con herramientas agrícolas como la coa y yunta, siendo en menor medida el uso de tractores (Díaz *et al.*, 2005).

Por otro lado, la carencia de servicios médicos, permite que el uso de la herbolaria sea cotidiano, donde la medicina doméstica se ha desarrollado como una tarea importante, siendo parte del equilibrio social-biológico, generando recursos terapéuticos como son infusiones, cremas, bálsamos y productos fermentados. El conocimiento transmitido de generación en generación, sobre las diversas propiedades de plantas como el nopal, lechuguilla, tuna y sábila, fungen de manera determinante en el proceso de codificación y estructuración de conocimiento científico a partir del local (CDI, 2003).

Bajo este contexto, la presente investigación tiene como propósito evaluar la degradación biológica de los suelos del Alto Mezquital, por medio de la inferencia del proceso de respiración edáfica a través del uso del Índice de Respiración Edáfica (I.R.E.) como un método de caracterización y evaluación ecológica; que al ser caracterizado como indicador biológico, representa una alternativa de estudio directa y de fácil obtención para conocer el estado actual del recurso edáfico en la zona. La incursión en ésta evaluación permitirá además conocer el proceso que genera la respiración y modelar la interacción entre los diferentes componentes del suelo, principalmente comunidades de organismos y aspectos del medio físico. Con la finalidad de posteriormente proponer técnicas y métodos de mitigación del proceso de desertificación.

Este trabajo forma parte del proyecto interdisciplinario de investigación que se lleva a cabo en el Laboratorio de Edafología de la Unidad de Biotecnología y Prototipos (UBIPRO) en la Facultad de Estudios Superiores Iztacala (FES-I), cuyo objetivo es valorar los recursos de la zona en especial de tipo edáfico con el fin de proponer alternativas de manejo para su conservación y restauración

## **2. JUSTIFICACIÓN**

La respiración del suelo, es uno de los flujos de materia más grandes en el ciclo global del carbono, produce cada año alrededor del 10% del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) contenido en la atmósfera (Schlesinger y Andrews, 2000), donde se ha observado que pequeñas fluctuaciones estructurales de C en el recurso edáfico, pueden incrementar la acumulación del gas carbónico y cambiar la dinámica mundial de carbono. Estudios científicos sobre el ciclo biogeoquímico de éste elemento, demuestran que la captación y almacenamiento de C terrestre en el suelo, resulta ser un importante amortiguador en el aumento de este gas de efecto invernadero (Rayner y Law, 1999); por el contrario, si la relación establecida en un medio, donde la respiración edáfica y fijación de carbono terrestre es inversa (aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> por respiración y disminución paulatina de C del suelo), es muy probable que se incrementen las emisiones globales de dióxido de carbono; por lo tanto, se elevaría la proporción de gas carbónico en la atmósfera y generaría retroalimentación positiva al calentamiento global (Raich y Schlesinger, 1992; Raich y Tufekcioglu, 2000).

Éste fenómeno se ha identificado en las zonas áridas y semiáridas, especialmente en los ecosistemas perturbados, tomando gran importancia en el país, ya que éstas representan más de la mitad de la superficie total de México (Molina, 1983). Como punto específico se tiene el daño generalizado en el Alto Mezquital, consecuencia de la acelerada explotación selectiva de especies de plantas como la lechuguilla, que altera la estructura y diversidad de comunidades vegetales, la expansión de la agricultura intensiva altamente tecnificada, en combinación con la ganadería extensiva y el desarrollo progresivo de las actividades mineras, aumentando exponencialmente dicho deterioro ambiental (Cervantes, 2005). Este impacto antrópico ha disminuido los recursos naturales, por lo que las extinciones locales de especies y los procesos erosivos están en aumento a tal grado que el sistema se encuentra en procesos de desertificación en más de la mitad del territorio (Fernández-Badillo y Goyenechea-Mayer, 2010).

Debido a esto, la descripción sobre la dinámica de flujo de salida del carbono edáfico y el estudio de cómo los factores interactúan espacial y temporalmente, permiten la implementación de técnicas de amortiguamiento para recuperar los suelos. Además permitiría formular predicciones sobre los cambios que se pueden generar en el aumento de concentraciones de CO<sub>2</sub> (Rayner y Law, 1999).

Así surgen necesidades prioritarias para la elaboración de proyectos edafológicos que se enfoquen al abatimiento de la problemática asociada con el deterioro acelerado de los recursos de cualquier zona, utilizando esquemas de planificación estructurados y gestión de modelos sustentables, basados en el manejo y aprovechamiento integrado de los recursos que permitan comprender la dinámica del suelo en las zonas (USDA, 1999); por el cual se puede estimar el nivel de deterioro presente con el posterior desarrollo de estrategias de recuperación del recurso edáfico, que con la participación de las comunidades puedan realizar sus actividades de manera eficaz y eficiente, mitigando el impacto ecológico que generan; por lo que la presente investigación se enfoca la evaluación de la dinámica biológica del recurso del suelo en cuatro localidades del Alto Mezquital.

### **3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Objetivo General**

Evaluar el proceso de la respiración edáfica como parámetro indicador de la degradación biológica de los suelos de la zona.

#### **3.2. Objetivos particulares**

- Estandarizar técnicas analíticas para la evaluación de la respiración del suelo en zonas áridas y semiáridas.
- Complementar y relacionar la respiración del suelo con otras propiedades físicas y químicas.
- Generar la base de datos físicos y químicos de los suelos estudiados.

## 4. ANTECEDENTES

### 4.1. Respiración del Suelo

Debido a la importancia en el desarrollo de técnicas que permitan la evaluación de la calidad de los suelos se han generado investigaciones sobre respiración edáfica.

En 1994, Lloyd y Taylor evaluaron los efectos de la temperatura sobre el proceso de respiración edáfica, descubrieron que no hay una relación lineal sobre la temperatura y exponencial en el índice de respiración de suelo, sino que dicha relación es inversamente proporcional entre ambas, además de que el ciclo estacional de productividad primaria del ecosistema es muy sensible a la producción de CO<sub>2</sub> edáfico, a su vez determinado por la temperatura ambiental.

Davidson y sus colaboradores (2000), evaluaron los efectos del agua contenida en el suelo, sobre la respiración edáfica, en bosques y pastos ganaderos de la Amazonia, encontrando particularidades entre las estaciones lluviosas y secas del año; en los bosques, la diferencia de humedad en el suelo conforme a la respiración fue relativamente menor, esto debido a que las plantas mantenían el sistema húmedo. En cambio en los pastos, la respiración se vio afectada por la pérdida de humedad ya que en la época seca, la producción de gas fue disminuida.

Granier *et al.* en el 2000, realizaron el balance de carbón, por medio de la respiración edáfica, en un bosque joven de Hayas (*Fagus ST.-LAG.1880*), mediante la técnica de cámara invertida, estandarizando posteriormente los componentes de humedad de suelo y temperatura para obtener los índices de respiración edáfica de la zona.

Thuille *et al.* (2000), estandarizaron los índices de respiración edáfica (I.R.E.) en un área en proceso de deforestación y otra en recuperación ecológica, determinando que en zonas impactadas el contenido de carbón es paulatinamente reducido por el proceso de respiración, en cambio en las zonas poco perturbadas, el mismo sistema recicla el elemento; además de que zonas en proceso de deforestación producen mayor dióxido de carbono.

Trumbore en el 2000, contrastó la dinámica que se forma entre la respiración y la materia orgánica en suelos tropicales, concluyendo que bajo modelización del sistema, la cantidad de materia orgánica es directamente proporcional a la producción de gas carbónico de suelo, bajo estimaciones locales y ecosistémicas.

Stoyan y sus colaboradores (2000), definieron la espacialidad heterogénea de la respiración edáfica relacionado a recursos vegetales, cuya mayor diversidad en estructura espacial se asoció a zonas no perturbadas. En cambio la espacialidad en las áreas agrícolas está homogenizada a la actividad antrópica y se observó que la respiración edáfica aumentó paulatinamente.

Coleman *et al.* en el 2002, evaluaron la respiración del suelo en cuencas, por medio de técnicas de absorción alcalina de hidróxido de sodio e hidróxido de potasio, bajo un régimen temporal de 25 años, cuyos resultados mostraron en las mediciones actuales que el proceso fue mayor, consecuencia del impacto antrópico.

Fernández *et al.* en el 2002 realizaron un estudio comparativo de muestras de suelo de bosques, estandarizando la técnica *ex situ* de la respiración edáfica, en el que evaluaron su relación directa con la cantidad de materia orgánica.

Krebs (2003) aplicó una técnica para la determinación de CO<sub>2</sub> en el proceso de respiración, mediante una cámara que contuvo el sustrato, a través del cual hizo circular un flujo continuo de aire libre de dióxido de carbono. El CO<sub>2</sub> generado por el sustrato es atrapado en una solución alcalina y determinado químicamente mediante titulación con ácido.

Álvarez y Anzueto (2004) evaluaron la actividad microbiana del suelo, en sistemas de producción de maíz y pastizales, mediante la colecta de muestras compuestas en cuatro sistemas sociobiológicos definidos por los investigadores, donde los resultados mostraron, que la actividad fosorial medida por I.R.E., decreció conforme a la madurez del cultivo, concluyendo que la sobreexplotación agrícola, deteriora las comunidades ecológicas dentro del suelo.

Bolstad y Vose en el año 2005, evaluaron el contenido de carbón y el intercambio gaseoso en zonas de bosque y pastizales, por medio de estudios comparativos de anteriores investigadores, encontrando que las áreas de pasto generaban menor cantidad de CO<sub>2</sub> edáfico; en los bosques no fue determinado el I.R.E., sino estimado por la biomasa; concluyeron que la baja temperatura condicionó la poca producción del gas.

Siyán *et al.* en el 2005, definieron los controles biofísicos que influyen en el proceso de respiración de un bosque de coníferas; dividieron en grupos sociobiológicos el sistema cuya relación entre el I.R.E., y la temperatura del suelo resultó que cambia de positivo a una correlación negativa cuando la humedad del suelo se reduce por sequía (estrés hídrico), posteriormente propusieron técnicas de mitigación para la conservación del suelo.

Bernhardt y sus colaboradores en el año 2006, estudiaron los efectos del CO<sub>2</sub> atmosférico sobre la respiración del suelo, donde la máxima producción del gas se estimó en más de 200 ppm de gas carbónico, sin embargo en las fases finales del estudio, esta concentración disminuyó debido a que el área dejó de ser fumigada con agentes insecticidas.

Concilio *et al.* (2005) examinaron en un bosque, la influencia de la quema programada y el adelgazamiento de la capa edáfica sobre la respiración del suelo, identificando niveles de deterioro de suelos intactos a zonas perturbadas, proponiendo así modelos comparativos para la determinación de respiración en zonas ecológicamente estables y áreas con gran impacto.

Pregitzer *et al.* en el año 2006, evaluaron el intercambio gaseoso del suelo en bosques expuestos a altas concentraciones de dióxido de carbono y ozono atmosférico, para entender la respuesta del suelo a la aplicación de diferentes tratamientos por medio de la respiración edáfica, obteniendo que dicho intercambio es mayor en la relación de suelo-CO<sub>2</sub>, siendo ésta de 60-80% del total del gas contenido en el recurso edáfico.

Chiriboga en 2008 valoró la respiración del suelo y determinó la biomasa de zonas de pastos activos y pastos abandonados, esto mediante la aplicación de un método directo en la zona de estudio y un método basal, encontrando que los pastos activos producían mayor cantidad de CO<sub>2</sub> que los no activos, además concluyeron que factores como la edafofauna y el clima influían en la producción del gas, estableciendo así dos métodos para medir la respiración del suelo (*in situ* y *ex situ*) de zonas de pastizales.

## 4.2. Valle del Mezquital

El Alto Mezquital, considerado como un área de gran importancia económica y cultural, ha sido objetivo de investigaciones sobre los recursos presentes.

López y sus colaboradores (1997) diseñaron un programa de manejo integral de los recursos por medio de investigación participativa, donde determinaron la función y estructura de la zona, además evaluaron los recursos naturales. Ésta investigación continúa desarrollándose con el propósito de generar la base de datos de los recursos en la región.

El mismo equipo de investigación en 1999 propuso un proyecto de desarrollo rural y programa sustentable denominado “PROGDEXTHI”, cuya meta es la implementación de estrategias y actividades para mejorar la calidad de vida de la comunidad mediante la participación de la misma.

Muñoz (1999), realizó un estudio morfológico y cartográfico del Valle del Mezquital, donde caracterizó los atributos físicos y químicos del recurso edáfico, elaborando posteriormente las cartas temáticas de suelo y uso de suelo, reconociendo graves problemas de salinidad, erosión y empobrecimiento de nutrientes.

Granados *et al.* en el 2004, realizaron un estudio sobre la agricultura Hñañhu, clasificándola como escurrimiento en seco, a través del manejo de unidades productivas de cultivos básicos; teniendo como resultado la descripción de los tipos de agrohábittats de la zona, la clasificación local de los tipos de suelo y la caracterización de las prácticas culturales locales.

García-Sánchez (2005) restauró la cubierta vegetal de los matorrales presentes, mediante el uso de plantas silvestres inoculadas con hongos micorrizógenos arbusculares endémicos e identificó los principales problemas ecológicos de la región, coincidiendo con investigaciones anteriores, en el sobrepastoreo, la extracción específica de especies y las actividades agrícolas de temporal y riego con uso de aguas residuales.

Hernández en el 2001 caracterizó y evaluó el suelo aplicando sistemas de información geográfica (SIG) en el Alto Mezquital, obteniendo un área evaluada de 72,000 ha, siendo los Leptosoles los de mayor presencia, representando el 39.4% del total; la actividad económica principal es la

agricultura de temporal siendo del 23.27%; además identificó los factores erosivos los cuales son la apertura de tierras agrícolas, el sobrepastoreo, tala y desmontes no controlados.

Mateos en el 2011 realizó la evaluación de microcuencas del Alto Mezquital, clasificando su forma de tipo redonda y de edad relativa joven, además identificó los problemas ecológicos como la alta pedregosidad, suelos someros, pendientes pronunciadas que propician el fenómeno erosivo del suelo y detalló las estrategias que llevan a cabo los pueblos establecidos para combatir éste fenómeno, como es desviación de cauces para el cultivo, el manejo de desechos vegetales y animales para evitar la erosión y el cultivo de plantas suculentas.

Vázquez (2012) evaluó el estado de la degradación presente en tierras de la microcuenca “La Muñeca” en la región del Alto Mezquital, donde determinó que la cuenca es de tipo alargada, con relieves pronunciados, además que alrededor de 25.37 km<sup>2</sup> presentan algún tipo de degradación, siendo la de tipo Biológica la que afecta en un 58.30%, detallando de forma similar las técnicas de los pobladores para mitigar dicho deterioro.

## **5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

La sobreexplotación de los recursos naturales, el cambio de uso de suelo y extensión de zonas urbanas, la extracción de especies tanto animales como vegetales entre otras prácticas no reguladas, por parte del hombre, ha permitido una transformación radical del medio con consecuencias irreversibles en muchos casos, mismas que se han visto reflejadas en el óptimo desarrollo de diversas comunidades, en especial las indígenas; tal es el caso del recurso edáfico, entendiendo como Suelo a la capa fina de material (orgánico e inorgánico) que cubre la superficie de la Tierra, la cual ha estado expuesta a los factores ambientales (material de origen, clima, organismos, topografía y tiempo) y ha sufrido su influencia y proporciona la base para el establecimiento y el crecimiento de las plantas así como para la prestación de servicios ecosistémicos, siendo dentro de las unidades geográficas más impactadas por la erosión de éste recurso, las zonas áridas y semiáridas (Zapata, 2006).

### **5.1. Zonas áridas, semiáridas y desertificación**

El fenómeno de la aridez ha sido definido en diversos conceptos, entre estos, el más aceptado fue propuesto por Rzedowski (1968), como aquellas regiones cuya provisión de agua es deficiente, la precipitación y humedad atmosféricas presentan valores por debajo del promedio mundial anual. Para México, este factor de precipitación es de 780 mm (CONAZA, 1994), por lo que las zonas donde la evaporación potencial es mayor a la lluvia anual se clasifican en el orden de semiáridas. Además, las regiones cuya precipitación anual es menor a 400 mm, son denominadas áridas o subhúmedas, en cambio si este factor es menor a los 100 mm, el área se considera como hiperárida o desértica (González, 2012). Sin embargo, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, define como zonas áridas aquellas superficies del territorio nacional en donde las precipitaciones son menores al orden anual de 250 mm y como semiáridas a aquellas en que la precipitación oscila entre más de 250 y menos de 500 mm, criterio que ha sido aceptado para los estudios científicos.

Los procesos que detienen o disminuyen el flujo de humedad entre las cuencas son generadores de aridez, México por su posición entre los 14° de latitud sur y 32° de latitud norte, es directamente afectado por el cinturón de alta presión subtropical del hemisferio norte; además por orografía, la presencia de macizos montañosos perpendiculares a la dirección de los vientos que soplan del mar, impide el paso de aire húmedo hacia la vertiente de sotavento, teniendo como consecuencia la descarga de humedad al elevarse y enfriarse después de chocar con el macizo, o bien porque se desvían hacia otras partes. En condiciones locales, otra causa de aridez son las depresiones profundas, situadas en las cadenas montañosas perpendiculares a la dirección de los vientos húmedos que soplan desde el mar, y con desniveles que sobrepasan los 500 m (Contreras-Arias, 1955; González, 2012).

Por otra parte, la desertificación se define como la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, resultante de diversos factores, entre ellos las variaciones climáticas y las actividades humanas (FAO, 1993).

Este fenómeno por el cual las tierras se hacen más secas, está aumentando en el país, donde se observa una mayor susceptibilidad al deterioro edáfico desencadenando una serie de procesos negativos, como son la pérdida de suelos por erosión eólica e hídrica, el empobrecimiento químico del suelo, la reducción del nivel de agua del subsuelo, la alteración general del ciclo

hidrológico, la menor regeneración natural de plantas herbáceas y leñosas, la reducción severa de la productividad de los ecosistemas y la pérdida de la diversidad biológica (Granados-Sánchez, *et al.* 2013).

Este fenómeno es generado por elementos físicos, biológicos, históricos, económicos, culturales y políticos, y para su mitigación, se han modelado diversos niveles de resolución en escalas espacial y temporal (Ibáñez, *et al.* 1997). Donde la interacción de los eventos naturales y cambios cíclicos de corto plazo del medio, junto a la degradación a largo plazo, dificultan la solución científica del problema. Sin embargo, se tiene esclarecido que las actividades humanas son el principal motivo del comienzo de un proceso de desertificación en una zona vulnerable relacionado con actividades como (FAO, 1993):

- Cultivo en suelos frágiles o expuestos a fenómenos de erosión hídrica y/o eólica.
- Reducción en el tiempo de barbecho de las tierras cultivadas y la falta de fertilizantes orgánicos y minerales.
- El sobrepastoreo de plantas herbáceas y leñosas.
- La explotación excesiva de los recursos madereros.
- El uso descontrolado del fuego para la regeneración de los pastos, la caza, los desbroces con fines agrícolas.
- Las técnicas de cultivo que destruyen la estructura del suelo y en particular el uso de maquinaria agrícola poco adecuada.
- Las prácticas agrícolas extensivas como los cultivos comerciales.
- El desvío del curso de los ríos para levantar diques de riego.
- El riego de los suelos cuya textura favorece la salinización o la alcalinización, o incluso el anegamiento.

## 5.2. Breve descripción del sistema edáfico

Dado que el suelo es un recurso natural finito en una escala temporal humana, no es renovable, además este medio es la base para el desarrollo agrícola y del desarrollo sostenible, da fundamento a los alimentos, piensos, combustible, fibras, disponibilidad de agua, ciclo de nutrientes, las existencias de carbono orgánico y la biodiversidad; incluso ofrece una plataforma para la infraestructura. La superficie de suelo fértil es limitada y está sometida a una presión cada vez mayor debido al cambio climático y a los usos del suelo inadecuados y en competencia entre sí, que redundan en una degradación cada vez mayor (FAO, 2006). Las características y funciones físicas y químicas, la materia orgánica y la actividad biológica del suelo son fundamentales para la producción agrícola y determinan, en su complejidad, la fertilidad y productividad del mismo.

Dentro del Cuadro 1 y 2 se muestran los principales factores que generan el suelo, ofreciendo una idea generalizada del proceso de formación, desde los elementos globales como el clima, hasta actividades locales como son el desarrollo de los organismos en este sistema. Además se exponen los tipos de edafogénesis que permiten entender la dinámica ecológica del medio para conocer los componentes del recurso y los diferentes tipos de suelo que pueden ser descritos.

<b>Cuadro 1. Formación Del Suelo</b>	
El suelo tarda gran cantidad de años en formarse. El tiempo depende de las características ambientales de la zona y se estima un periodo entre 100 y 10000 años. Los factores que intervienen son:	
Factores Climáticos	Principalmente la temperatura y las precipitaciones, ambas actúan aumentando la meteorización y el arrastre de materiales.
Características del Relieve	La pendiente hace que los materiales sean arrastrados por las aguas impidiendo su penetración. Los terrenos llanos favorecen la acumulación de materiales y por tanto la formación de nuevos suelos. La altitud y la orientación son responsables en parte de la climatología del lugar.
El Tipo de Roca Madre	Algunas rocas son blandas y fáciles de meteorizar como por ejemplo las arcillas o calizas. Sin embargo otras son duras y difíciles de transformar como el granito.
La Actividad Biológica	La formación del suelo es un proceso de sucesión biológica y será muy importante la actividad de los organismos. Estos serán diferentes dependiendo de la climatología y los tipos de suelo.
Aguilera, 1989; Cotler, 2003; FAO, 2006; Gayoso y Alarcón, 1999; & SEMARNAT, 2009.	

<b>Cuadro 2. Proceso de Formación de Suelo</b>		
El suelo es el resultado de la alteración de la materia mineral bajo la acción de diversos factores climáticos y bióticos.		
Este proceso es denominado Edafogénesis:		
Descomposición y alteración del material original.	Meteorización	Física o mecánica: Rotura o fragmentación de la roca madre.
		Química: Transformación de minerales en otros compuestos por reacciones químicas.
		Biológica: Transformación de la roca madre por efecto de los seres vivos, principalmente líquenes, bacterias y algas cianofíceas.
Formación de materia orgánica o <i>humus</i> .		La fragmentación de las rocas, permite el enraizamiento de plantas mayores, que promueven una ruptura de gran impacto. Esto atrae a animales que por medio de desechos o deterioro físico (escarbar, remover, pisar, etc.) continua el proceso. La muerte de organismos y posterior descomposición forman la cobertura de humus.
Formación y transporte de material soluble.		La lluvia arrastra los materiales en dirección de la pendiente depositando en diferentes lugares y provocando una diferenciación vertical. Este proceso de arrastre o lavado se invierte en las épocas de sequía ya que el agua asciende por capilaridad. Las plantas al ir extrayendo nutrientes y agua, se vuelve a formar materia orgánica que se deposita en la superficie, generando de nuevo el ciclo.
Aguilera, 1989; Cotler, 2003; FAO, 2006; Gayoso y Alarcón, 1999; & SEMARNAT, 2009.		

El Cuadro 3 muestra los principales componentes que integran los suelos y las características sobresalientes por los cuales se pueden identificar, basándose por el contenido y estado de agregación de la materia se definen 3 principales grupos, Fase Sólida (Orgánica e Inorgánica) formada por todos los elementos sólidos y semisólidos, Fase Líquida que incluye todos los fluidos principalmente agua y la Fase Gaseosa formada por todos los efluvios, siendo de gran importancia el oxígeno (O<sub>2</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

En conjunto con el Cuadro 4 donde se muestran los tipos de suelo, tomado de los criterios propuestos por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), cuya clasificación depende de sus componentes principales (FAO, 2006).

<b>Cuadro 3. Componentes del Suelo</b>			
Fracción Inorgánica Sólida	<p>Las partículas se clasifican según el tamaño. Los tamaños determinan la textura del suelo.</p> <p>El análisis granulométrico estudia las cantidades de cada uno de los tamaños.</p> <p>Las arcillas retienen el agua y las sales minerales.</p> <p>Las arenas facilitan la circulación de agua y de gases.</p> <p>El limo es el tamaño medio entre las arenas y las arcillas, presenta características intermedias.</p> <p>Cuando en un suelo aparecen las mismas cantidades de los tres tipos se dice que es un suelo equilibrado o franco.</p>	Rocas	+ de 256 mm
		Grava gruesa	De 64 a 256 mm
		Grava	De 2 a 64 mm
		Arena gruesa	De 1 a 2 mm
		Arena fina	De 0.02 a 1 mm
		Limo	De 0.02 a 0.002 mm
		Arcilla	Menos de 0.002 mm
<p>La estructura del suelo es determinada por la forma en que se organizan las diferentes partículas.</p> <p>La estructura puede cambiar dependiendo de la humedad o de la presencia de seres vivos.</p>	Bloques: Partículas de suelo que se agrupan en bloques casi cuadrados o angulares con los bordes más o menos pronunciados.		
	Prismática y Columnares: Partículas de suelo que han formado columnas o pilares verticales separados por fisuras verticales diminutas, pero definidas		
	Laminar: Se compone de partículas de suelo agregadas en láminas o capas finas que se acumulan horizontalmente una sobre otra.		
Fracción Orgánica	<p>La cantidad de materia orgánica puede variar entre el 1% en suelos en desertificación y el 100% en la Turba. El promedio es del 5%.</p> <p>Humus: Materia orgánica en descomposición y los productos de secreción y excreción de los seres vivos.</p> <p>El proceso de formación del humus hasta su estabilización en el terreno es la humificación.</p> <p>El humus está íntimamente ligado a las arcillas formando complejos organo-minerales.</p> <p>Gracias a estas uniones el humus queda retenido en las capas superiores del suelo y puede ser aprovechado por las plantas, de lo contrario, por efecto del agua sería lavado hasta horizontes inferiores y no se podrían aprovechar los minerales como Ca, Mg, K, Na, NH<sub>4</sub> o H.</p>		

El Agua y el Aire	<p>Los diferentes tipos de partícula dejan oquedades que llegan a ocupar entre el 40 al 60 % del suelo.</p> <p>Estas cavidades suelen estar ocupadas por aire y agua.</p> <p>Es de gran importancia que las cavidades estén comunicadas con la atmósfera para que el aire penetre en ellas. Los abonos orgánicos, las lombrices y el arado del terreno contribuyen a la Aeración.</p> <p>La concentración de O<sub>2</sub> descende a cuanto mayor sea la profundidad.</p> <p>La concentración de CO<sub>2</sub> es mayor en el suelo que en la atmósfera debido a la respiración y descomposición de los organismos que viven en el suelo.</p>
	<p>Una gran cantidad del agua se filtra por el terreno desapareciendo hacia corrientes subterráneas.</p> <p>El agua que se encuentra retenida en los huecos es la que usarán las plantas.</p> <p>Se llama capacidad de retención de un suelo al porcentaje de agua que retiene. La capacidad de retención depende de la textura y de la estructura.</p> <p>Un suelo arenoso no retiene prácticamente nada de agua, mientras que un suelo arcilloso retiene en exceso.</p>
Aguilera, 1989; Cotler, 2003; FAO, 2006; Gayoso y Alarcón, 1999; & SEMARNAT, 2009.	

<b>Cuadro 4. Clasificación del Suelo con base en los criterios adoptados por INEGI</b>	
Unidad	Principales características
Acrisol	<i>Suelo Ácido.</i> Unidades edáficas localizadas en zonas tropicales o templadas muy lluviosas. Bajo ambientes óptimos, se forman en vegetación de selva o bosque. Se caracterizan por la acumulación de arcillas en el subsuelo, además de presentar colores rojo, amarillo o amarillo claros con manchas rojas, son muy ácidos y además poseen pocos nutrientes.
Andosol	<i>Tierra Negra.</i> Suelos de origen volcánico, integrados por ceniza, con alto contenido de alófono. Son generalmente de color oscuro y retienen gran cantidad de humedad. Se presentan en vegetación de bosque o selva. Son de bajo rendimiento agrícola debido a que contienen gran cantidad de fósforo y no puede ser absorbido por plantas
Arenosol	<i>Suelo Arenoso.</i> Unidades de textura gruesa (+65% de arenas). Poseen alta permeabilidad, pero contiene pocos nutrientes y retiene cantidades menores de humedad. Altamente susceptibles a la erosión
Cambisol	<i>Suelo Cambiante.</i> Unidad poco desarrollada presente en cualquier tipo de vegetación exceptuando zonas áridas. El subsuelo presenta una capa de terrones con vestigios de material parental y contenido de arcillas, carbonato de calcio, fierro y/o magnesio. Son muy abundantes en México.
Castañozem	<i>Tierra Castaña.</i> Suelo de pH alcalino de zonas semiáridas a sub-húmedas, presentes en pastizales o matorrales. Unidades profundas (+70 cm), donde la capa superior es de color pardo o rojizo oscuro y poseen gran cantidad de materia orgánica y nutrientes. Ideal para el cultivo de granos y hortalizas.

Chernozem	<i>Tierra Negra</i> . Suelos alcalinos de zonas áridas o de climas lluviosos. Caracterizado por presentarse en pastizales y matorrales, profundidad mayor a 80 cm, con capa superior negra y rica en materia orgánica. Su uso se destina al uso de pastizales en ganadería extensiva.
Feozem	<i>Tierra Parda</i> . Unidades que poseen capa superiores oscuras, ricas en nutrientes y materia orgánica, ausencia de capas de cal. Cuando son profundos, se asocian a zonas planas, por el contrario, en menor profundidad se localizan en zonas de laderas o pendientes. Utilizados para agricultura de hortalizas y pastoreo.
Fluvisol	<i>Suelo de Río</i> . Son unidades cuyo son transportados por agua. Poseen poco desarrollo estructural, siendo éstas débiles, además de profundidades medias. Las capas se conforman por contener de forma alterna arenas, rocas y gravas redondeadas. Uso principal en agricultura.
Gleysol	<i>Suelo Pantanoso</i> . Suelos de zonas altamente húmedas, con profundidad de 50 cm. Presentan colores que van de verde, azul o gris, por el contrario al secarse se tornan rojizos. Se localizan en pastizales y zonas costeras, especialmente manglares. Son unidades muy inundables y altas concentración de sales. Uso pecuario y en ocasiones para el cultivo de arroz o caña.
Histosol	<i>Suelos de Tejidos Orgánicos</i> . Gran contenido de materia orgánica (+20%), cuyas coloraciones son oscuras. Alta retención de humedad, por lo que se localizan principalmente en zonas de pantano y lagos. Utilizados para el cultivo de hortalizas.
Litosol	<i>Suelo de Roca</i> . Unidades de mayor abundancia en el país. De poca profundidad (-10 cm) siempre limitada por la presencia de rocas. El uso es directo a la vegetación presente, estableciendo zonas agrícolas, pecuarias o forestales.
Luvisol	<i>Suelo con acumulación de Arcilla</i> . Unidades de suelos templados o tropicales, cuya vegetación es de bosque o selva. Presentan gran cantidad de arcilla en el subsuelo, cuyo color va de rojo a amarillo. Utilizados principalmente en agricultura, con buenas observaciones para cultivos de café.
Nitosol	<i>Suelo Claro</i> . Unidades de color rojizo muy claros y profundos (150 cm); la capa superficial es delgada y de color oscuro. Se considera que la fertilidad es muy alta. Se recomienda para uso forestal.
Planosol	<i>Suelo Llano</i> . Unidades de relieves planas, con tendencia a la inundación, de profundidad media (entre 50 cm y 10 cm), presentes en climas templados y semiáridos, con vegetación de pastizal o matorral. Uso más frecuente en ganadería de bovinos, caprinos y ovinos.
Ranker	<i>Pendiente Fuerte</i> . Unidades de climas templados húmedos a semifríos, principalmente en bosques. El pH es ácido, con coloración oscura y gran cantidad de materia orgánica. Uso indicado de tipo forestal.
Regosol	<i>Suelo que cubre Roca</i> . Sistemas edáficos con poco desarrollo estructural y las capas no se distinguen entre sí. Poca cantidad de materia orgánica y guardan mucha relación con la roca madre. Utilizado principalmente en el cultivo de coco y sandía.
Rendzina	<i>Ruido</i> . Suelos someros de climas semiáridos, templados o tropicales; con abundante materia orgánica. De igual forma presenta gran cantidad de arcillas y materia orgánica, pero son poco profundos (-25 cm). Puede ser utilizado tanto para agricultura y ganadería, pero es altamente la implementación forestal.

Solonchak	<i>Suelos Salinos.</i> Zonas de gran acumulación de salitre ya sea lagunas costeras o lagos. Vegetación Halófitas. Uso principalmente agrícola de cultivos resistentes a sales, aunque algunas veces es utilizado para pastoreo con resultados no favorables.
Solonetz	<i>Suelo con alto contenido de Sales.</i> Presenta subsuelo arcilloso con terrones duros en columnas o prismas cuyo contenido principal son sales de sodio. Casi no presenta vegetación, siendo solamente pastizales o matorrales. Sin uso agrícola recomendado.
Vertisol	<i>Suelo que se Revuelve.</i> Unidades localizadas en zonas templadas o cálidas; cuya vegetación es de pastizales hasta selva baja. Alto contenido de arcilla y se observan facetitas (superficies de deslizamiento). Presentan coloraciones de gris oscuro a negro, siendo algunas ocasiones color pardo rojizo. Uso principal agrícola para el cultivo de caña, cereales, hortalizas y algodón.
Xerosol	<i>Suelo Seco.</i> Unidades de zonas áridas y semiáridas, cuya vegetación principales son los pastizales y matorrales. Subsuelo con gran cantidad de arcillas. El uso agrícola es determinado por la humedad, siendo principalmente agricultura de temporal.
Yermosol	<i>Suelo Desolado.</i> Suelo de zonas áridas e hiperáridas. La vegetación es de pastizal o matorral. Son de colores claros, y presentan muy poca cantidad de materia orgánica. El uso agrícola solo es factible si se cuenta con sistemas de riego, aunque regularmente solo son extraídas las especies que ahí se desarrollan.
INEGI, 2008.	

Para la clasificación, es utilizado por los edafólogos un elemento denominado perfil del suelo (Cuadro 5), donde se describen cada uno de los horizontes que lo conforman, siendo los principales (Aguilera, 1989):

- Horizonte 0 (capa superficial del horizonte A): Zona más superficial del suelo, formado por hojas, ramas y restos vegetales.
- Horizonte A (zona de lavado vertical): Zona superficial donde enraíza la vegetación. Su color es generalmente oscuro por la abundancia de materia orgánica descompuesta o humus elaborado, determinando el paso del agua arrastrándola hacia abajo, de fragmentos de tamaño fino y de compuestos solubles.
- Horizonte B (Eluviación): Carece de humus, su color es más claro (pardo o rojo), en él se depositan los materiales arrastrados desde arriba, principalmente, materiales arcillosos, óxidos e hidróxidos metálicos, situándose en este nivel los encostramientos calcáreos áridos y las corazas lateríticas tropicales.
- Horizonte C (subsuelo): Constituido por la parte alta del material parental, sobre el que se apoya el suelo, fragmentado por la alteración mecánica y química, sin embargo aún puede reconocerse las características originales del mismo.

- Horizonte D/R (Material Parental/MP): Material rocoso subyacente que no ha sufrido ninguna alteración química o física significativa. Se distingue entre D, cuando el suelo es autóctono y el horizonte representa a la roca madre y R, cuando el suelo es alóctono y la roca representa sólo una base física sin una relación especial con la composición mineral del suelo que tiene encima.

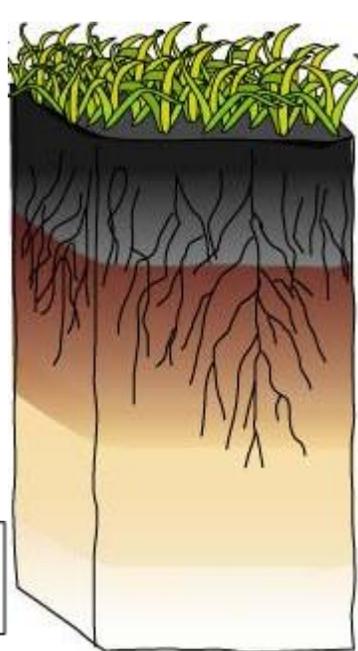
<b>Cuadro 5. Perfil del Suelo: Morfología</b>	
El perfil del suelo representa las diferentes capas que lo conforman desde un corte vertical. Depende principalmente del desarrollo que haya alcanzado en su formación.	
En un suelo modelado:	
Horizonte A: De Lixiviación o Eluviación	Es el más superficial, está formado por una gran cantidad de humus. Es de color oscuro. Es un horizonte de lavado, la materia es arrastrada hacia abajo por el agua. Se pueden diferenciar subcapas:
	A0 Hojarasca, Residuos Orgánicos.
	A1 Residuos orgánicos en descomposición. Color oscuro, gran contenido de materia orgánica. Retención de iones de Ca <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> .
	A2 Color claro, materia mineral abundante y poca materia orgánica. Zona de transición de A - B
Horizonte B De Precipitación o Eluviación	Se llama también subsuelo. A veces presenta un color más claro ya que contiene menos humus. Aunque suele ser oscuro. Acumulación de materiales procedentes de la capa superior. Sales de Calcio, Aluminio o Hierro. Su espesor dependerá de la cantidad de lluvia y de la retención de materiales en la capa A.
Horizonte C	Formado por fragmentos de roca madre que estarán menos alterados en las zonas inferiores.
Material parental	Es la roca original, que se encontrará poco meteorizada o fragmentada

A

B

C

MP



Aguilera, 1989; Cotler, 2003; FAO, 2006; Gayoso y Alarcón, 1999; & SEMARNAT, 2009.

### 5.3. Degradación de Suelo

La degradación del suelo se define como el cambio en la salud óptima del suelo (entendida como la aptitud del suelo de funcionar como un sistema vivo), ocasionado por la disminución en la capacidad del ecosistema para producir bienes o servicios para los usuarios. Un suelo degradado posee un estado de salud bajo que no puede ejercer las funciones básicas para el desarrollo del ecosistema (FAO, 2014; LADA, 2013). Ésta problemática define los procesos dinámicos, consecuencia del cambio en la calidad y productividad del suelo, modificado de estados anteriores del mismo. Es un elemento determinante del cambio climático, la erosión y salinización del recurso edáfico, en interacción negativa con el ciclo hidrológico, desequilibrando así la capacidad biológica del sistema; por ejemplo, la reducción de manchas de vegetación, y el subdesarrollo de las comunidades presentes. Se reconocen tres tipos de degradación interna del suelo que son: Física, Química y Biológica (Hernández, 2006). La degradación química y física son los principales procesos erosivos, siendo la de primer tipo la que influye directamente en la disminución o eliminación de la productividad biológica, mientras que la física modifica la estructura, resultando por ejemplo en la pérdida o disminución en la capacidad para absorber o almacenar agua. En el 2002 el 23.5% de superficie nacional mostraba evidencias de estos tipos de degradación: 17.8% correspondía de tipo química (siendo el proceso de degradación más importante en el país) cuya principal afectación es la disminución de la fertilidad y 5.7% a la física resultando en graves problemas por compactación (SEMARNAT, 2003a).

#### 5.3.1. Degradación Biológica del Suelo

Aunque la degradación edáfica de tipo biológico, es menos considerable en cuanto a superficie afectada, es significativa en algunas zonas particularmente vulnerables del país (Figura 3). La degradación biológica, implica la pérdida de materia orgánica y de los procesos que mantienen la fertilidad del suelo (Figura 4); de igual manera reduce la actividad de la flora y fauna en el recurso, lo cual provoca la desestabilización de la dinámica ecológica del medio.

Esto es principalmente causado por la explotación de los recursos forestales, el uso indiscriminado de aguas residuales, la aplicación desmesurada de agroquímicos y pesticidas; teniendo como consecuencia directa, diferencias en la concentración de nutrientes y acumulación progresiva de agentes tóxicos (Velázquez *et al.*, 2001). Este proceso afecta el 3.6% del territorio nacional, siendo la península de Yucatán la región más afectada (SEMARNAT, 2003b).

La degradación biológica se considera un problema moderado para las condiciones de México, sin embargo existen áreas con degradación severa, que evidencian los procesos agropecuarios intensivos que utilizan quemados agrícolas recurrentes cada año (SEMARNAT, 2003c).



**Figura 3.** Área de Influencia por degradación Biológica en los suelos de México (SEMARNAP, 1999).

### 5.3.2. Indicadores de degradación biológica en suelos

Para la evaluación de este tipo de degradación, es necesario identificar los atributos más sensibles a los cambios del medio, para este caso, es indispensable el estudio de las comunidades que se desarrollan en el ambiente edáfico, ya sea por la manipulación directa de las especies o los productos/desechos que generan, conociéndose como principales estudios:

- Población y diversidad de la biota del suelo: Se refiere a los efectos de los tratamientos de grupos de organismos dentro de una clase taxonómica específica; Bacterias y Hongos mediante técnicas de conteo viables cultivados en medio Agar, sin embargo este enfoque no está validado como medio de predicción de la poblaciones dentro del recurso del suelo. Para ello, se ha propuesto el estudio de la diversidad taxonómica o fisiológica de los microorganismos edáficos, por medio de índices como McIntosh, Simpson y Shannon; para la demostración de los efectos de perturbaciones o agresión ambiental, esto es que la diversidad es una medida de la entropía y que por lo tanto debe indicar la cantidad de energía requerida para mantener la organización de la misma (Atlas, 1984). En resumen,

el estudio histórico de las comunidades de microorganismos del suelo, permiten conocer la dinámica del medio y los procesos de degradación que se presenten al alterar la composición de las mismas.

- **Acumulación de sustancias tóxicas:** Las perturbaciones en la dinámica de las comunidades microbianas, tiene como consecuencia en la acumulación de sustancias nocivas, por ejemplo, las bacterias del género *Nitrobacter* (WINOGRADSKY 1892), bajo estrés de amoníaco por procesos de desertificación/contaminación, siendo éstas inhibidas por altas concentraciones, resultando en la acumulación tóxica de nitrito ( $\text{NH}_4^+$ ) siendo ésta relacionada directamente con suelos que reciben grandes cantidades de desechos de origen animal. Por lo tanto el estudio de sustancias tóxicas dentro del suelo permite conocer el grado y tipo de degradación presente (López, 2002).
- **Cambios en el estado *redox* del suelo:** Las fluctuaciones en el estado de oxidación-reducción son asociados con prácticas que incrementan la humedad del suelo, sin embargo cuando el sistema consume más oxígeno del que produce, se da una tendencia anaerobia y el acúmulo de componentes reductivos como son Fe (II), Mn (II), sulfuro y metano en solución; ejemplo de ello se tienen suelos con prácticas de labranza y altamente compactados o que fungen como receptores de agua (Kennedy y Smith, 1995).
- **Ciclaje de nutrientes:** Son las principales evaluaciones del estado funcional de los ecosistemas terrestres deteriorados, entre los estudios se encuentran las enzimas del suelo, componentes del ciclo de nitrógeno (principalmente nitrificación, mineralización y fijación); descomposición de celulosa y/o madera y principalmente la evaluación de la respiración edáfica, que funge como indicador del estado funcional del suelo (López, 2002). Es por esto que la presente investigación se enfoca en la evaluación del ciclaje de carbono, por medio de la respiración del suelo como un indicador de la degradación biológica de dicho recurso.

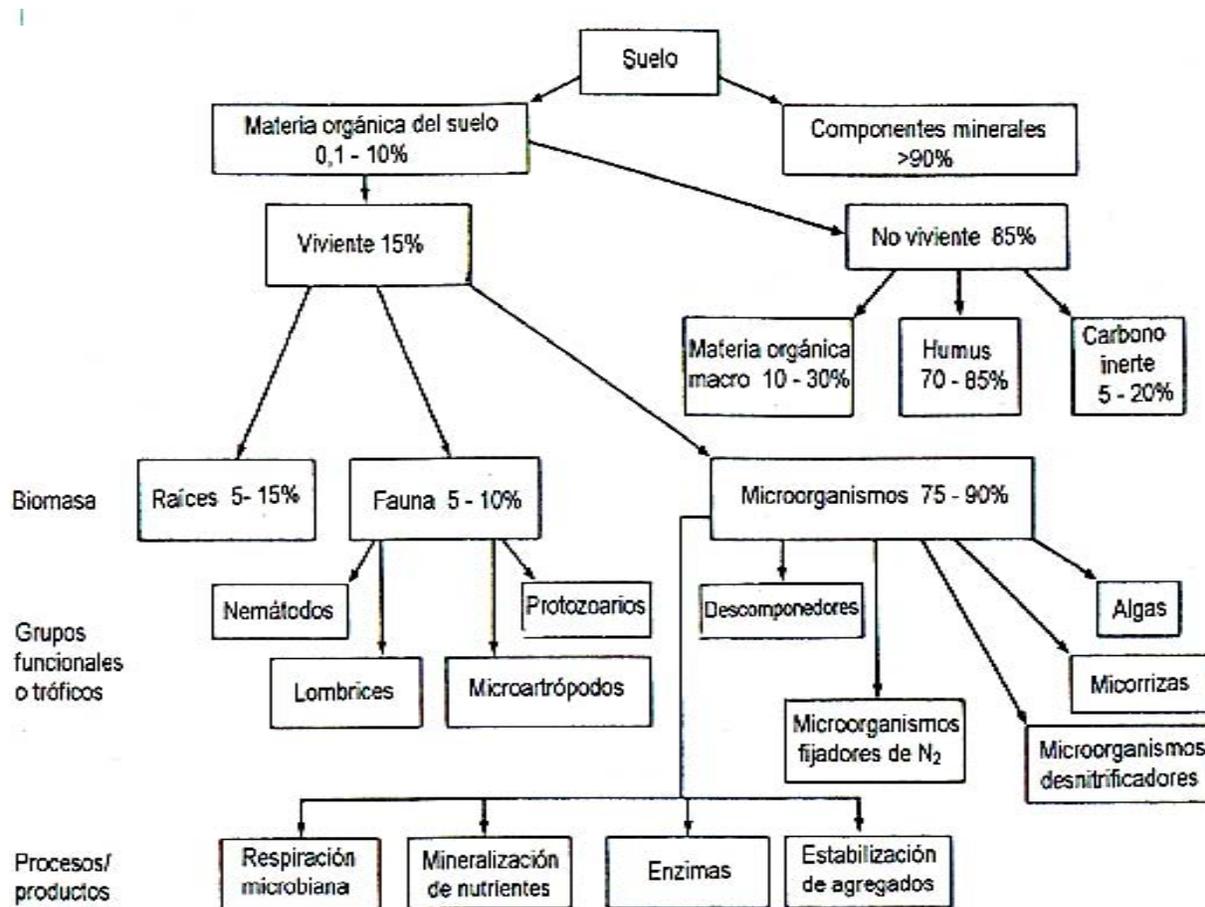


Figura 4. Grupos funcionales y procesos/productos que componen un suelo fértil (Pankhurst *et al.*, 1997).

#### 5.4. Respiración Edáfica

Como parte integral del ciclo del carbono en los ecosistemas, la respiración del suelo está relacionada con diversos componentes de la producción del ecosistema. Está íntimamente asociado a con los procesos de nutrientes tales como la descomposición y mineralización. Por otra parte la respiración juega un papel crítico en la regulación de la concentración de CO<sub>2</sub> y participa en la dinámica atmosférica del clima en el sistema terrestre. Por lo tanto, se convierte en relevante para la mitigación del cambio climático y la aplicación de los tratados sobre el clima en términos de almacenamiento de carbono y comercio.

Los suelos son sistemas que cuentan con una flora microbiana propia, la cual dependiendo de su actividad metabólica puede contribuir a la remediación de los sitios contaminados. La actividad metabólica de los microorganismos aerobios y de algunos anaerobios del suelo puede ser cuantificada por medio de la producción de  $\text{CO}_2$ , siendo un producto del intercambio gaseoso de dichos microorganismos (Figura 5), además, éste parámetro puede estar estrechamente relacionado con la degradación de los contaminantes (Alef, 1995; Bossert y Kosson, 1997).

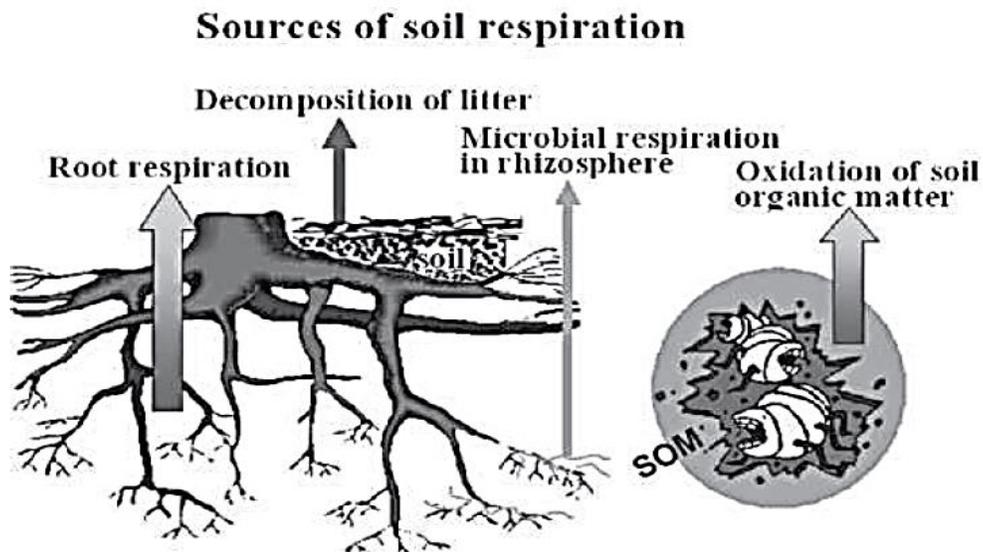


Figura 5. Componentes en la respiración del suelo (Luo y Zhou, 2006).

En el proceso de la oxidación de la materia orgánica por microorganismos aerobios, el oxígeno funciona como el aceptor final de electrones, siendo el producto final  $\text{CO}_2$  y agua, por lo que la actividad metabólica de los microorganismos edáficos puede ser cuantificada por la medición de la producción de  $\text{CO}_2$  o consumo de  $\text{O}_2$ . (Nannipieri *et al.*, 1990). Como en otras actividades metabólicas, ésta depende del estado fisiológico de las células y está influida por diferentes factores en el suelo como la humedad, temperatura, disponibilidad de nutrientes y estructura del suelo (Figura 6). La tasa instantánea de flujo de salida de  $\text{CO}_2$  edáfico está controlada no sólo por el ritmo de la respiración del suelo, sino también por el transporte de dióxido de carbono a lo largo del perfil del suelo y en la superficie del mismo. El transporte de éste gas se ve influido por la fuerza del gradiente de concentración de  $\text{CO}_2$  entre el suelo y la atmósfera, la porosidad y la

velocidad del viento, entre otros factores. En un estado estacionario, la tasa de flujo de salida de CO<sub>2</sub> en la superficie edafológica es igual a la tasa de producción del compuesto dentro de éste. Siendo en este caso que el eflujo de CO<sub>2</sub> edáfico es prácticamente equivalente a la respiración del suelo (Luo y Zhou, 2006).

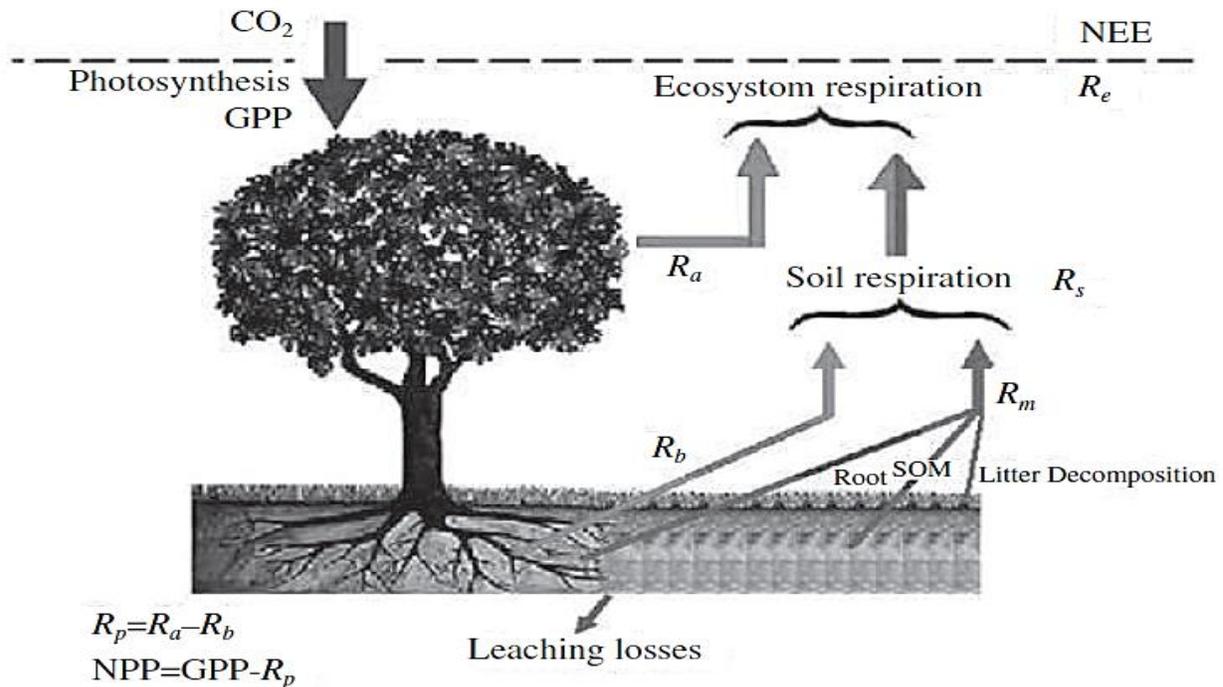


Figura 6. Proceso de respiración edáfica (Luo y Zhou, 2006).

#### 5.4.1. Métodos para la determinación de la respiración edáfica

La producción microbiológica de CO<sub>2</sub> en el suelo puede ser determinada incubando el suelo en jarras, cajas de Petri cerradas o en diferentes tipos de matraces o recipientes. Una de las técnicas más sencillas para la cuantificación de CO<sub>2</sub> es adsorbiéndolo en hidróxido de sodio (NaOH) y cloruro de bario (BaCl) y determinándolo por titulación con ácido clorhídrico (HCl). Otros métodos para la determinación de CO<sub>2</sub> se basan en los cambios de conductividad eléctrica de la solución de NaOH o mediante cromatografía de gases (Brookes y Paul, 1987) o espectroscopia de infrarrojo. El consumo de O<sub>2</sub> también puede ser estimado por medio de un electrorrespirómetro o cromatografía de gases para determinar la actividad metabólica de los microorganismos en el suelo (Trevors, 1985). Siendo las principales técnicas para evaluar el proceso de respiración:

- a) **Cámara dinámica cerrada:** Este método consiste en utilizar una cámara cerrada que cubra un área de superficie de suelo, permite que el aire circule a través de un bucle entre la cámara y un sensor de detección de CO<sub>2</sub> o una trampa que absorba el gas (Figura 7). Al cerrar este sistema la acumulación de gas producto de la respiración en la superficie, estará constantemente registrado o atrapado, realizando lecturas en periodos de tiempo elegidos por el investigador. La tasa de aumento de CO<sub>2</sub> es proporcional al eflujo de CO<sub>2</sub> del suelo. Para determinar la tasa de respiración, se suele utilizar dos estaciones temporales para medir el aumento de la concentración de la cámara de CO<sub>2</sub>. Con dos valores de concentración del gas medidos al inicio y final, respectivamente, durante un corto tiempo, el incremento en la cantidad de gas en la cámara se puede utilizar para estimar la tasa de eflujo de CO<sub>2</sub> en el suelo (Field *et al.*, 1989).



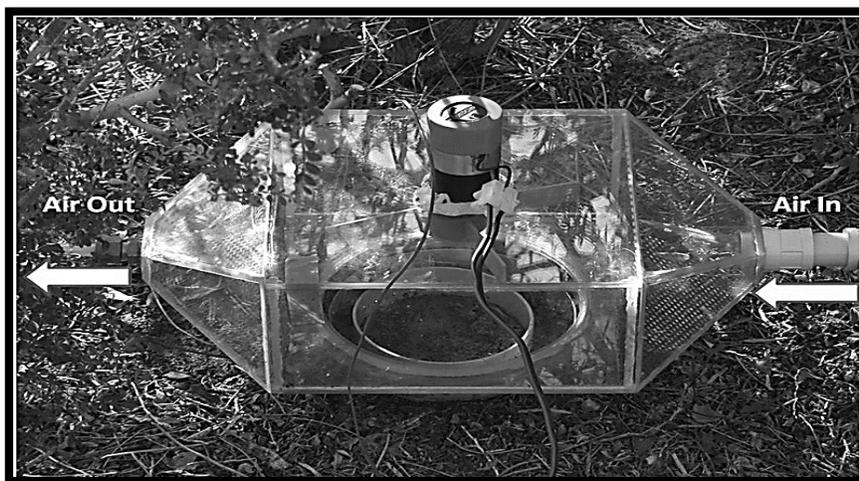
**Figura 7.** Cámara dinámica cerrada. Fuente: USGS, 2012.

- b) **Cámara estática cerrada:** Similar al método dinámico, donde la cámara posee un absorbente químico dentro, que atrapa las moléculas de CO<sub>2</sub>, sólo por un determinado tiempo (Figura 8). Los adsorbentes químicos para la captura del gas incluyen solución alcalina, ya sea NaOH o KOH, otro método utiliza la combinación de sosa y cal (Ca(OH)<sub>2</sub>). Las soluciones álcali, son las técnicas con mayor antigüedad en medición de la respiración del suelo y de mayor uso por la fidelidad de los resultados (Lundegårdh, 1927), es por ello que, el método sosa-cal ha sido ampliamente utilizado porque resulta una técnica barata y mayor facilidad de producción. La cámara es sellada, previniendo cualquier tipo de aireación ambiental, exceptuando la liberación de gas carbónico de la superficie del suelo (Grogan, 1998).



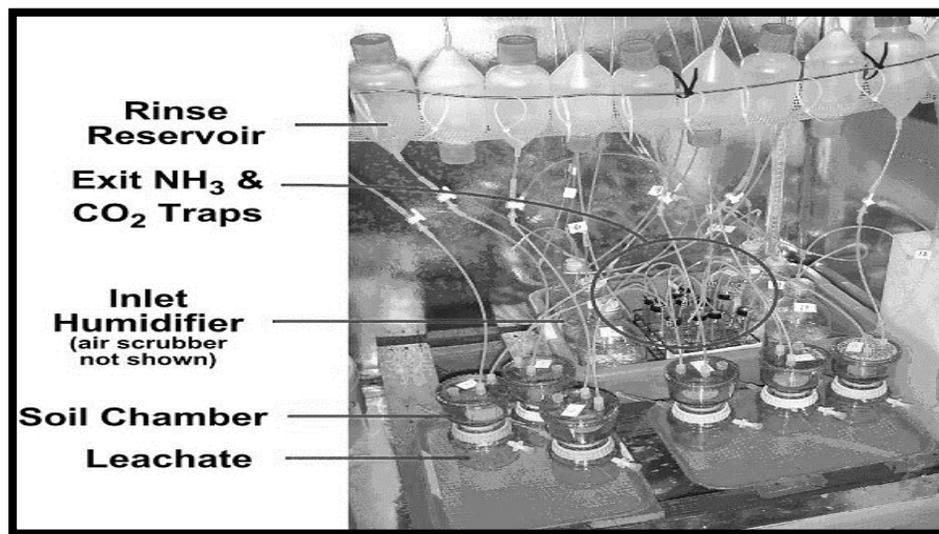
**Figura 8.** Trampa alcalina. Fuente: ANZBIOCHAR, 2008.

- c) **Cámara dinámica abierta:** El método utiliza un modo diferencial para estimar el flujo de  $\text{CO}_2$  en contraste con el sistema dinámico cerrado que utiliza los cambios en la concentración de  $\text{CO}_2$  durante un período de tiempo. El aire del ambiente fluye desde una entrada a través de una cámara a una toma o captura del gas (Figura 9). El aire que sale de la cámara va enriquecido en  $\text{CO}_2$ , esta concentración es relativa al aire que entra en la cámara, y que es adicionado a la liberación de  $\text{CO}_2$  de la respiración en la superficie del suelo. Suponiendo que las tasas de respiración y flujo de aire a través de la cámara son constantes, la respiración del suelo puede ser estimado por la diferencia del gas de entrada al de salida (Fang y Moncrieff, 1998).



**Figura 9.** Cámara dinámica abierta. Fuente: Hunt y Midwood, 2013.

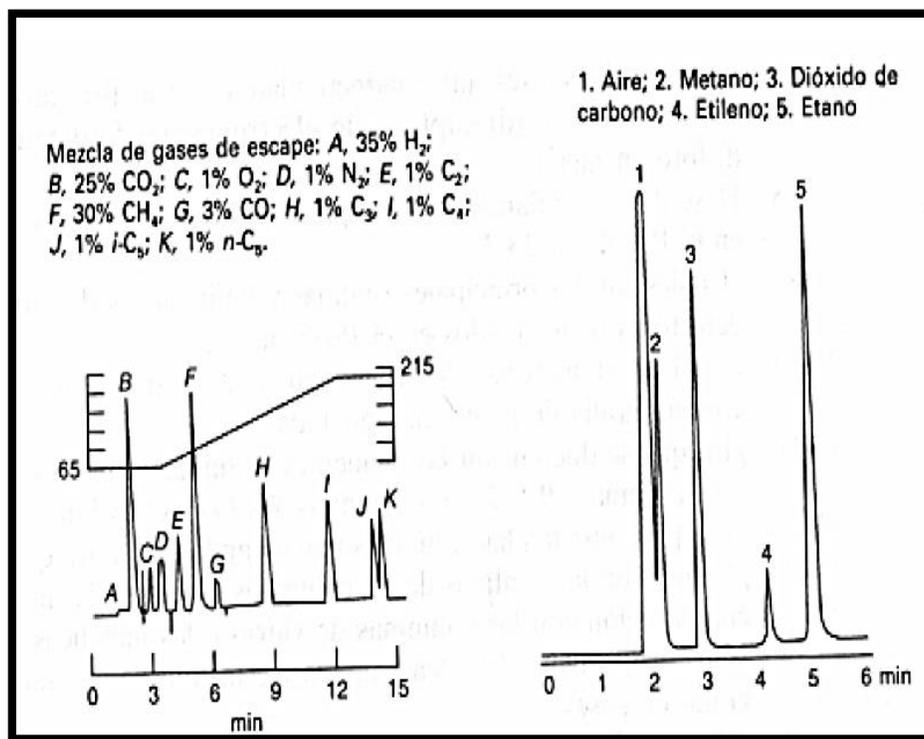
- d) **Cromatografía de Gases:** Las muestras del gas producto de la respiración son transportados desde el campo en recipientes de vidrio selladas hasta su análisis. Como las muestras se extraen con la aguja, el aire de compensación se extrae simultáneamente en la cámara a través de un tubo de equilibrio de presión (Figura 10). El procedimiento de toma de muestras de gas es similar a los métodos de cámara cerrada estática, sin embargo, las tapas son opacas para eliminar fijación de CO<sub>2</sub> por las plantas incluidas en la cámara durante las mediciones; las mismas están equipadas con septos de goma para jeringa de muestreo (Gulledge y Schimel, 2000).



**Figura 10.** Cromatografía de CO<sub>2</sub> en suelo. Fuente: Higashi, Fan y Lane, 2001.

Posteriormente, la muestra se volatiliza y se inyecta en la cabeza de una columna cromatográfica; la elución se produce por el flujo de una fase móvil de un gas inerte, y a diferencia de la mayoría de los tipos de cromatografía, la fase móvil no interacciona con las moléculas del analito; su única función es la de transportar el analito a través de la columna.

Existen dos tipos de técnica: la cromatografía gas-sólido (GSC) y la cromatografía gas-líquido (GLC). El método de gas-sólido (Figura 11) se basa en una fase estacionaria sólida en la cual se produce la retención de los analitos como consecuencia de la adsorción física, ésta ha tenido aplicación limitada debido a la retención semipermanente de las moléculas activas o polares y a la obtención de picos de elución con colas (una consecuencia del carácter no lineal del proceso de adsorción), de modo que esta técnica no ha encontrado una gran aplicación excepto para la separación de ciertas especies gaseosas de bajo peso molecular. En cambio el método de gas-líquido se basa en la distribución del analito entre una fase móvil gaseosa y una fase líquida inmovilizada sobre la superficie de un sólido inerte, el concepto fue utilizado por Martin y Synge, quienes fueron también los responsables del desarrollo de la cromatografía de distribución líquido-líquido (RUA, 2012).



**Figura 11.** Ejemplo de Cromatografía de Gas-Sólido. Fuente: RUA, 2012.

## 6. DELIMITACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se desarrolló en la región del Alto Mezquital, localizada en los municipios de Ixmiquilpan y El Cardonal (Figura 12), caracterizada por ser un árido montañoso, disectado por barrancas, cuyo clima general es seco extremo, los suelos son categorizados como no aptos para la agricultura y los accesos a las localidades son accidentados (Landa y Neri, 2002).

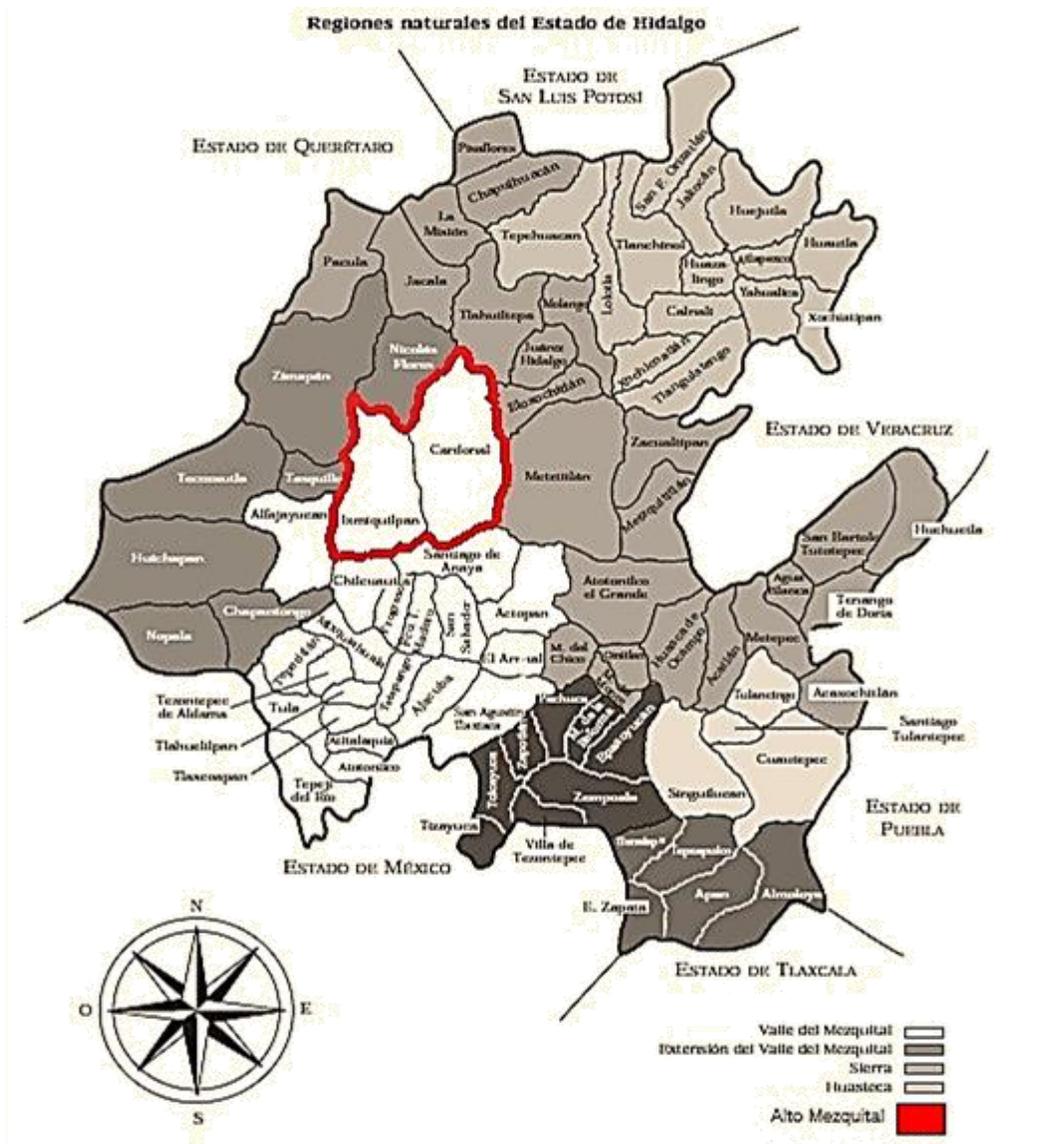


Figura 12. Estado de Hidalgo, señalado el Alto Mezquital. Fuente: Filardo, 2001.

## **6.1. Localización Geográfica y Política**

La descripción de la zona de investigación se realizó con el uso de la Carta Topográfica (Anexo II Figura 33) Tasquillo, escala 1:50,000 (INEGI, 2001). El área de estudio se ubica entre los paralelos 20° 31' 45" y 20° 34' 30" de latitud Norte y los meridianos 99° 12' 30" y 99° 14' 20" de longitud Oeste, con una altitud promedio entre 1,720 m y 1,800 metros sobre el nivel del mar. Políticamente pertenece a la porción Oeste-Suroeste del Estado de Hidalgo en la región del Mezquital, en la parte norte del Municipio de Ixmiquilpan. Toda el área pertenece a la Región Administrativa VI Ixmiquilpan (INEGI, 1992).

### **6.1.1. Superficies, Límites y Accesos**

La extensión de la zona de estudio es de 7 km<sup>2</sup> aproximadamente, colindando al Norte con el municipio de El Cardonal, al Este por la Sierra y Valle de Actopan; al Sur con el Valle de México, la ciudad de Ixmiquilpan y el municipio de Tula de Allende y al Oeste con la sierra de Xothé y el municipio de Tasquillo (Díaz, 2005). El acceso al área es por la carretera Federal No. 85, México-Laredo misma que pasa por los poblados de Pachuca, Actopan, Ixmiquilpan y Tasquillo. El otro acceso es a través de la carretera estatal No. 30 Tula-Ixmiquilpan recorriendo los poblados de Mixquiahuala, Progreso y Chilcuautila.

## **6.2. Ordenamiento Ecológico**

La región de estudio está comprendida dentro de las zonas áridas, que cubren la mayor extensión y un reducto de zona templada en la porción Noroeste donde se da una transición climática (SEDESOL, 1993). La zona árida pertenece a la Provincia Ecológica No. 52 "Llanos y Sierras de Querétaro e Hidalgo", incluyendo los sistemas ecogeográficos Tlaxcoapan (No. 25) y Dorodeje Boxasni (No. 26); en cuanto el área templada se incluye en la Provincia Ecológica No. 30 "Karst Huasteco", además forma parte de los sistemas ecogeográficos El Sauz (No. 22) y Agua Hedionda (No.20).

### **6.3. Fisiografía**

El área pertenece a las provincias fisiográficas del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Oriental. La porción norte está caracterizada por el área montañosa y zona de barrancas, que forman los parteaguas y límites de cuencas; la porción sur está formada por un conjunto de rocas sedimentarias que constituyen mesetas e igualmente barrancas. La porción central se forma de valles interrumpidos por elevaciones; la porción noreste y este posee una secuencia de anticlinales calizos (INEGI, 1992).

### **6.4. Geomorfología**

El Valle del Mezquital presenta una morfología variable de sierras, valles escalonados con pendientes pronunciadas, pequeñas planicies, siendo el Alto Mezquital un área conformada de valles longitudinales debido a la génesis morfológica presente en la región, donde se puede observar levantamientos, plegamientos tectónicos y estructuras volcánicas (INEGI, 1992). Las principales formas mayores del relieve se encuentran sierras y formas cerriles, planicies siendo estas de gran extensión; además de formas secundarias como mesetas, cañadas y lomeríos.

### **6.5. Suelos**

Las unidades de suelos (Cuadro 4) encontradas son Feozem calcárico y háplico, localizados de la porción sur al centro, cuyo uso es principalmente agrícola y ganadero; en la porción norte se registran Rendzinas, Regosol y Litosol, caracterizados por ser delgados y pedregosos (López, 2001).

### **6.6. Hidrología**

Pertenece a la Región Hidrológica 26 *Pánuco* y a una de las subcuencas del Río Tula, que confluye con el Río El Salado y conecta a través del túnel Zumpango-Tequisquiác con el gran canal de desagüe. El Río Actopan, recorre de igual forma la planicie de Ixmiquilpan; el periodo de estiaje de ambos ríos es a finales de febrero y de avenidas de julio a septiembre (ASRVM, 2010).

## 6.7. Vegetación y Uso de Suelo

El Valle del Mezquital constituye el extremo sur del Desierto Chihuahuense y forma parte de la región árida hidalguense, donde podemos encontrar diversos tipos de vegetación siendo el que caracteriza a la zona de estudio:

-Matorral desértico aluvial: Posee vegetación predominante de matorral xerófilo de crasicuales, las especies clave son: Mezquite *Prosopis laevigata* (H. & B.) Jonhst, Garambullo *Myrtillocactus geometrizans* (Mart.) Const., Nopal *Opuntia streptacantha* LEM., Uña de gato *Mimosa aculeaticarpa* Ortega var., *biuncifera* (Benth.), Ocotillo *Fouquieria splendens* ENGELM., y Biznaga *Echinocactus platyacanthus*, Link & Otto, 1827. Se practica agricultura de riego y temporal en gran parte de la zona, con siembra maíz, alfalfa, cebada, frijol, chile, calabaza y avena; además de cultivos secundarios de tomate de cáscara, trigo y jitomate (López, 2001).

## 6.8. Clima

El clima general del lugar (Gráfico 1 y 2) está influenciado directamente por la circulación de los vientos, el efecto de sombra orográfica, el impedimento de tránsito de nubes bajas por las formaciones cerriles y la altitud de la zona.

La temperatura media anual fluctúa entre 16° y 18.4° centígrados, siendo los meses más calurosos Abril y Mayo; en cambio la temperatura media mínima más baja es de 11.8 °C y la media máxima de mayor rango es de 22.6 °C caracterizándose Diciembre y Enero como los meses más fríos (Gráfico 2).

Presenta bajos niveles de precipitación, que varía entre 360 y 450 milímetros, siendo la época de con mayores niveles de lluvia de Mayo a Septiembre con un período interestival en Agosto. El periodo de sequía comprende de Diciembre a Mayo, siendo Noviembre el mes de menor precipitación. El tipo Climático predominante con base en el sistema de Köppen modificado por García (1973), es el  $BS_0hw''(w)(e')g$ , definido como clima de tipo semiárido, con temperatura alta, régimen de lluvias de verano con canícula y con poca a extremosa oscilación de temperatura (López, 2001).

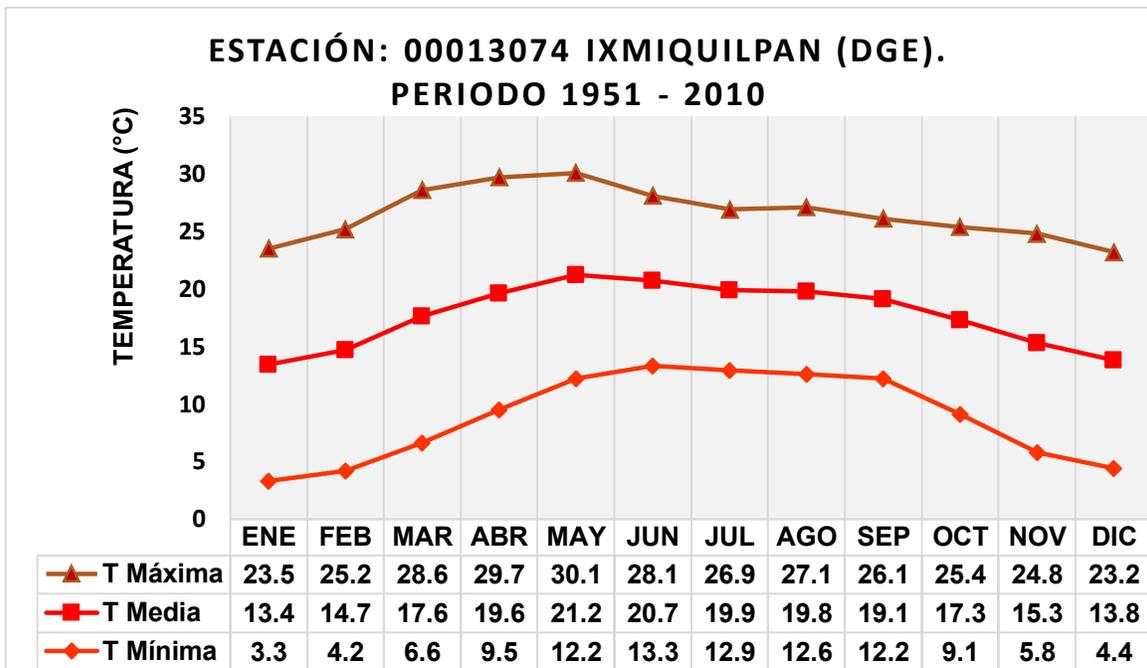


Gráfico 1. Temperaturas máximas y mínimas del área de estudio (CONAGUA, 2011).

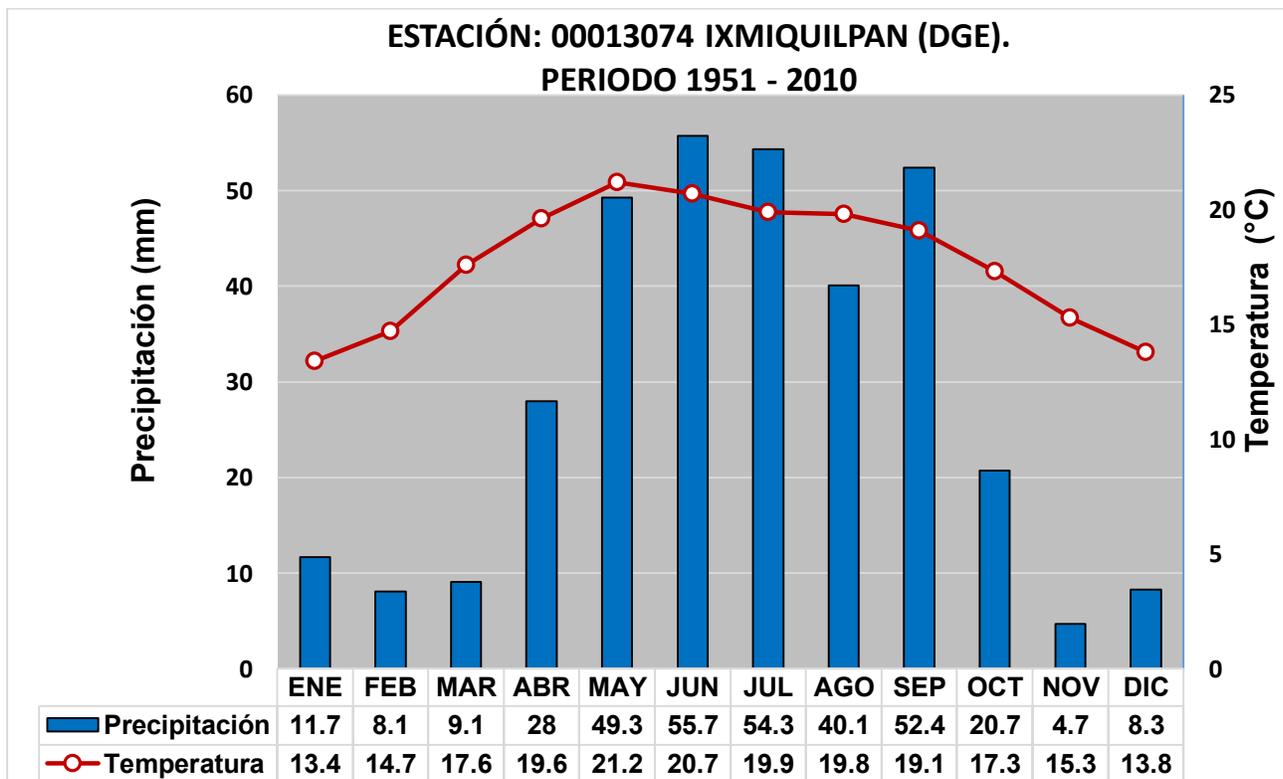


Gráfico 2. Climograma del área de estudio (CONAGUA, 2011).

## **6.9. Unidades de muestreo**

### **6.9.1. Agroecosistemas de cultivo y agostadero**

Se conoce como agroecosistemas de cultivo a las unidades de producción agrícola que conforman el primer nivel trófico, para la obtención de recursos alimenticios y materias primas en la elaboración de diversos objetos; todas se caracterizan por ser agricultura tradicional, cuyo plan de manejo es modelado completamente por el agricultor (López, 1991). En el área de estudio se identificaron los siguientes tipos:

- Huertos familiares (**HF**): Unidades pequeñas, asociadas directamente al terreno habitacional del agricultor cuyo fin es proporcionar alimentos de autoconsumo, en los casos menores incluye la venta a terceros de los productos. El riego es esporádico y puede contener diferentes especies vegetales. Dentro de la investigación se reportaron cultivo de maíz, jitomate, frijol y durazno.
- Parcela de temporal (**AT**): Zonas de producción en terrenos ejidatarios cuya dinámica se establece en períodos de dos años, uno de cultivo y el otro para la recuperación del suelo. El riego depende completamente de la temporalidad de la zona, por lo que la productividad y eficiencia de los cultivos está determinada por la humedad natural. Dentro del área de estudio se registraron cultivos de avena y maíz.
- Parcela riego (**PR**): Sistemas agrícolas cuyas características son similares a la de temporal, la diferencia radica en el sistema de distribución de agua, éste se da por medio de bombas hidráulicas o captación del recurso en redes de avenamiento o formación de canaletas. Se observaron cultivos de maíz, alfalfa y frijol.
- Riego auxiliar (**RA**): Siguiendo las características anteriormente expuestas, en éstas parcelas generalmente de pequeña extensión, además de la implementación de agua de temporal y/o riego, se adiciona el recurso previamente captado, cuando los anteriores sistemas no están disponibles. Esto es mediante el uso de agua almacenada por largos períodos de tiempo, siendo distribuida en sistemas rudimentarios como surcos o canaletas. Solo se registraron cultivos de maíz.

El agroecosistema de agostadero es la zona de productividad primaria que incluye pastizales naturales, inducidos o matorrales de sucesión secundaria, además de zonas sin vegetación nativa o de desmonte para nuevas áreas (López, 1991). Dichas unidades son utilizadas para el pastoreo, la producción de forrajes o generar espacio para nuevos cultivos. Se registraron los siguientes tipos:

- Zona de desmonte de mezquite (**MD**): Unidad altamente impactada con eliminación de vegetación secundaria y árboles, todo esto como acondicionamiento para el posterior aprovechamiento agrícola.
- Pastizal halófito (**PH**): Zona de pastos naturales que en época de lluvias permanecen inundados y cuyo contenido de sales en el suelo es alto, ésta zona recibe gran aportación de minerales ya sea por elevación del nivel freático o aplicación de fertilizantes.
- Suelos inundables (**SI**): Dentro de la zona, el suelo se encuentra compactado y recibe constantemente agua, producto de los sistemas de riego, funciona como captador y reservorio de agua para los sistemas de riego auxiliar.

### **6.9.2. Ecosistemas naturales**

Los ecosistemas naturales son áreas con vegetación nativa, que proveen diversos recursos para los pobladores, ya sean alimenticios, medicinales o materias primas, de igual forma produce semillas para la expansión de especies vegetales nativas (López, 1991).

Gran parte del territorio observado, presenta costras microbióticas, que son comunidades de cianobacterias, algas, musgos, líquenes entre otros, están asociados con las partículas minerales de la superficie del suelo, creando una capa delgada, cohesiva y horizontal; éstas comunidades son comunes en ecosistemas con alta entrada de luz hacia la superficie del suelo principalmente las zonas áridas (Bowker, 2007).

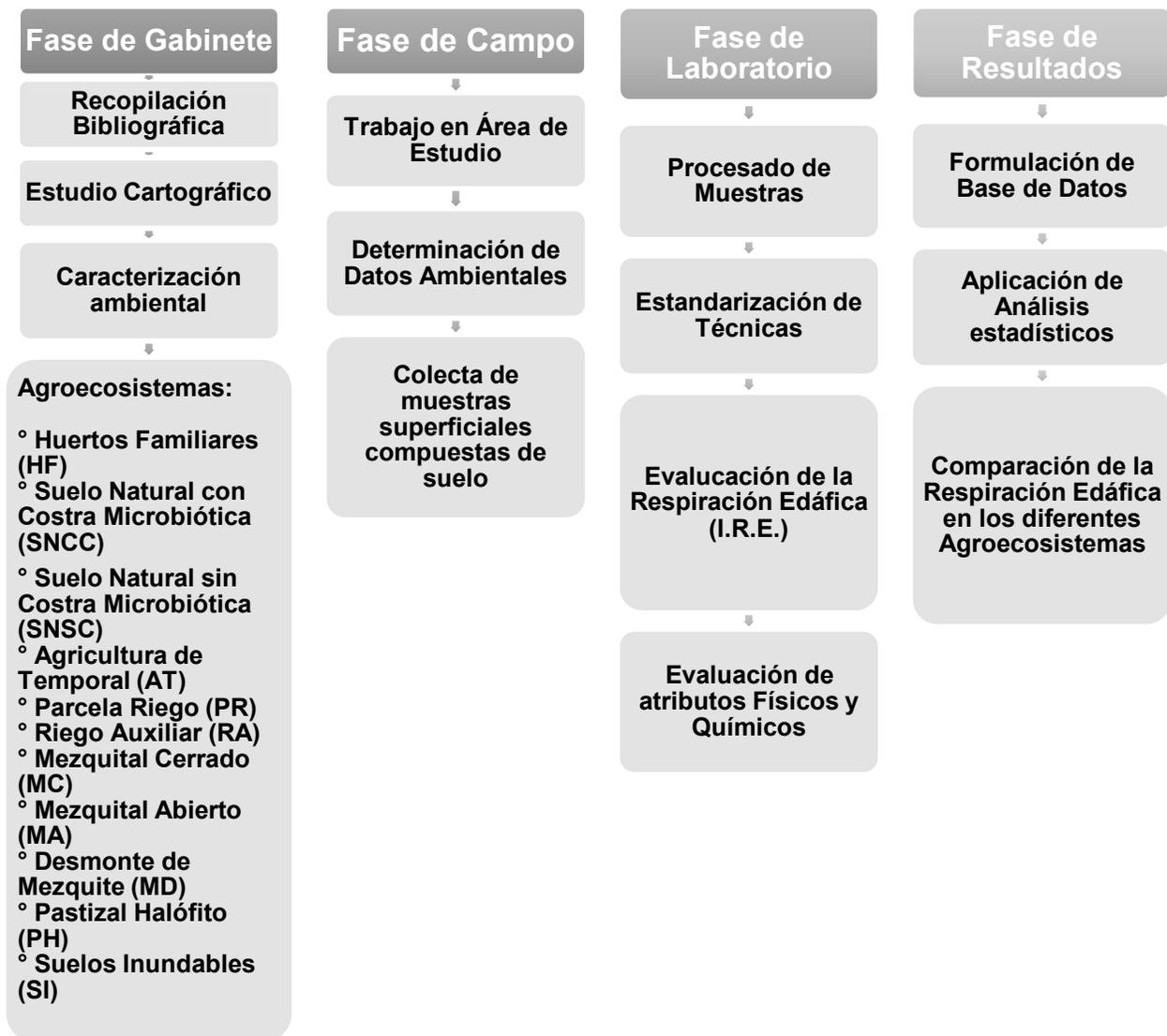
Éstas asociaciones conllevan beneficios ecológicos al sistema edáfico, como es el efecto biofertilizante natural y acondicionador del suelo, biorremediador, hasta la recuperación de suelos degradados en fase intermedia por inoculación de microorganismos (Belnap, *et al.*, 2003; Bowker, *et al.*, 2006).

En ese sentido, los ecosistemas naturales identificados fueron:

- Barranca de suelo natural con costra microbiótica y sin costra (**SN-CC-B** y **SN-SC-B**): Zona sin aprovechamiento agrícola pero es receptor de residuos sólidos, la condición de costra no permite el desarrollo de otras plantas, sin embargo las áreas sin costra poseen vegetación secundaria.
- Área Natural con costra microbiótica y sin costra (**SN-CC** y **SN-SC**): Zona sin actividad antrópica directa, que presenta signos evidentes de erosión, con población de mezquite y vegetaciones secundarias; características similares al escenario de Barranca.
- Mezquital cerrado (**MC**): Zona con poca perturbación, población de mezquites cuya separación de copa entre cada individuo es mínima, por lo tanto la isla de fertilidad debajo de éstos es muy reducida ya que los residuos de los mezquites (hojas y ramas) se acumulan continuamente y detienen el desarrollo de otros organismos.
- Mezquital abierto (**MA**): En esta área, los organismos de mezquite se encuentran muy dispersos entre sí, no se forma una sombra continua y permite el desarrollo de otros tipos de vegetación, principalmente gramíneas y arbustos. Se observaron indicadores de erosión.
- Bosque (**BE**): La zona presenta diferentes tipos de vegetación, entre los que destacan el bosque pino-encino, bosque de táscate y vegetación arbustiva, sin aparente intervención antrópica o generación de tierras agrícolas (Hernández, 2014).

## 7. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó durante cuatro fases ordenadas por tiempo y actividades, conforme a esto se utilizaron los métodos (Gráfico 3):



**Gráfico 3.** Diagrama de flujo de los métodos aplicados en la investigación.

## **7.1. Fase Descriptiva (Gabinete)**

### **7.1.1. Desarrollo del protocolo de investigación**

Se revisó la bibliografía científica, materiales cartográficos y mapas temáticos para la calibración de métodos y equipo necesarios para el trabajo de campo. Este enfoque se integra por tres estudios: analítico para la obtención de mapas básicos, monotemáticos, delimitación de unidades de estudio y generación de bases de datos; el sintético define directamente los puntos de muestreo y el pragmático que permite el establecimiento de propuestas para la mitigación de la pérdida del recurso edáfico. (Verstappen y Van, 1991).

### **7.1.2. Caracterización del área de estudio**

La definición del área de estudio y la síntesis de los puntos a muestrear, se realizó por medio de la delimitación las unidades de producción primarias, definidas como agroecosistemas y ecosistemas naturales a partir de criterios de suelo, uso de suelo, cobertura vegetal, pendiente y estado de conservación con el uso de la carta topográfica F14C69, del municipio de Tasquillo, escala 1:50,000 (INEGI, 2001).

## **7.2. Fase de Campo**

Se realizaron dos salidas prospectivas durante el mes de Agosto de 2011 para la corroboración y delimitación directa de los escenarios a muestrear, las características ecológicas del medio y el primer acercamiento con las comunidades.

Posteriormente se realizaron tres salidas para hacer muestreos, durante los meses de Septiembre de 2011 al mes de Agosto de 2012. La colecta de muestras de suelo se realizó en zigzag, para obtener muestras compuestas superficiales en suelos aluviales con diferentes condiciones de cobertura, desarrollo, deterioro y uso.

Cada punto de muestreo se caracterizó *in situ* tomando en cuenta los signos de erosión, historia de manejo y uso de suelo, pendiente y relieve general, temperatura, humedad relativa y altitud, además de ubicar las zonas ecológicamente impactadas, donde se eligieron los parámetros que funcionen como indicadores y permitan determinar el estado de conservación actual del suelo.

### **7.3. Fase de Laboratorio**

Las muestras colectadas se transportaron al Laboratorio de Edafología, perteneciente a la Unidad de Biotecnología y Prototipos (UBIPRO) de la FES-I para su evaluación analítica. Se analizaron las muestras compuestas con 3 repeticiones cada una y se evaluaron respecto al siguiente orden:

#### **7.3.1. Respiración edáfica**

La respiración del suelo se realizó por el método basal, el cual es una modificación de la técnica de la **cámara estática cerrada** (Witkamp, 1966, citado por Coleman, 1973 y Page *et al.*, 1982). Éste método consiste en estimar la cantidad de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) producido en un medio cerrado, utilizando frascos (Figura 13) con una altura de 10.06 cm y de anchura general de 4.69 cm con tapa modificada, en éstos se depositaron 100 gr de suelo procesado, al cual se le añadieron 40 ml de agua destilada, sellándose posteriormente.

Tomándose muestras del gas generado, a las 18, 24, 32 y 40 horas desde el sellado; 5 ml por cada evento. Dicho gas se incluyó en soluciones de NaOH 0.1 N y KOH 0.1 N, añadiendo, cloruro de bario (BaCl), fenoltaleína y naranja de metilo; titulándose posteriormente con una solución de ácido clorhídrico (HCL) 0.1 N.

#### **7.3.2. Evaluación de propiedades físicas y químicas del suelo**

De acuerdo con Muñoz *et al.* (2013), fueron evaluadas las siguientes propiedades: Color del suelo por medio de la técnica de comparación con tablas de color (Munsell, 1975), textura por la técnica del hidrómetro, para determinar la fracción fina del suelo (partículas menores a 2 mm,) desarrollada por Bouyoucos en 1962 y se utilizó el método gravimétrico para determinar la humedad de las muestras por los métodos cualitativos de Ortiz y Cuanalo desarrollada en 1981. La materia orgánica, se cuantificó por el método de Walkley y Black (1934) por la oxidación con ácido crómico y ácido sulfúrico; el pH con el uso del potenciómetro (Bates, 1964) y el nitrógeno total con la técnica Micro-Kjeldahl modificado por Bremmer (1965).

#### **7.4. Fase de Resultados e Interpretación**

Se generó la base de datos de la zona y se interpretó la información recabada para la evaluación de la respiración aplicando índices propuestos por el U.S. Department of Agriculture (1999). Se desarrolló un modelo gráfico de los atributos evaluados. Aplicándose posteriormente, análisis estadísticos paramétricos, siendo de importancia el análisis de conglomerados jerárquicos.



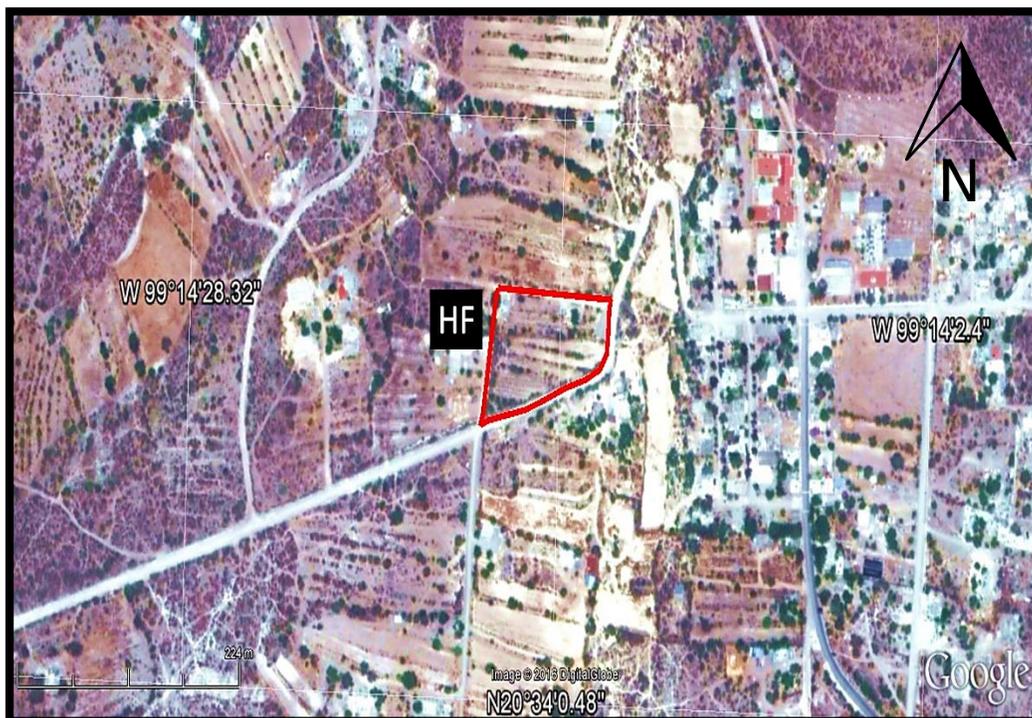
**Figura 13.** Frasco con suelo y tapa modificada para la extracción del gas.

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1. Delimitación y caracterización de los sitios investigados

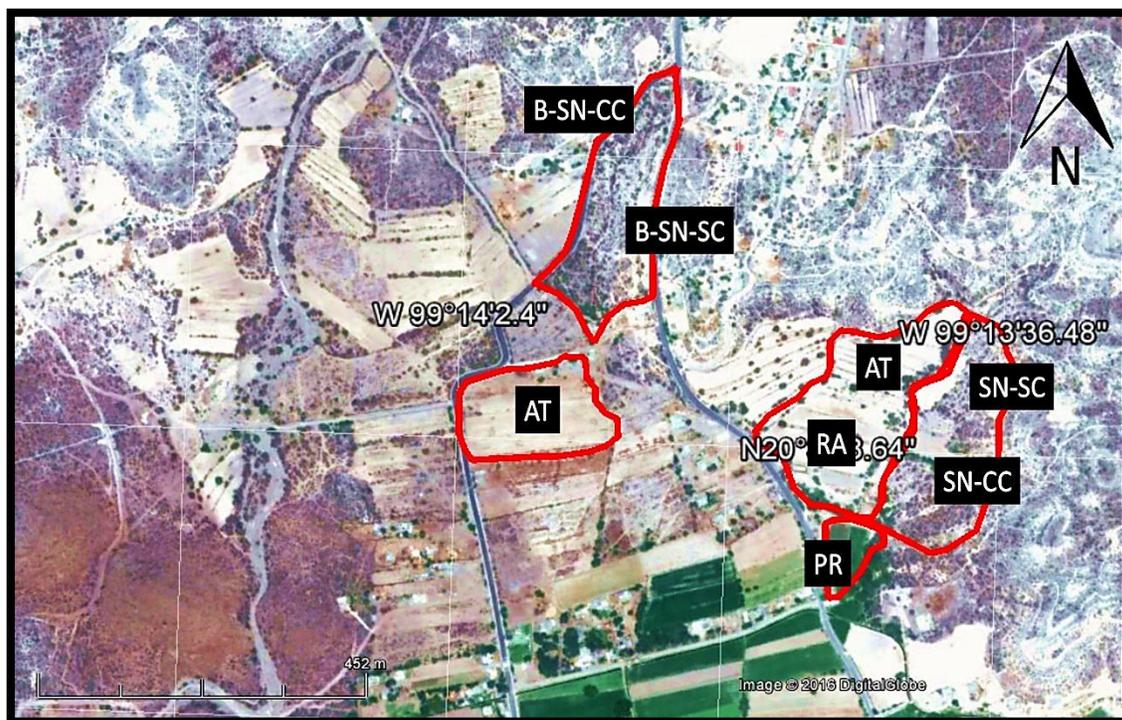
La región del Alto Mezquital fue zonificada en cuatro áreas de muestreo con base en la división política del municipio siendo éstas localidades:

- **Dexthí-San Juanico:** Ubicado al norte de la ciudad de Ixmiquilpan con coordenadas N  $20^{\circ} 34' 09.25''$  y O  $99^{\circ} 14' 07''$  con una altura promedio de 1825 m.s.n.m., clima de tipo semiseco templado, cuya temperatura media anual es de  $17.6^{\circ}$  C y una precipitación media anual de 413.4 mm, con vegetación de tipo matorral subinerme (Mateos, 2011). En esta zona se establecieron dos puntos de muestreo en terrenos particulares, denominados huertos familiares (HF).



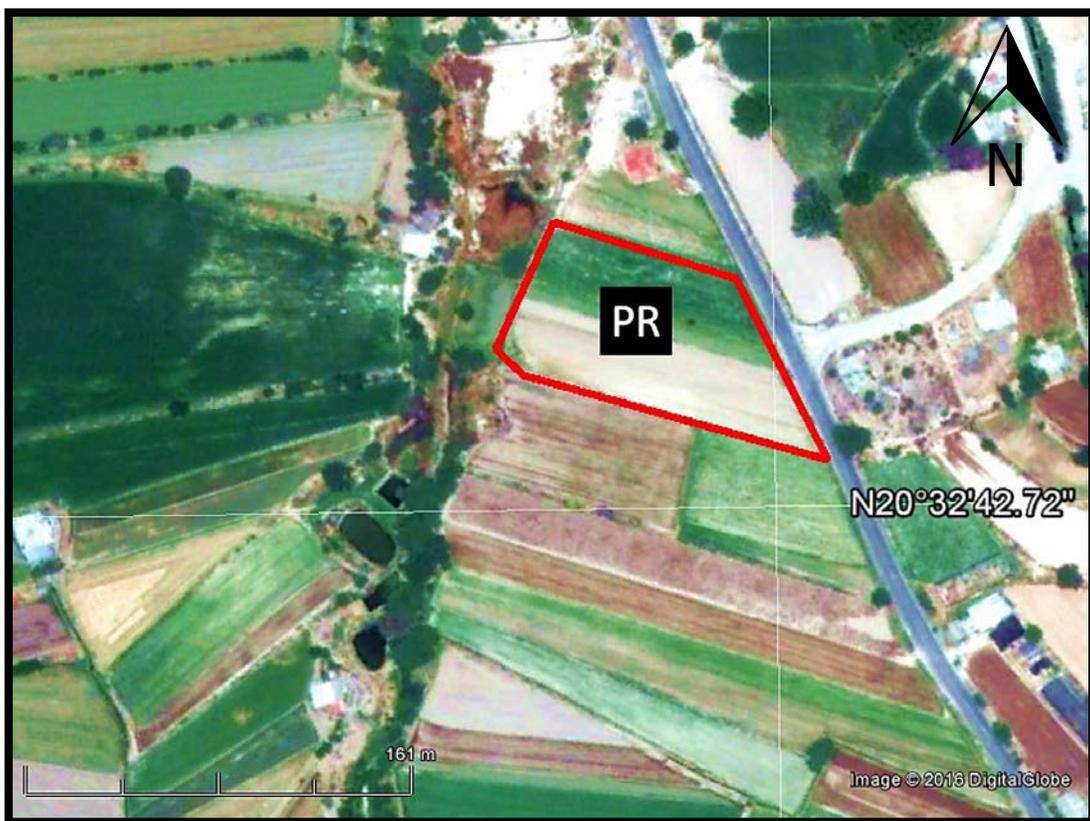
**Figura 14.** Localidad Dexthí-San Juanico, ubicación del sitio de muestreo.

- **La Palma-San Juanico:** Área de barrancas y lomeríos, localizado en N 20° 33' 11.50" y O 99° 13' 52.55" con una altura promedio de 1780 m.s.n.m., clima de tipo semiseco templado cuya temperatura media anual es de 18.6° C y una precipitación media anual de 363.6 mm, con vegetación de tipo matorral subserme (López, 2001). En esta zona se establecieron ocho puntos de muestreo; barranca con colecta de suelo natural con costra microbiana y sin costra (**SNCC-B** y **SNSC-B**), parcela con cultivo de avena de riego temporal (**AT**), parcela de cultivo de maíz de riego (**PR**), auxiliar (**RA**), temporal **AT** y zona de suelos naturales **SNSC** y **SNCC**.



**Figura 15.** Localidad La Palma-San Juanico, ubicación de los sitios de muestreo.

- **Barrio Los Martínez:** Zona de cultivo de hortalizas, ubicado en N 20° 32' 47.07" y O 99° 13' 32.47" con una altura promedio de 1741 m.s.n.m., clima de tipo semiseco templado y temperatura media anual es de 17.4° C y una precipitación media anual de 380.6 mm, con vegetación de tipo matorral subinerme (Vázquez, 2012). Dentro de ésta área se estableció un punto de muestreo en un cultivo de alfalfa, donde el abastecimiento de agua era de tipo riego (**PR**).



**Figura 16.** Localidad Barrio Los Martínez, ubicación del sitio de muestreo.

- **El Durazno:** Localidad de cultivos tanto de frijol, maíz y acelga, pastizales, además de un continuo desmonte de mezquite. Localizado en las coordenadas geográficas N 20° 31' 21.57" y O 99° 13' 06.69" cuya altura promedio es de 1730 m.s.n.m., temperatura media anual de 18.6° C cuyo clima es semiseco templado (López, 2001). Para esta zona se establecieron seis puntos de colecta representando diferentes niveles de deterioro y uso de suelo, siendo los representativos las áreas de mezquital abierto y cerrado (**MA** y **MC**), zona de desmonte de mezquite (**MD**), área de pastizal halófito (**PH**), suelos inundables (**SI**) y cultivo de frijol con sistema de riego (**PR**).

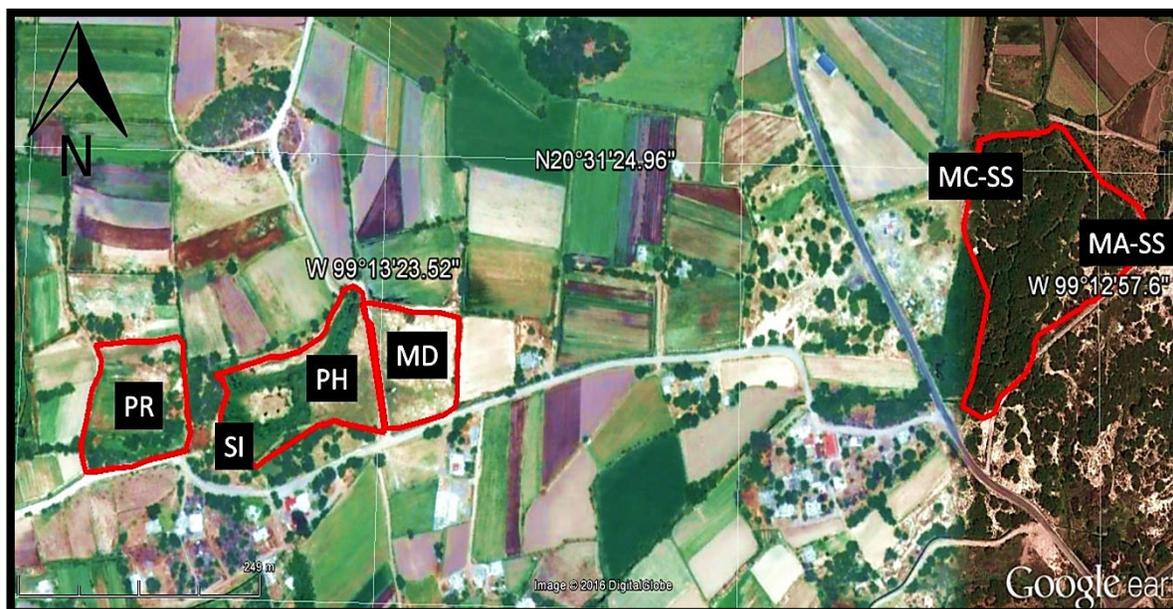


Figura 17. Localidad El Durazno, ubicación de los sitios de muestreo.

## 8.2. Clave de identificación de los sitios de evaluación

<b>Cuadro 6. Codificación de Agroecosistemas y Ecosistemas Naturales</b>			
<b>Localidad</b>	<b>Agroecosistema / Ecosistema Natural</b>		<b>Código</b>
Dexthí-San Juanico	Huertos Familiares		<b>DX-HF-L</b>
La Palma-San Juanico	Barranca	Suelo Natural con Costra Microbiana	<b>P-B-SNCC</b>
	Barranca	Suelo Natural sin Costra Microbiana	<b>P-B-SNSC</b>
	Cultivo Avena	Agricultura/Parcela de Temporal	<b>P-CAV-AT</b>
	Cultivo Maíz	Agricultura/Parcela de Temporal	<b>P-CMZ-AT</b>
	Cultivo Maíz	Riego Auxiliar zona 1	<b>P-CMZ-RA-1</b>
	Cultivo Maíz	Riego Auxiliar zona 2	<b>P-CMZ-RA-2</b>
	Cultivos	Suelo Natural con Costra Microbiana	<b>P-CMZ-SNCC</b>
	Cultivos	Suelo Natural sin Costra Microbiana	<b>P-CMZ-SNSC</b>
Barrio Los Martínez	Cultivo Acelga	Parcela de Riego	<b>MTZ-CAC-PR</b>
El Durazno	Cultivo Frijol	Parcela de Riego	<b>DUR-CFR-PR</b>
	Suelo Natural	Suelo Inundable	<b>DUR-SN-SI</b>
	Suelo Natural	Mezquital en Desmonte	<b>DUR-SN-MD</b>
	Suelo Natural	Pastizal Halófito	<b>DUR-SN-PH</b>
	Cul.Lechuguilla	Mezquital Cerrado	<b>DUR-CL-MC</b>
	Cul.Lechuguilla	Mezquital Abierto	<b>DUR-CL-MA</b>
Banxú	Bosque	Encinar	<b>BNX-B-P</b>

### 8.3. Valoración de la respiración edáfica y tipos de tratamiento

Los ecosistemas terrestres representan el tercer sumidero de carbono en importancia del planeta, después de los océanos y las reservas geológicas; aproximadamente contienen  $2.5 \times 10^{18}$  gramos de C y se pueden fijar cíclicamente entre  $1.3 \times 10^{15}$  g C año<sup>-1</sup> a  $2.3 \times 10^{15}$  g C año<sup>-1</sup>; por lo que el suelo desempeña un papel relevante en el ciclo del carbono y es una fuente importante de CO<sub>2</sub> y de otros gases de efecto invernadero. Incluso comparado con los sistemas vegetales, éste recurso es el mayor reservorio y sumidero de carbono. Estimando la cantidad total de C que contiene, resulta ser de dos a tres veces superior al registrado en la atmósfera (Lal, 2004).

Considerando la importancia ecológica del sistema edáfico dentro de éste ciclo, el presente estudio estandarizó técnicas *ex situ* (Figura 18) para el análisis del proceso de respiración edáfica en suelos áridos y semiáridos, con dos soluciones alcalinas (NaOH 0.1 N y KOH 0.1 N), para la evaluación del índice de respiración edáfica total (I.R.E.t.) y obtuvo los horarios de máxima y mínima producción de CO<sub>2</sub> en los agroecosistemas en cuatro tiempos: 18, 24, 32 y 40 horas. Conforme a la evaluación de los seis parámetros físicos y químicos del suelo ya mencionados, fueron relacionados al I.R.E.t. para determinar la influencia de cada uno sobre la respiración edáfica; finalmente se realizó un análisis de correlación para entender la relación entre cada unidad de muestreo y en función a la respiración del suelo.



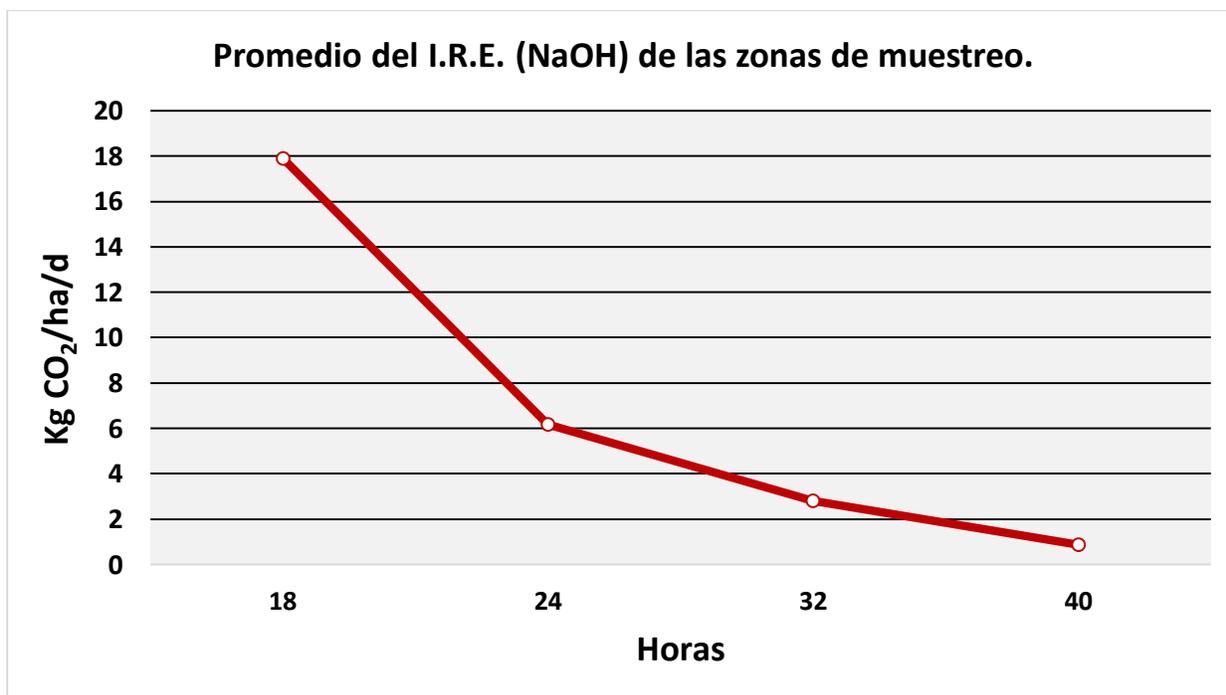
**Figura 18.** Dispositivos utilizados en la evaluación del I.R.E.t.

### 8.3.1. Valoración con solución de hidróxido de sodio (NaOH)

La captura de gas carbónico se determinó mediante la extracción de gas con jeringas, transportado hacia soluciones alcalinas, donde la absorción de  $\text{CO}_2$  liberado del suelo, se incluyó en NaOH 0.1 N. Al final del período de adsorción, la masa total de  $\text{CO}_2$  en las soluciones se determina por valoración del NaOH con HCl diluido a un valor de ajuste de pH.

**Para ver más detalles véase el Anexo I, inciso A.**

La tasa estimada de respiración del suelo usando ésta técnica varía respecto a: diferente concentración de las soluciones, volúmenes, tamaños de cámara, tiempos de absorción, y áreas de absorción. Considerando que un aumento en la normalidad del NaOH 0.1 a 0.75 N no tiene efecto sobre la capacidad de absorción de  $\text{CO}_2$  cuando se utilizan volúmenes mayores a 30 ml de NaOH (Singh y Gupta, 1977); la presente investigación utilizó 25 ml de NaOH estandarizado para el volumen de la cámara (183.122 ml), por lo que la normalidad se mantuvo en 0.1 unidades.



**Gráfico 4.** Promedio general de la respiración edáfica en los 4 tiempos, solución NaOH.

Los resultados encontrados muestran que la máxima producción de CO<sub>2</sub> edáfico se realiza a las 18 horas a partir del sellado (Gráfico 4), considerando el promedio general del I.R.E. en los suelos muestreados en las cuatro localidades coincidiendo con, coincidiendo con Hernández y sus colaboradores (1995) que establecieron picos de actividad microbiana del suelo en el mismo tiempo.

La tasa de flujo de CO<sub>2</sub> determinado por el método de la cámara estática, es altamente sensible a los tiempos de adsorción, exhibiendo una disminución de potencia con el tiempo. Dicha tasa ha sido establecida para suelos de bosque, que va de 20 mg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/h para el tiempo de absorción de 1 hora y disminuye hasta 3.7 mg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/h para el tiempo de absorción de 48 horas a temperatura constante de 5 °C (Kabwe *et al.*, 2002). Con los ensayos previos para el método de respiración de la presente investigación, se propuso la captura de gas en 4 tiempos a través de 40 horas y no 48, ya que el estudio en zonas áridas y semiáridas demostró que la máxima cantidad de gas carbónico se registró hasta las 18 horas desde el sellado (Cuadro 7), siendo en promedio de 32 a 40 horas la mínima cantidad registrada (Gráfico 4). Minderman y Vulto (1973), estiman que la máxima cantidad de CO<sub>2</sub> generada en la superficie del suelo se da a las 24 horas después de que la cámara es sellada.

<b>Cuadro 7. Respiración edáfica registrada en los 4 tiempos con Solución NaOH</b>				
<b>Tiempo</b>	<b>18 hr</b>	<b>24 hr</b>	<b>32 hr</b>	<b>40 hr</b>
<b>Muestra</b>	<b>I.R.E. Kg CO<sub>2</sub>/ha/d</b>			
DX-HF-L	22.46	3.94	1.88	0.43
P-B-SNCC	9.56	6.09	3.76	0.86
P-B-SNSC	18.64	7.53	1.08	0.00
P-CAV-AT	11.47	4.30	1.08	0.43
P-CMZ-AT	10.04	6.45	3.76	1.08
P-CMZ-RA-1	19.12	6.45	2.69	1.08
P-CMZ-RA-2	20.55	5.74	1.61	0.65
P-CMZ-SNCC	7.65	5.02	2.15	0.00
P-CMZ-SNSC	16.73	6.45	1.88	0.00
MTZ-CAC-PR	21.03	7.89	7.53	4.95
DUR-CFR-PR	21.51	7.17	6.45	1.94
DUR-SN-SI	4.78	2.51	1.34	0.65
DUR-SN-MD	22.94	6.09	3.49	0.00

DUR-SN-PH	22.46	5.74	3.76	0.65
DUR-CL-MC	13.38	3.58	1.61	0.43
DUR-CL-MA	25.33	8.24	2.42	1.51
BNX-B-P	36.32	11.47	1.08	0.00

El Cuadro 7 registra los valores generales del índice de respiración para cada escenario, se observa que todos tuvieron la máxima generación de gas a las 18 horas, dicha producción fue disminuyendo conforme el tiempo transcurría entre las 18 y 24 horas desde el sellado, hubo una disminución generalizada del 61.43%; de 18 a 23 horas fue de 81.65% y finalmente de 18 a 40 horas tuvo una disminución del 94.56%; estimando una relación virtual promediada de disminución del 20% de producción de gas por cada 6-8 horas. Esto debido al paso de un medio aeróbico a un anaeróbico, que de acuerdo con a Krebs (2003), la actividad microbiana dependiente del oxígeno, consume el máximo disponible alrededor de 18 a 20 horas, por lo que a partir de este período, el sistema interno de la cámara pasa a ser paulatinamente un ambiente anaerobio, donde las comunidades bacterianas tienen una actividad microbiológica compleja, por lo que en el micrositio, los productos finales son fermentaciones y metano (CH<sub>4</sub>), (Madenjian, 1990).

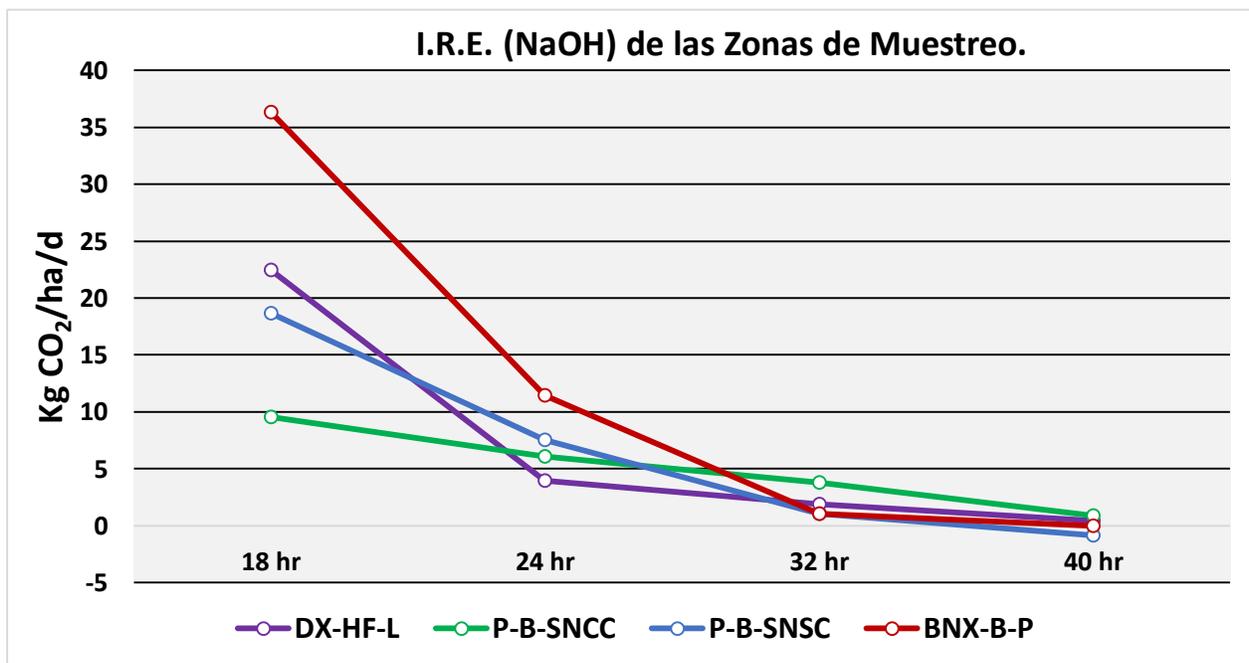


Gráfico 5. I.R.E. de los escenarios en los diferentes tiempos, solución NaOH.

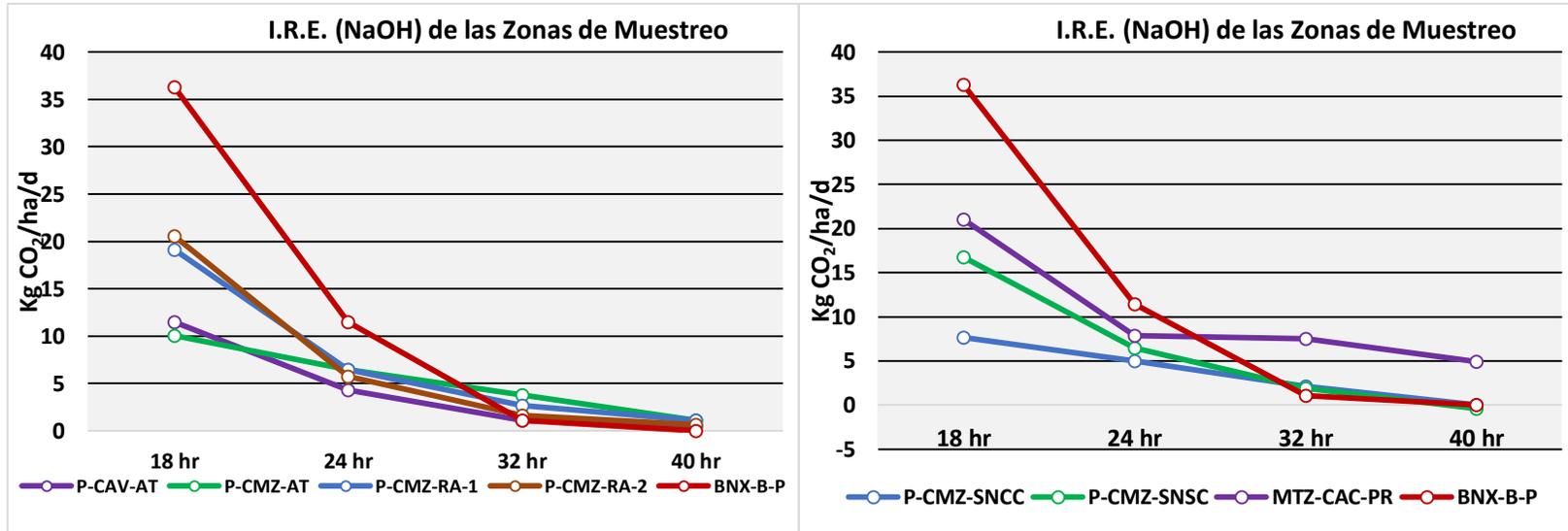


Gráfico 6 y Gráfico 7. I.R.E. de los escenarios en los diferentes tiempos, solución NaOH.

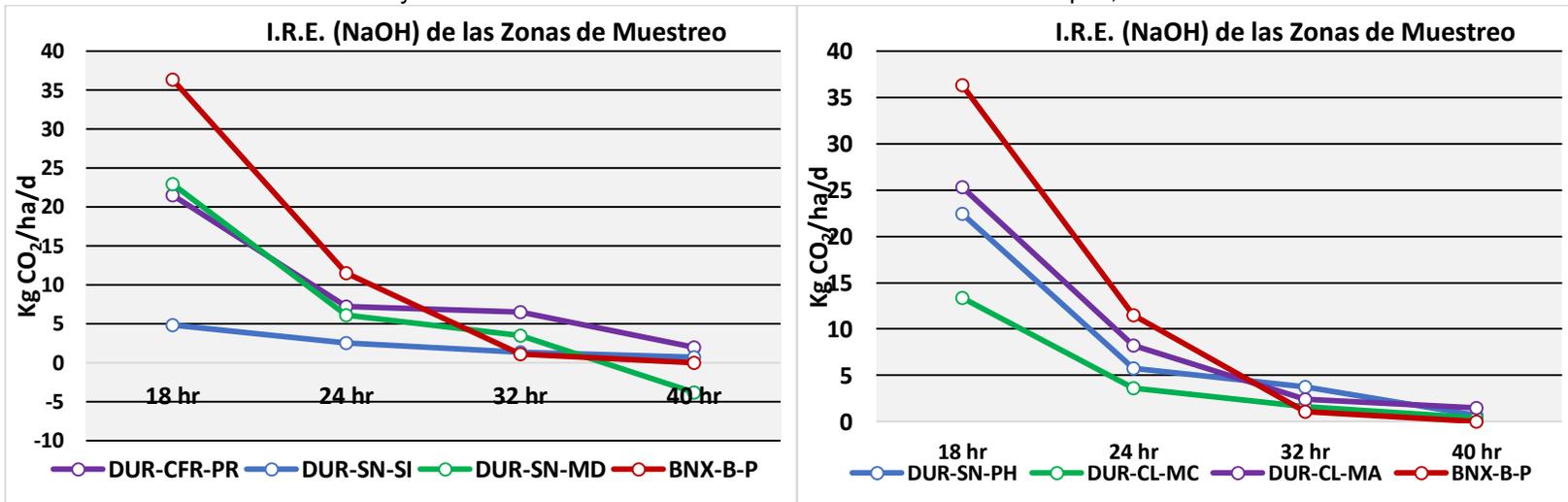


Gráfico 8 y Gráfico 9. I.R.E. de los escenarios en los diferentes tiempos, solución NaOH.

Los Gráficos 5, 6, 7, 8 y 9, registran los índices de respiración, cuyas muestras de gas fueron captados a las 18, 24, 32 y 40 horas respectivamente. Como se mencionó anteriormente, la máxima producción de gas se registró a las 18 horas, donde a partir de este tiempo, el decremento de producción de CO<sub>2</sub> fue registrado, sin embargo en dos puntos se observó un fenómeno que al llegar a la toma de las 32 horas, se observó solo una disminución en la generación de gas con respecto a la toma anterior (24 horas); estos puntos fueron MTZ-CAC-PR (Gráfico 7) con un decremento solo 0.36 unidades y DUR-CFR-PR (Gráfico 8) cuyo disminución fue de 0.72 unidades, mismo evento que se observó principalmente con el tratamiento de KOH (véase apartado 8.3.2.).

La dinámica general de captación del gas en todas las zonas, refleja que bajo un medio sellado (cámara), el CO<sub>2</sub> disminuye continuamente hasta casi la nula concentración en un promedio de 40 horas.

Todos los escenarios fueron comparados con la muestra blanco de bosque (BNX-B-P), que al ser un sistema no perturbado, obtuvo la mayor producción de gas que fue de 36.32 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d. Conforme a esto, los escenarios fueron clasificados en orden de máxima generación de gas (véase Gráfico 10); siendo el punto DUR-CL-MA de mayor producción con 25.33 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d, ésta es una zona de Mezquital abierto, asociado al cultivo de lechuguilla, que conforme a la agricultura Hñañhu (Granados *et al.*, 2004) se realiza por el manejo de unidades básicas productivas, donde la intervención antrópica es mínima y se utilizan especies botánicas nativas, promoviendo sistemas ecológicos dinámicos y por ende la generación estable de CO<sub>2</sub> (Guerrero, *et al.*, 2012).

Bajo este esquema, la localidad de El Durazno presentó los puntos de muestreo con mayor producción del gas y el punto de menor producción, el área DUR-SN-SI solamente generó 4.78 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d, cuya disminución fue paulatina; esto debido a que la zona ha sido fuertemente compactada cuya función es la captación de agua y que ésta sea utilizada para los cultivos adyacentes; como lo mencionan Mogollón *et al.* (2010), la reducción en la continuidad de los poros del suelo, produce grandes cambios negativos sobre las propiedades biológicas de los suelos, sobre todo agrícolas, propiciando que la respiración del suelo sea disminuida.

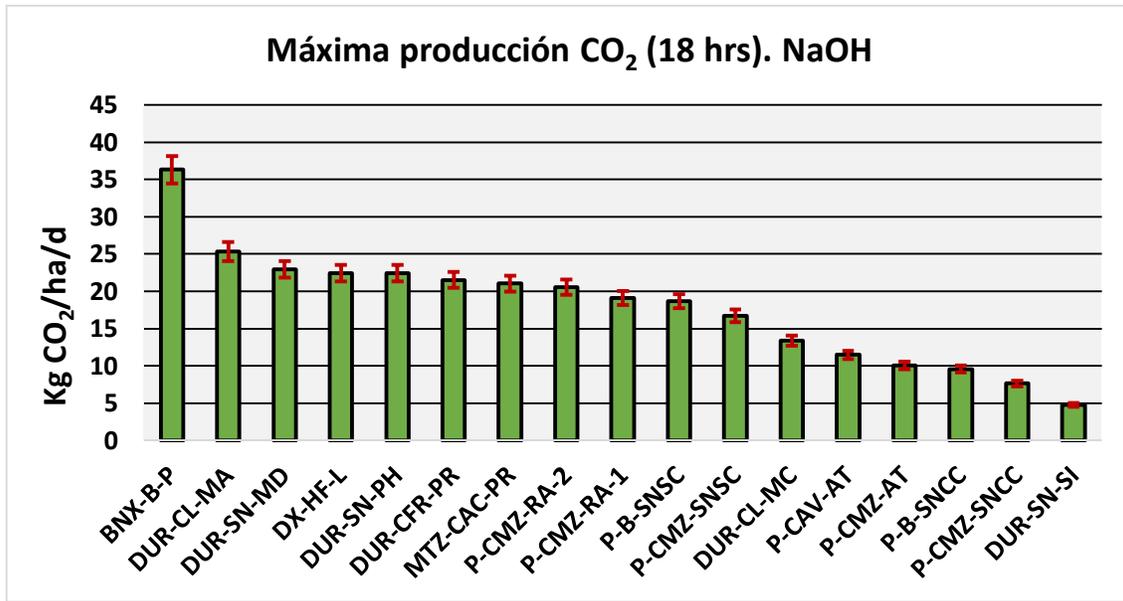


Gráfico 10. Escenarios ordenados con base en la producción máxima de CO<sub>2</sub> (NaOH).

Los resultados se analizaron con base en un análisis general de regresión lineal simple (Gráfico 11) para determinar el efecto de la interacción temporal (18-40 horas) sobre la respiración del suelo (Zuur *et al.*, 2007).

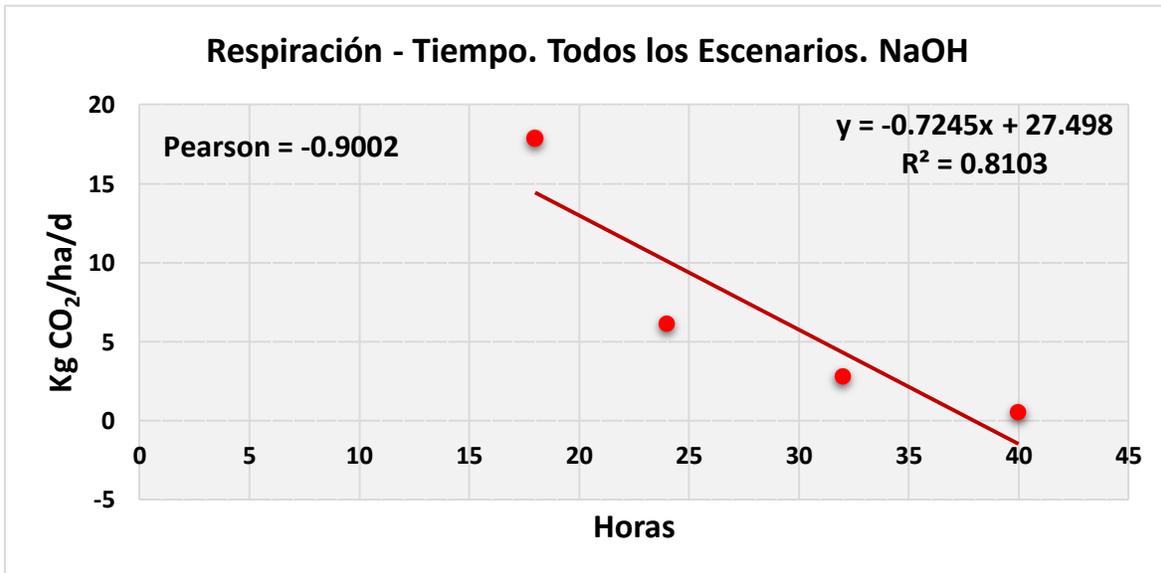
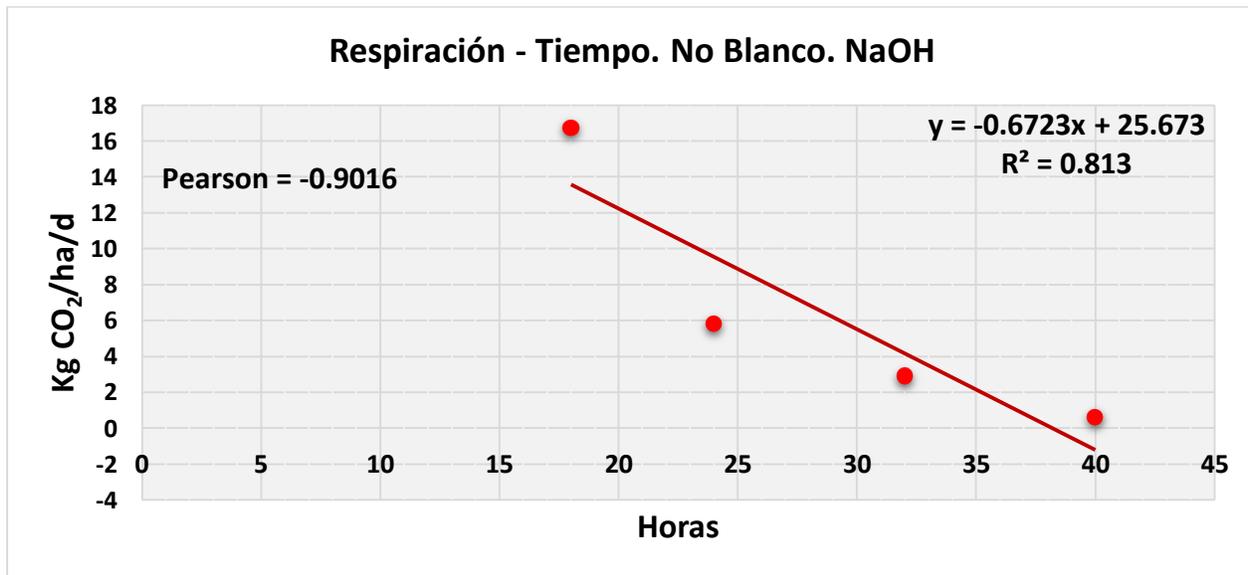


Gráfico 11. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, todos los escenarios, NaOH.

El Gráfico 11 muestra la relación de la producción del gas entre las horas transcurridas desde el sellado, donde el coeficiente de correlación de Pearson fue de -0.9002 mostrando una relación inversa muy estrecha entre ambas variables, que confirma estadísticamente que entre más tiempo (horas) transcurre, la producción de CO<sub>2</sub> disminuye constantemente; y un coeficiente de determinación de 81%, donde el ajuste de datos se clasifica como bueno, dejando solo alrededor del 19% de variabilidad (Durán *et al.*, 2008). De igual modo el Gráfico 12, donde no se incluyó el área blanco (Bosque BNX-B-P) para observar la dinámica de las zonas áridas y semiáridas, cuyo coeficiente Pearson fue de -0.9016, similar al anterior mostrando la misma dinámica inversa entre ambas variables, y con la misma proporción de coeficiente de determinación siendo de 81%, estableciendo que el modelo empleado es válido para las zonas objetivo: zonas áridas y semiáridas.

**Para mayor detalle sobre la relación de regresión lineal en cada escenario véase el apartado de Anexo I, inciso C.**



**Gráfico 12.** Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, no tratamiento Blanco, NaOH.

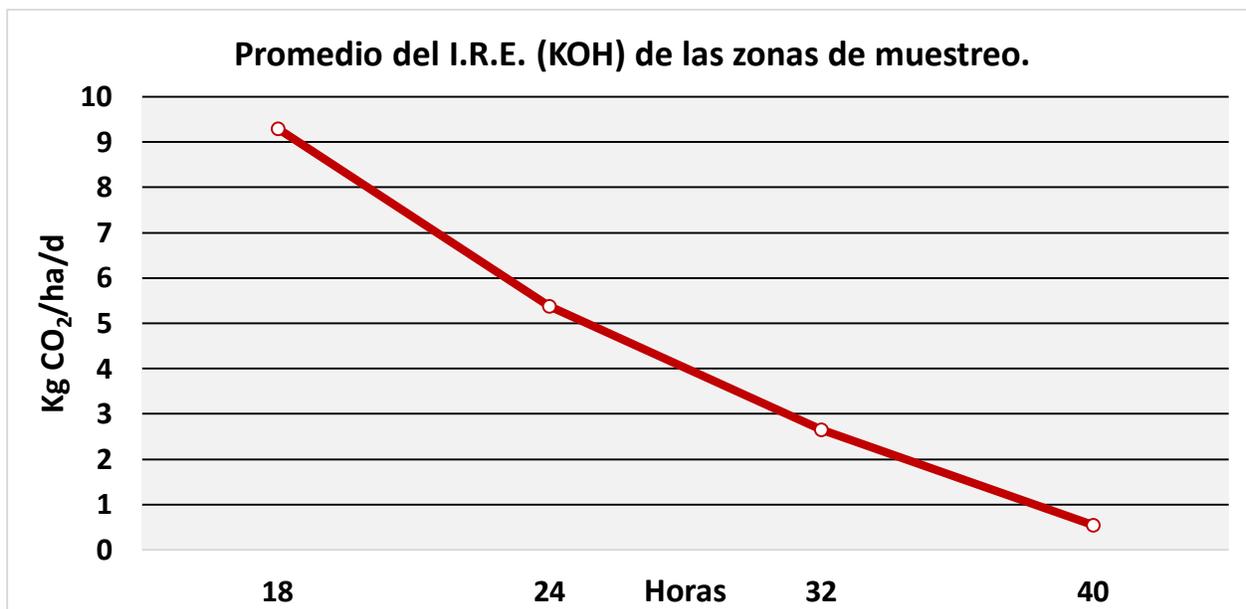
### **8.3.2. Valoración con solución de hidróxido de potasio (KOH)**

La estandarización de métodos que permitan evaluar los aspectos biológicos en zonas áridas y semiáridas, obliga a la utilización de diferentes técnicas de análisis para obtener las evaluaciones óptimas, es por ello que se utilizó para esta investigación el tratamiento de hidróxido de potasio (KOH) para permitir el contraste entre ambas técnicas y discernir cuál de éstas se acerca a la modelación del sistema edáfico.

La investigación de Naganawa (1990), menciona que el uso de KOH, para las evaluaciones biológicas del suelo, como es la respiración, llega a producir el efecto de absorción reversible de CO<sub>2</sub>, por lo que los resultados de dichos análisis llegan a estar comprometidos.

De igual forma la investigación de Kirita y Hozumi (1966), reporta que el uso de KOH para la evaluación de la respiración, tiene diferencias significativas con respecto a otros tratamientos, estos pueden ser mayor o menor concentración registrada. Las diferencias fueron claras en el presente trabajo, mostrando resultados disminuidos para el tratamiento de KOH.

La aplicación de este tratamiento, se realizó de la misma forma que el anterior, bajo el argumento que las dos soluciones se usan en la técnica de cámara sellada estática (Luo y Zhou, 2006), en una concentración de 0.1 N, valorado con una solución de HCl 0.1 N; la relación para la obtención de la tasa de respiración fue la misma que para el tratamiento anterior (Edwards, 1982) "I.R.E. Kg CO<sub>2</sub>/ha/d", siguiendo el esquema de Singh y Gupta (1977), se mantuvieron las mismas concentraciones y volúmenes.



**Gráfico 13.** Promedio General de los escenarios en los cuatro tiempos, solución KOH.

En el Gráfico 13 se registró el comportamiento general de la producción de CO<sub>2</sub> en los escenarios a través del tiempo, mostrando una dinámica similar al tratamiento de NaOH, en la que el máximo tiempo de producción se dio a las 18 horas, disminuyendo paulatinamente hasta llegar a una producción casi imperceptible a las 40 horas.

Respecto a la disminución del porcentaje de producción de CO<sub>2</sub> a lo largo del tiempo, se obtuvieron los siguientes datos: entre 18 y 24 horas, difieren en 29.98%, de 18 a 32 horas la diferencia es de 67.12% y finalmente de 18 a 40 horas, se observó una diferencia de 94.91%, que virtualmente se estima una relación de disminución de producción en un 30% de gas por cada 6-8 horas transcurridas (para NaOH fue un aproximado del 20%). Observando en ambos tratamientos una relación inversamente proporcional de tiempo/producción de CO<sub>2</sub>.

La disimilitud significativa entre ambos tratamientos (Gráfico 14 y Gráfico 15) radica en la concentración de producción, ya que para el NaOH, el promedio máximo de gas captado fue de 17.88 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d (Gráfico 4), en cambio para el tratamiento de KOH fue de 9.31 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d; una diferencia de 47.93% entre ambas soluciones, observándose el mismo efecto la mayoría de los puntos de muestreo.

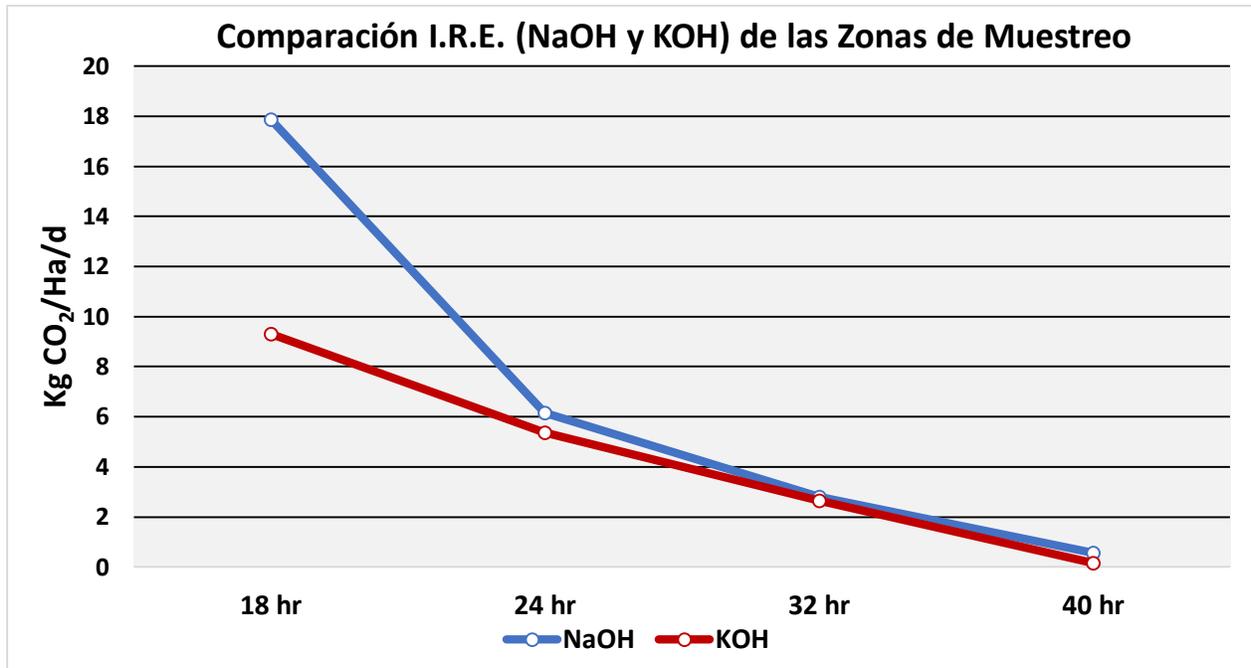


Gráfico 14. Comparación del I.R.E. entre ambos tratamientos en el promedio de los escenarios.

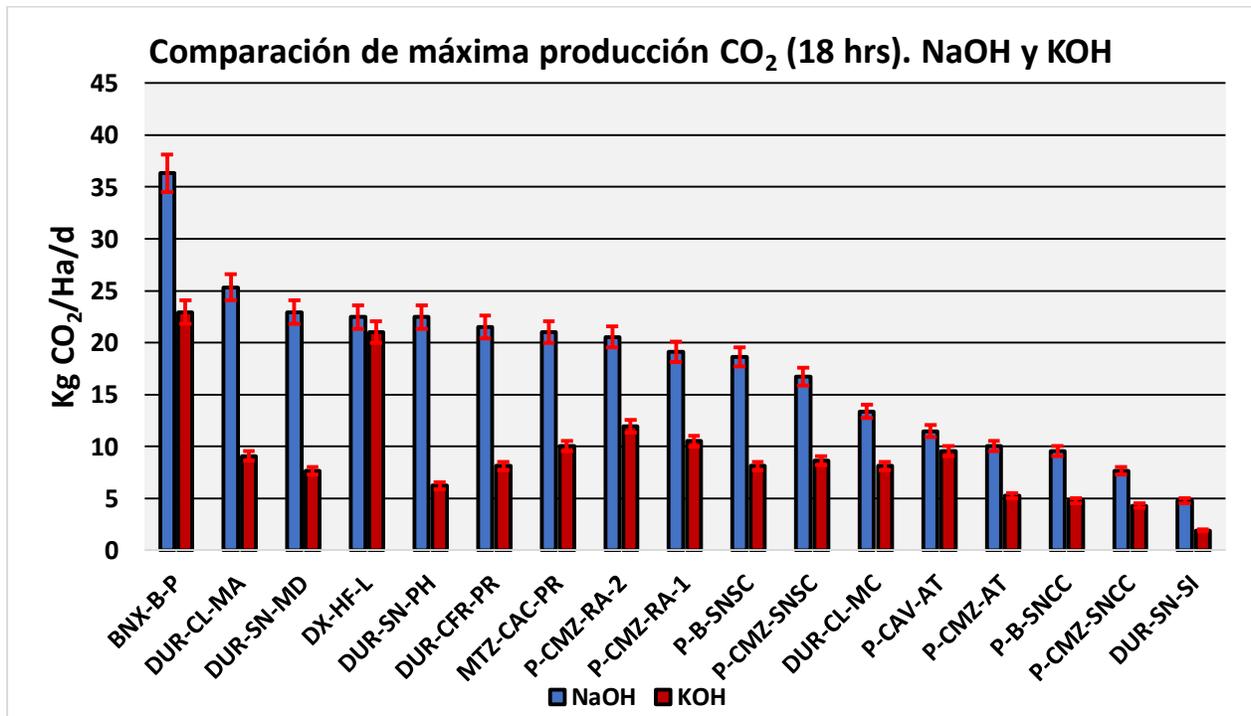


Gráfico 15. Comparación de máxima producción entre ambos tratamientos.

<b>Cuadro 8. Respiración edáfica registrada en los 4 tiempos con Solución KOH</b>				
<b>Tiempo</b>	<b>18 hr</b>	<b>24 hr</b>	<b>32 hr</b>	<b>40 hr</b>
<b>Muestra</b>	<b>I.R.E. Kg CO<sub>2</sub>/ha/d</b>			
DX-HF-L	21.03	8.60	2.69	1.72
P-B-SNCC	4.78	3.23	0.27	0.0
P-B-SNSC	8.12	8.60	5.38	0.65
P-CAV-AT	9.56	8.60	3.76	0.43
P-CMZ-AT	5.26	5.38	2.42	0.43
P-CMZ-RA-1	10.51	10.75	5.38	2.15
P-CMZ-RA-2	11.95	6.45	6.18	1.72
P-CMZ-SNCC	4.30	4.30	1.88	0.0
P-CMZ-SNSC	8.60	7.53	4.84	0.43
MTZ-CAC-PR	10.04	2.15	1.08	0.0
DUR-CFR-PR	8.12	4.30	1.34	0.0
DUR-SN-SI	1.91	2.87	1.08	0.0
DUR-SN-MD	7.65	3.58	0.54	0.0
DUR-SN-PH	6.21	2.15	0.81	0.00
DUR-CL-MC	8.12	6.45	4.84	1.29
DUR-CL-MA	9.08	3.94	1.61	0.0
BNX-B-P	22.94	2.51	1.08	0.43

En el Cuadro 8 fueron registrados los valores del índice de respiración de cada agroecosistema, obedeciendo a los argumentos establecidos del tratamiento de NaOH, bajos los supuestos de Krebs (2003) y Madenjian (1990).

En comparación con el Cuadro 7, el punto que representaba el mayor índice de respiración para NaOH, ahora es observado de media producción (DUR-CL-MA con 9.08 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d, KOH); para éste tratamiento la zona de mayor producción es DX-HF-L con 21.03 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d (Cuadro 8), que corresponde a los huertos familiares, que se definen como parcelas de producción sustentable y las especies cultivadas son nativas de la región, el agua es almacenada para la época de secas en botellas desechables de PET, y promueven el uso de especies botánicas

asociadas, que permiten el óptimo desarrollo del cultivo (Guadarrama y Peña, 2013); ésta misma zona obtuvo un resultado similar en el tratamiento de NaOH que fue de 22.43 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d. Adicional a lo anterior, la zona con el menor índice DUR-SN-SI, concordó en los dos tratamientos con una concentración de 1.91 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d que para el segundo tiempo de medición (24 horas), se registró la mayor producción de 2.87 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d. La diferencia entre ambos métodos se observa negativamente para el KOH, coincidiendo con lo establecido por Kirita y Hozumi (1966).

Para este tratamiento el blanco BNX-B-P fue de 22.94 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d, con una diferencia del 36.83% respecto al NaOH.

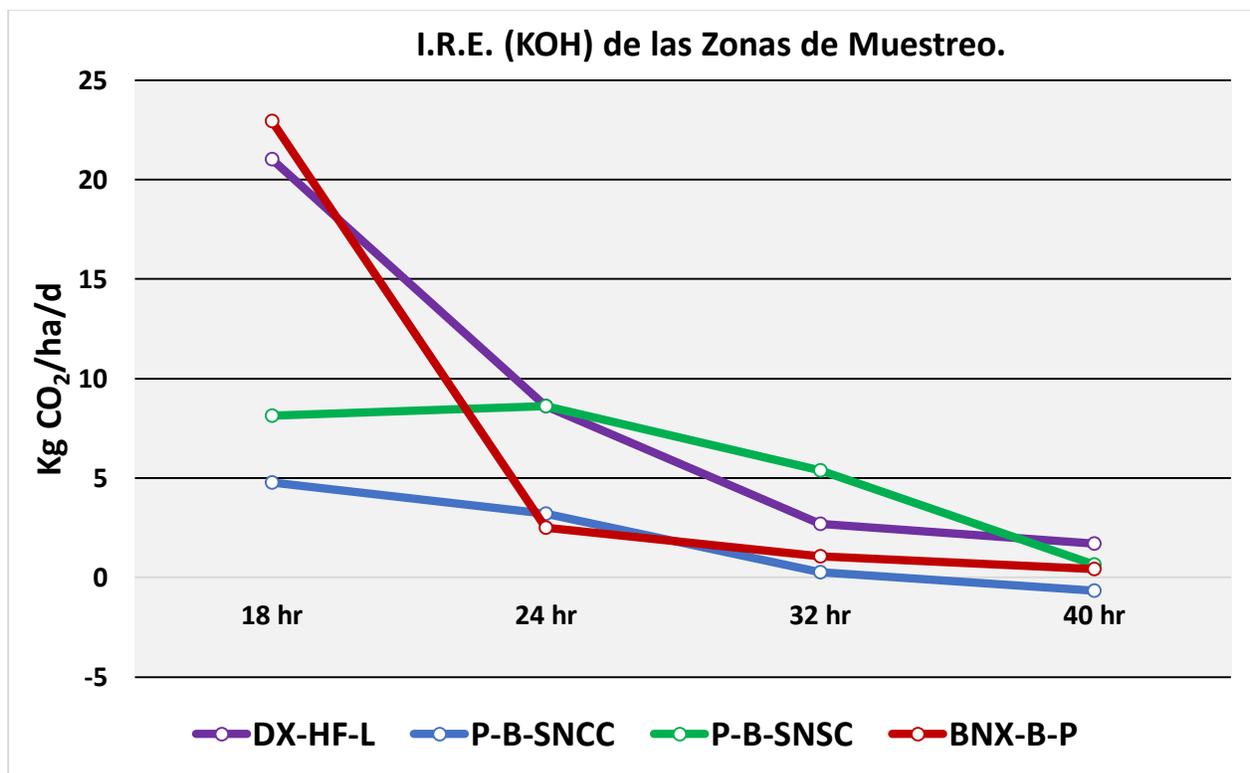


Gráfico 16. I.R.E. de los escenarios en los diferentes tiempos, solución KOH.

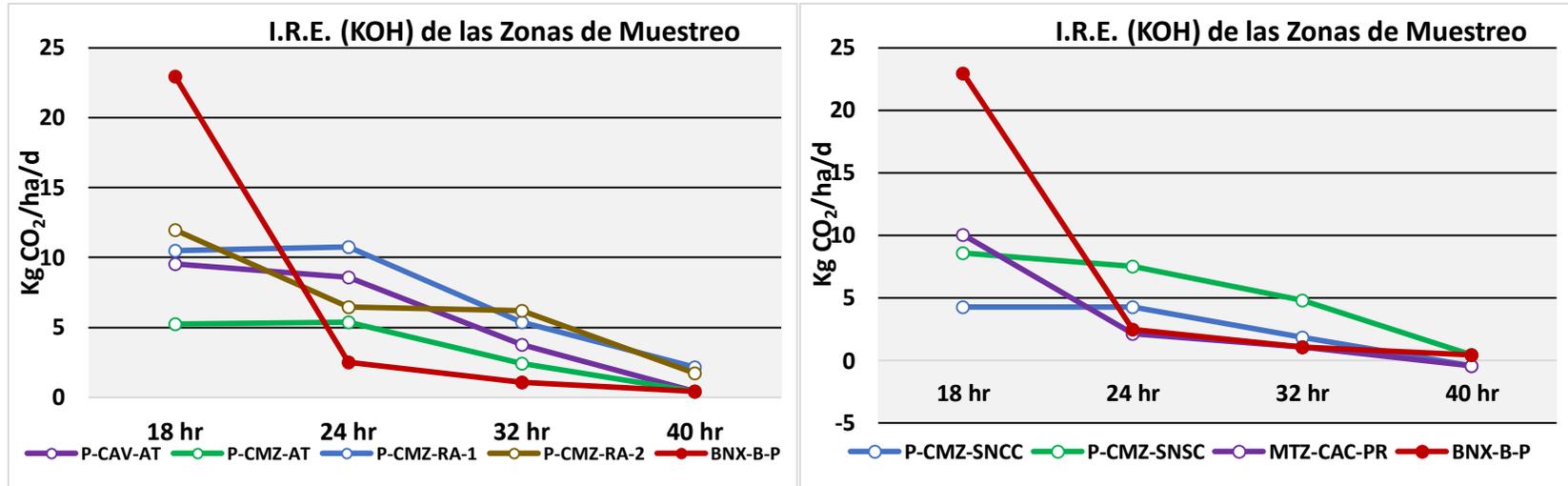


Gráfico 17 y Gráfico 18. I.R.E. de los escenarios en los diferentes tiempos, solución KOH.

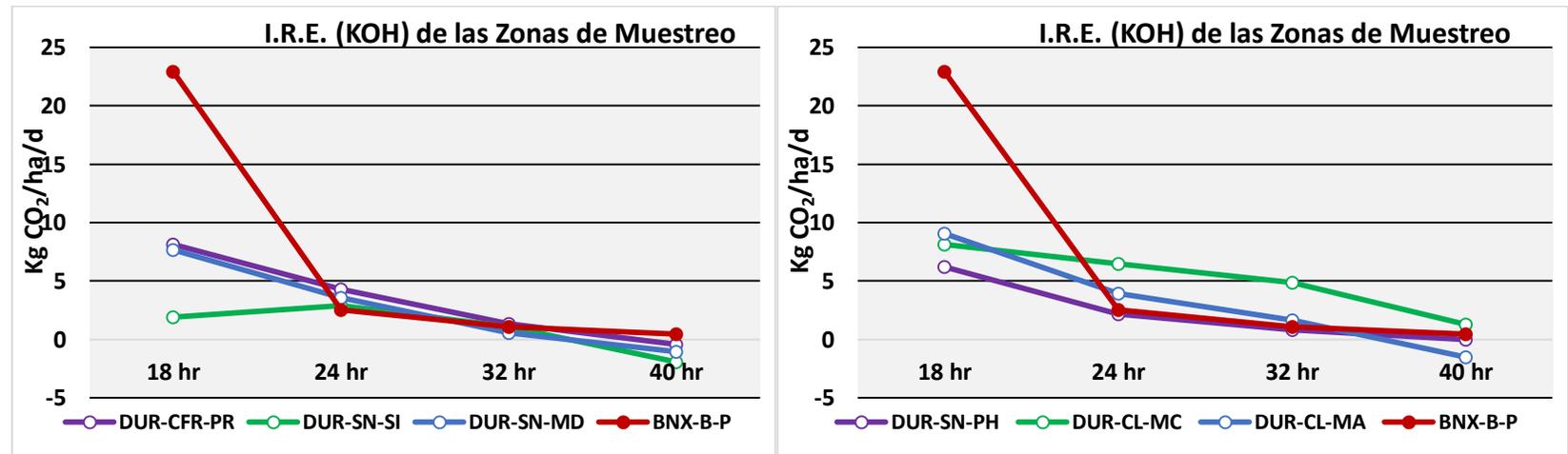
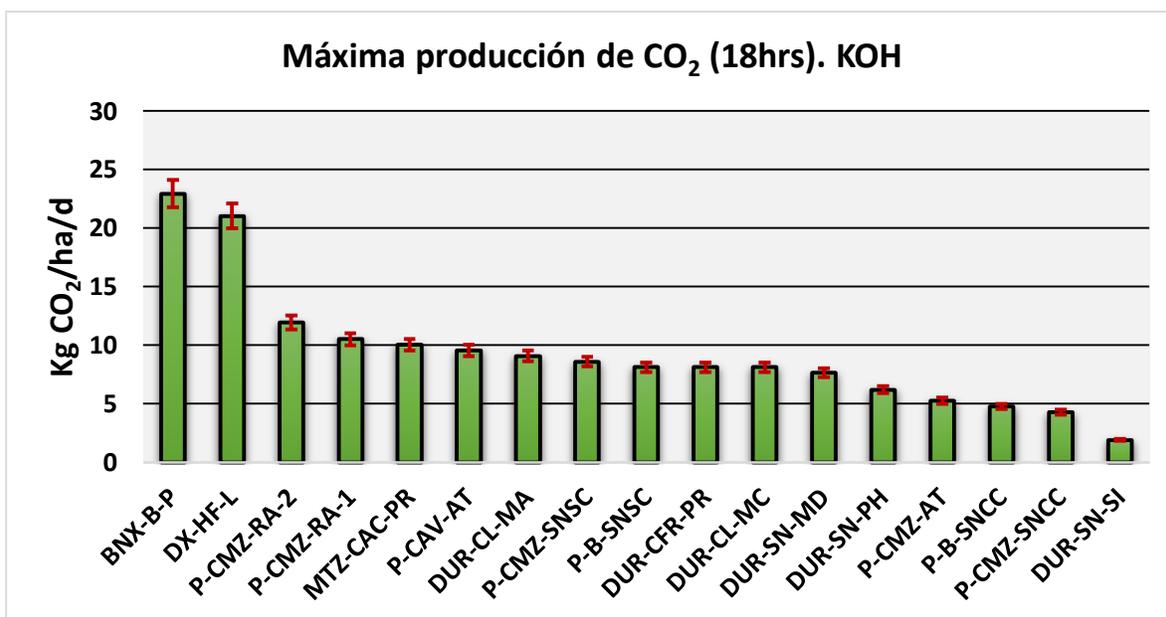


Gráfico 19 y Gráfico 20. I.R.E. de los escenarios en los diferentes tiempos, solución KOH.

En los Gráficos 16, 17, 18, 19 y 20, se observan los índices de respiración edáfica para el tratamiento de hidróxido de potasio, con lecturas a las 18, 24, 32 y 40 horas del sellado del dispositivo. En los puntos de muestreo, se presentaron diferentes dinámicas con respecto al tiempo, esto en los escenarios P-B-SNSC (Gráfico 16) donde se vio un ligero incremento de 0.48 unidades; P-CMZ-AT con 0.12 unidades y P-CMZ-RA-1 con 0.24 unidades (Gráfico 17), P-CMZ-SNCC no tuvo decremento o incremento entre los tiempos (Gráfico 18). Sin embargo el punto DUR-SN-SI (Gráfico 19) mostró un aumento superior a todos los casos siendo de 0.96, representando para éste único caso la mayor producción de gas a las 24 horas. El comportamiento fenoménico observado se asoció a la problemática establecida de absorción del KOH, pero para los puntos MTZ-CAC-PR (Gráfico 7) y DUR-CFR-PR (Gráfico 8) en el tratamiento de NaOH no se llegó a conclusión alguna.

En ambos tratamientos la máxima producción de gas fue observada en el mismo intervalo de tiempo (18 hrs); siendo la misma dinámica general de captación del gas en todas las zonas bajo los dos tratamientos en un sistema cerrado con una nueva clasificación en máxima producción (Gráfico 21) y confirmando que la producción disminuye en un promedio de 40 horas (Kabwe *et al.*, 2002). Sin embargo es menor la producción promedio de CO<sub>2</sub> en el tratamiento de KOH que de NaOH.



**Gráfico 21.** Escenarios ordenados con base en la producción máxima de CO<sub>2</sub> (KOH).

De acuerdo con los análisis estadísticos en ambos tratamientos, los resultados respecto a la regresión lineal fueron para el conjunto de todos los agroecosistemas, cuyo correlación de Pearson -0.9844 (Gráfico 22), siendo casi perfecta, con la misma relación negativa observada en NaOH, y un coeficiente de determinación de 96%, siendo altamente bueno con solo 4% de variabilidad; para el caso de exclusión del blanco (Gráfico 23), tuvo un coeficiente de Pearson y determinación de -0.9062 y 99% respectivamente; sin embargo la problemática descrita anteriormente sobre absorción en KOH, no permite concluir una adecuación correcta en el tratamiento.

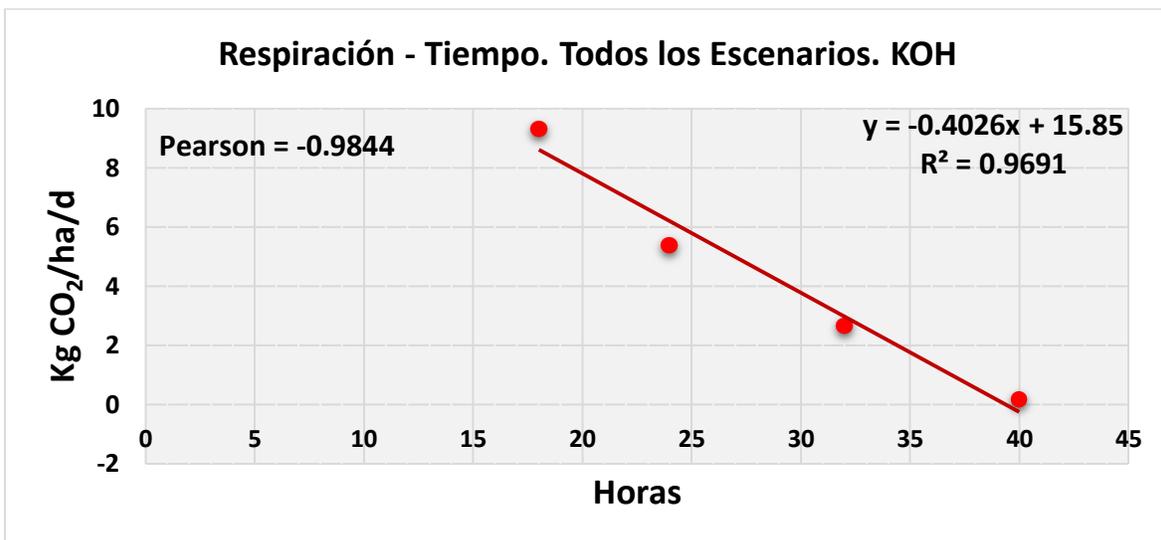


Gráfico 22. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, todos los escenarios, KOH.

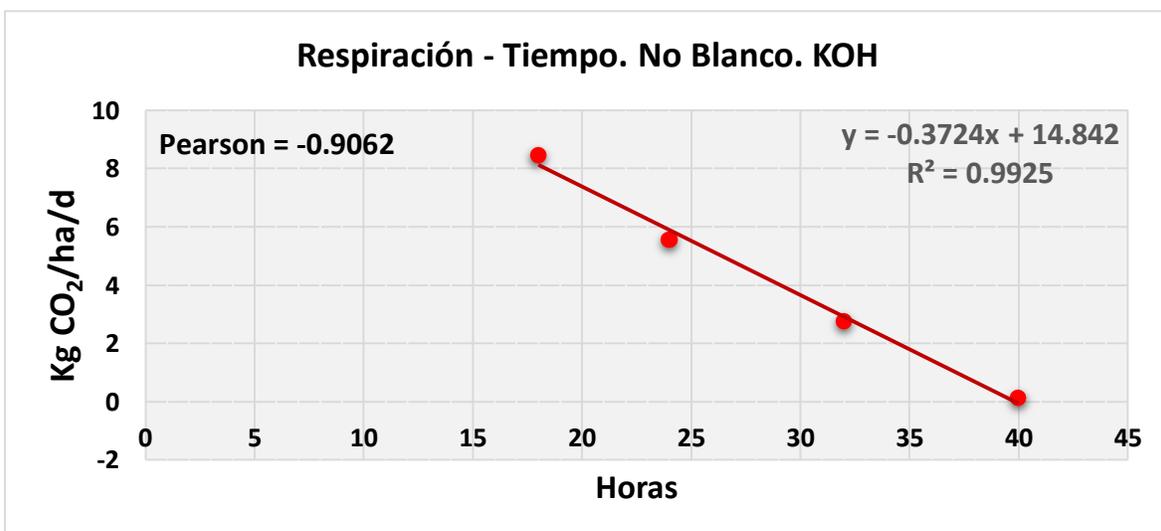


Gráfico 23. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, no blanco, KOH.

#### 8.4. Índice de Respiración Edáfica Total

La dinámica de producción de CO<sub>2</sub> en tiempos establecidos permite que a través de la producción máxima, se infiere estadísticamente la tasa de generación en tiempo y área determinados, pero para conocer el potencial de respiración que tiene la zona, es necesario la estandarización de los elementos abióticos que conforman la respiración, los cuales fungen como idealización de un sistema estable, que al cumplirse con parámetros estrictos condicionan una producción constante.

La tasa diaria de respiración del suelo se estableció con un intervalo de confianza del 95%, a través del análisis índice de respiración edáfica total (I.R.E.t.) tomando evaluación propuesta por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), que normaliza los valores físicos principales que determinan la cantidad de producción CO<sub>2</sub>, esto son la temperatura del suelo en el dispositivo sellado que se estableció principalmente en 32° C y la humedad del suelo registrada al momento de la colecta de la muestra, que estuvo en este caso en un intervalo de 15 a 29% (Salazar, 2011).

Sin embargo el departamento de agricultura de Estados Unidos, establece que la producción neta de la zona deberá estar regulada por una temperatura de 25° C (Cuadro 11), que se fija como punto óptimo para el desarrollo metabólico de los microorganismos (Howard y Howard, 1993), además de que las correcciones obedecen a la norma generalizada de que la actividad biológica aumenta en un factor de 2 unidades por cada 10° C elevados; siendo válida ésta conversión para suelos con temperaturas entre los 15° y 25° C, (USDA, 2012).

Para el caso de la humedad (Cuadro 15), es transformada en una variable denominada Espacio Poroso Saturado de Agua (por su denominación en inglés Water Filled Pore Space-WFPS), definido como el porcentaje del total de agua ocupada en el espacio poroso, cuya diferencia porcentual define el espacio aireado (Ball *et al.*, 2008); éste a su vez, debe ser estandarizado al 60%, ya que se ha encontrado que suelos con WFPS menores a 30%, la actividad microbiana decrece y cuando excede el 80%, se restringe la respiración y no hay suficiente espacio para que se desarrollen las colonias fósiles, siendo por lo tanto el 60% el óptimo para que la actividad metabólica se produzca (USDA, 2012).

**Para mayores detalles, véase Anexo I, inciso B.**

Los Gráficos 24 y 25, muestran en orden descendente la producción potencial de CO<sub>2</sub> de cada escenario de ambos tratamientos, que ahora como consecuencia de la estandarización óptima de temperatura y humedad, permite relacionarlos respecto a la condición del suelo (Cuadro 9); los puntos de muestro fueron clasificados de forma similar en ambos tratamientos debido a que el estadístico aplicado normaliza la tasa de respiración a un modelo común (Wildung *et al.*, 1975).

Como resultado, el punto de la localidad de la Palma P-CMZ-RA-2 posee el proceso de respiración con mayor estabilidad, siendo ésta de 48.44 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d (NaOH) y 28.16 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d (KOH) con una diferencia porcentual de 41.86%, sigue mostrando diferencia significativa entre los tratamientos; incluso mayor a las registradas anteriormente. La zona presenta cultivos de maíz con el sistema de riego auxiliar, donde el agua proviene de las épocas de lluvias principalmente y que es coadyuvado con el uso de pipas o agua previamente almacenada; dicho líquido es agua tratada o extraída de fuentes cercanas donde la mayoría es residual (contaminada). El aporte continuo de este tipo de agua promueve una gran diversidad y desarrollo de microorganismos, por lo que la respiración es productiva, sin embargo dicha práctica conlleva consecuencias de salud pública y deterioro ecológico (Arcos *et al.*, 2005; León y Moscoso, 1995; Tragua, 2010).

En cambio el punto que registró menor producción, que concordó incluso con los análisis anteriores fue DUR-SN-SI con 2.46 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d (NaOH) y 0.99 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d (KOH), una diferencia del 59.75%, concluyendo que el uso de la solución alcalina KOH, bajo el modelo de zonas áridas y semiáridas, representa una relación menor del 50.80% respecto al hidróxido de sodio. Este comportamiento se debe a que son zonas compactadas con una considerable disminución del espacio poroso, por ser un sitio inundado, situación que coincide por lo reportado por Mogollón *et al.* (2010).

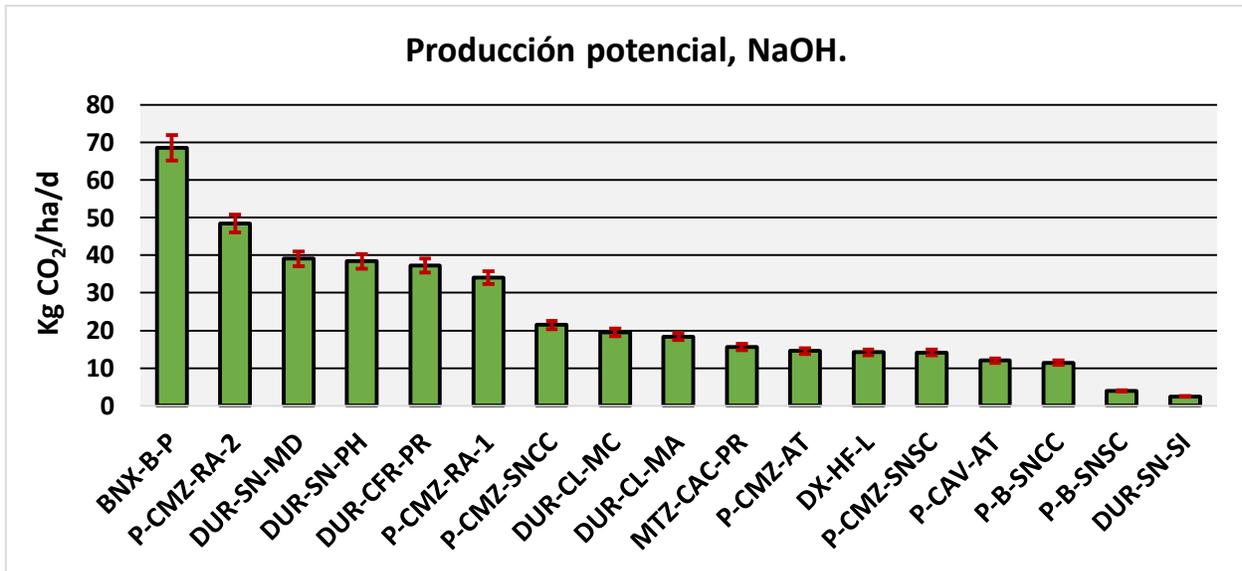


Gráfico 24. Índice de respiración edáfica total en los escenarios, tratamiento NaOH.

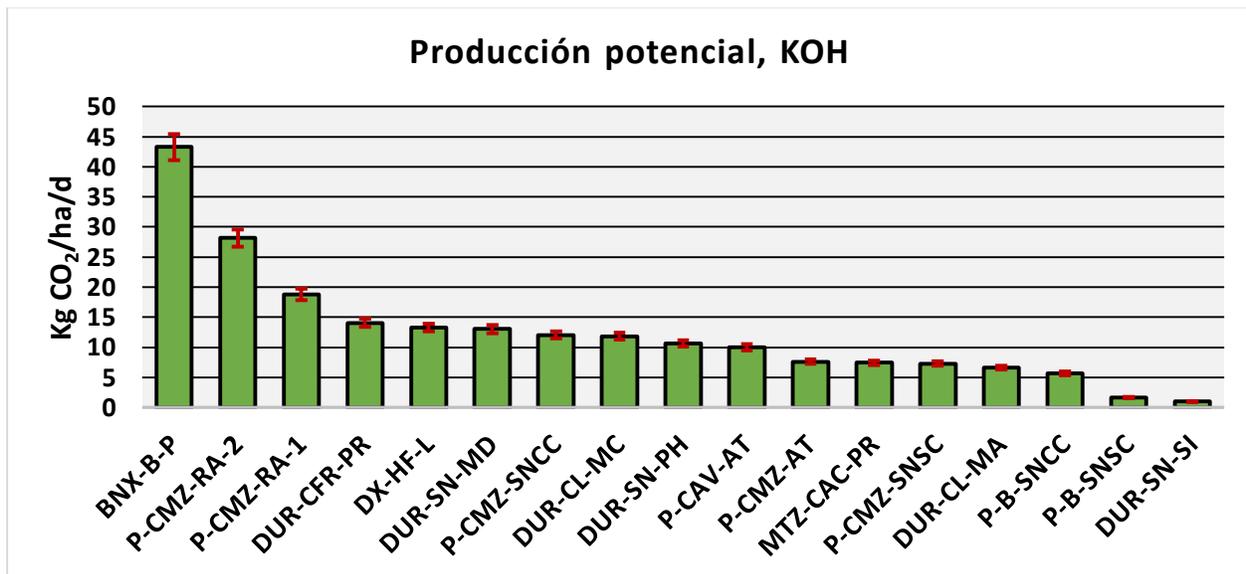


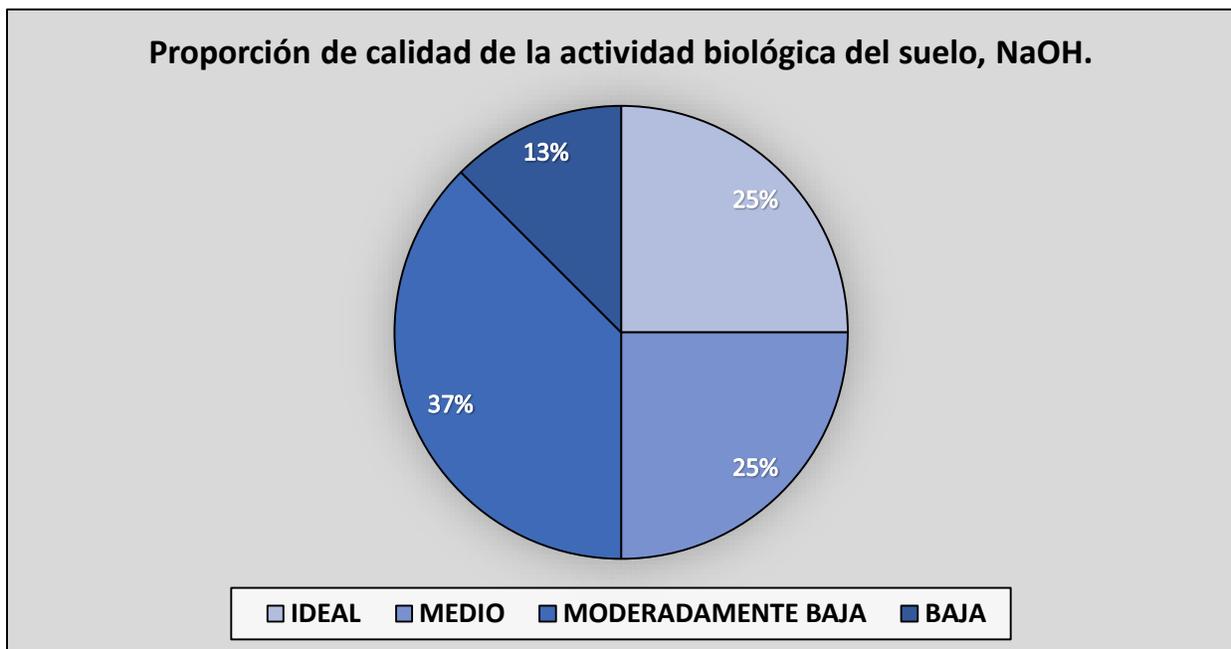
Gráfico 25. Índice de respiración edáfica total en los escenarios, tratamiento KOH.

Los Gráficos 26 y 27, muestran las proporciones respecto a la condición de la respiración del suelo en el área de estudio.

La clasificación obedece a los criterios establecidos por el USDA, que define cada tasa de respiración respecto a la actividad microbiana y su relación directa con la calidad biológica de suelos (Cuadro 9).

<b>Cuadro 9. Criterios de evaluación de la respiración edáfica</b>		
<b>Respiración del Suelo Kg CO<sub>2</sub>/ha/d</b>	<b>Clase / Actividad Biológica</b>	<b>Condición / Calidad</b>
0	Sin actividad	El suelo no tiene actividad biológica, Virtualmente estéril.
< 10.5	Baja	El suelo no dispone de materia orgánica suficiente. Con actividad biológica mínima.
10.5 – 18	Moderadamente Baja	El suelo posee poca materia orgánica. La actividad biológica es disminuida.
18 – 34	Media	El suelo está cercano o descendiendo de un estado ideal de actividad biológica.
34 – 71.5	Ideal	Suelo en estado ideal de actividad biológica. La cantidad de materia orgánica es óptima y el desarrollo de los microorganismos es adecuado.
71.5<	Alta	El suelo posee un alto nivel de actividad biológica y contiene gran cantidad de materia orgánica, probablemente de la incorporación desmedida de abonos químicos, estiércol o descargue de aguas contaminadas.
Luo y Zhou, 2006; USDA, 2012; & Witkamp, 1996.		

Con esto se tiene que el 37% de los sitios de estudio, presentan una actividad biológica moderadamente baja; debido a que el suelo posee poca materia orgánica (Gráfica 24), ya que al ser zonas áridas y semiáridas, el incremento de la temperatura del suelo a través del tiempo, promueve que éste factor sea consumido rápidamente (Kirschbaum, 1995). Dicha condición está dada en las primeras tres localidades estudiadas (Dexthí-San Juanico, Palma-San Juanico y Barrio los Martínez), donde el fenómeno de desertificación es el que más ha afectado la región del Alto Mezquital, principalmente la zona norte (Landa y Neri, 2002). En cambio el 50% de los sitios analizados fueron clasificados entre el ideal y de media actividad biológica, correspondiendo a la localidad el Durazno y las zonas de suelo natural asociadas a cultivos de la Palma-San Juanico, que como se ha mencionado anteriormente, son zonas donde se promueve la agricultura sustentable y el aprovechamiento de aguas tratadas, por lo que los sistemas edáficos generados en los sitios evaluados permiten el desarrollo óptimo de diversos microorganismos (CEPIS, 2002).



**Gráfico 26.** Criterios de evaluación de los sitios estudiados, NaOH.

Para el caso del uso del hidróxido de potasio (Gráfico 27) no se registró ningún escenario como ideal, la gran mayoría de la zona es considerada de baja actividad biológica abarcando las localidades de La Palma-San Juanico, El Barrio los Martínez y dos áreas de El Durazno, todas éstas asociadas a cultivos; sin registrarse conclusión alguna de la clasificación y debido a las diferencias significativas entre ambos tratamientos, se toma la recomendación del caso de Dörr y Münnih (1980), que determinan utilizar trampas de NaOH para evaluación de la respiración de suelos.

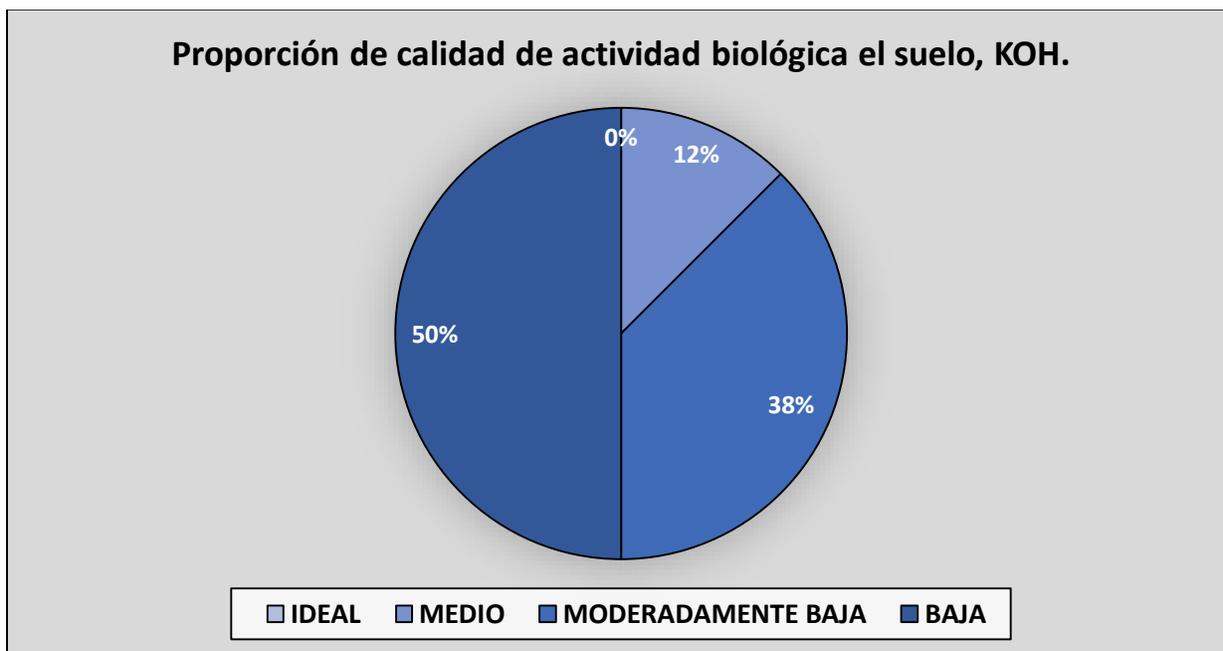


Gráfico 27. Criterios de evaluación de los sitios estudiados, KOH.

Agroecosistema	NaOH		KOH	
	I.R.E. TOTAL Kg CO <sub>2</sub> /Ha/d	CRITERIO	I.R.E. TOTAL Kg CO <sub>2</sub> /Ha/d	CRITERIO
DX-HF-L	14.20	Moderadamente Baja	13.29	Moderadamente Baja
P-B-SNCC	11.41	Moderadamente Baja	5.70	Baja
P-B-SNSC	3.88	Baja	1.69	Baja
P-CAV-AT	12.00	Moderadamente Baja	10.00	Baja
P-CMZ-AT	14.51	Moderadamente Baja	7.60	Baja

P-CMZ-RA-1	34.13	Medio	18.77	Medio
P-CMZ-RA-2	48.44	Ideal	28.16	Medio
P-CMZ-SNCC	21.46	Medio	12.07	Moderadamente Baja
P-CMZ-SNSC	14.16	Moderadamente Baja	7.28	Baja
MTZ-CAC-PR	15.61	Moderadamente Baja	7.45	Baja
DUR-CFR-PR	37.25	Ideal	14.07	Moderadamente Baja
DUR-SN-SI	2.46	Baja	0.99	Baja
DUR-SN-MD	39.10	Ideal	13.03	Moderadamente Baja
DUR-SN-PH	38.40	Ideal	10.62	Moderadamente Baja
DUR-CL-MC	19.50	Medio	11.84	Moderadamente Baja
DUR-CL-MA	18.40	Medio	6.60	Baja
BNX-B-P	68.56	Ideal	43.30	Ideal

En el Cuadro 10 se registraron los I.R.E.t. de todas las unidades de cultivo y ecosistemas naturales con su respectivo criterio de evaluación. Con una diferencia en cantidad generada de CO<sub>2</sub> generalizada del 47.64% entre el hidróxido de sodio y el hidróxido de potasio; el único punto que resultó con evaluaciones similares fue DX-HF-L, cuya diferencia es de 6.41% entre ambos tratamientos.

<b>Cuadro 11. Influencia de la Temperatura</b>	
Temperatura ° C	Condición
60	Muerte de las Bacterias del Suelo.
38.33 – 54. 44	Se pierde el 100% de la humedad a través de evaporación y transpiración. Algunas especies de artrópodos y bacterias comienzan a morir.
35 – 38.33	Se pierde alrededor del 85% de Humedad, el 15% restante, es utilizada por los microorganismos.
18.33 - 35	Sistema estable, el 100% de la humedad es utilizada por el sistema biótico.
USDA, 2012.	

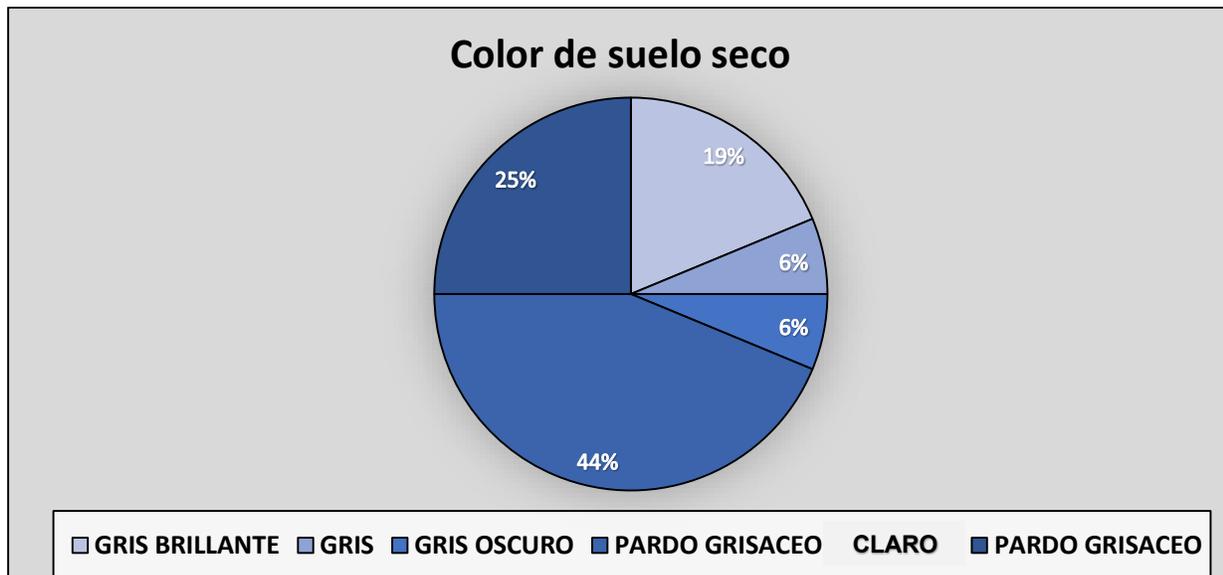
## **8.5. Propiedades Físicas de los suelos**

Las propiedades físicas de los suelos, determinan en gran medida, la capacidad de muchos de los usos para lo que el hombre requiere. La condición física de un suelo, determina la rigidez y fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de las raíces, aireación, capacidad de drenaje y almacenamiento de agua, plasticidad, y retención de nutrientes. Se considera necesario para los investigadores en el uso de la tierra, conocer las propiedades físicas del suelo, para entender en qué medida y cómo influyen en el crecimiento de las plantas y cómo la actividad humana puede llegar a modificarlas, y comprender la importancia de mantener las mejores condiciones físicas del suelo posibles (Álvarez y Velozo, 1974).

### **8.5.1. Color**

El análisis del color del suelo es una de las características morfológicas con mayor importancia, permite identificar clases de suelos, utilizado en la separación de horizontes y tiene una estrecha relación con los principales componentes sólidos de este recurso. Basados en la importancia que tiene el color del suelo, cualquier error en su determinación acarrea conclusiones equivocadas respecto a las características que se relacionan con el (Jaramillo, 2002).

Para determinar los colores son utilizadas las tablas de color Munsell, que incluyen todos los matices del rango visible del espectro electromagnético; en suelos se utiliza sólo alrededor de la quinta parte del rango (Munsell Color Firm, 1975).

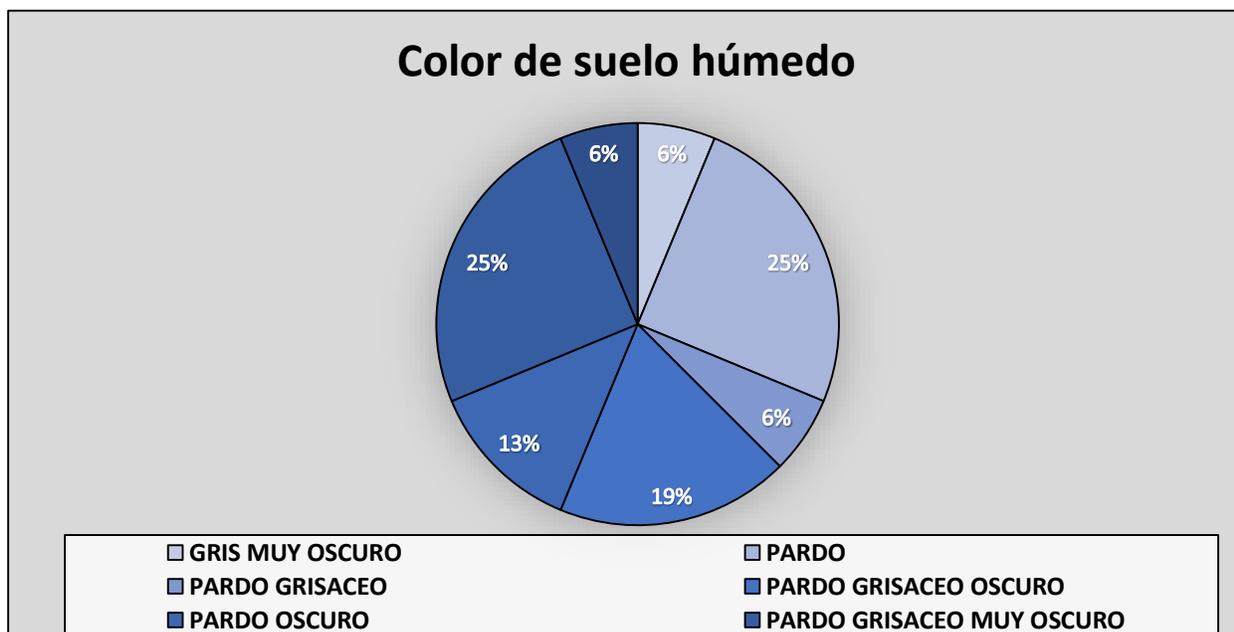


**Gráfico 28.** Color del suelo seco en el área de estudio.

El Gráfico 28, muestra la proporción del color seco registrada en el área de investigación, clasificándose principalmente como una zona de color pardo grisáceo claro, que junto con los suelos pardo grisáceos, son asociados a estados iniciales a intermedios de alteración o erosión, se relacionan con condiciones de niveles medios a bajos de materia orgánica y el rango de vertibilidad es muy variable, cuya regla general se clasifican estos suelos por contener materia orgánica ácida y parcialmente descompuesta, además de poseer combinaciones de óxidos de Fe con materiales orgánicos (Buntley y Westin, 1965). Estas características se presentan en los suelos de las localidades del Dexthí-San Juanico, La Palma-San Juanico incluyendo la zona de barranca, Barrio los Martínez, y solo dos zonas de El Durazno: DUR-CFR-PR que son cultivos de frijol cuyo riego es obtenido de la zona adyacente geográficamente y el punto de menor producción de respiración DUR-SN-SI.

El 31% de la zona estudiada, presenta suelo de color gris, que puede ser indicativo del ambiente anaeróbico; esto ocurre cuando el suelo se satura con agua, al desplazar o agotar el oxígeno del espacio poroso del suelo (Mellville y Atkinson, 1985). Bajo estas condiciones las bacterias anaeróbicas utilizan el  $Fe^{3+}$  (férrico) presente en minerales como la goetita y la hematita como un aceptor de electrones en su metabolismo; en este proceso se genera la forma reducida del ion que es  $Fe^{2+}$  (ferroso), que es soluble en agua e incoloro.

La pérdida de pigmentos deja un color gris en la superficie del mineral y si la saturación con agua se prolonga por largos períodos, la zona completa adquiere la coloración gris (Buntley y Westin, 1985). Ésta coloración del suelo se encontró en la localidad de El Durazno cuya posición geográfica, lo sitúa cercano a cuerpos de agua donde incluso llegan a inundarse por la saturación de los ríos cercanos.



**Gráfico 29.** Color del suelo Húmedo en el área de estudio.

El color en húmedo (Gráfico 29), los suelos adquieren mayor tonalidad, por lo que los puntos anteriores que se clasificaban como grises ahora se observan pardos y de los pardos grisáceos a claros son clasificados como pardos grisáceos oscuros, pardos oscuros e incluso el mezquital cerrado (DUR-CL-MC) fue catalogado en negro (Cuadro 12). La gran mayoría del área, continúa influenciada por los colores pardo y gris como se discutió anteriormente, sin embargo el punto de muestreo DUR-CL-MC resultó con coloración negra que se asocia a la incorporación de materia orgánica que se descompone en humus. Este color corresponde con niveles altos de materia orgánica en el suelo, indicadores de buena fertilidad, en especial la presencia de cationes tales como el  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ ; colateralmente está asociada a condiciones físicas relacionadas con la materia orgánica, tal como la presencia de una buena estructuración del suelo y rica actividad biológica. Bajo otro esquema, cuando hay acumulación de  $\text{Na}^+$ , por ser este un agente

dispersante, el suelo, aún con muy bajos niveles de materia orgánica, adquiere la coloración negra, pero se caracterizará por tener malas condiciones estructurales (Mellville y Atkinson, 1985). Esta zona natural es próxima a cultivos sustentables de lechuguilla, y se caracteriza por ser un sistema estable que ayuda indirectamente a las zonas que rodea, ya sea con retención de agua o aporte de materia orgánica (Montaño-Arias, *et al.*, 2006).

<b>Cuadro 12. Color de las unidades evaluadas e índice de respiración edáfica total</b>						
<b>Escenarios</b>	<b>Valor Seco</b>	<b>Color Seco</b>	<b>Valor Húmedo</b>	<b>Color Húmedo</b>	<b>I.R.E. TOTAL NaOH</b>	<b>I.R.E. TOTAL KOH</b>
DX-HF-L	10YR 6/2	PARDO GRISACEO CLARO	10YR 4/2	PARDO GRISACEO OSCURO	Moderadamente Baja	Moderadamente Baja
P-B-SNCC	10YR 5/1	GRIS	10YR 3/1	GRIS MUY OSCURO	Moderadamente Baja	Baja
P-B-SNSC	10YR 6/2	PARDO GRISACEO CLARO	10YR 3/2	PARDO GRISACEO MUY OSCURO	Baja	Baja
P-CAV-AT	10YR 5/2	PARDO GRISACEO	10YR 3/2	PARDO GRISACEO MUY OSCURO	Moderadamente Baja	Baja
P-CMZ-AT	10YR 6/2	PARDO GRISACEO CLARO	10YR 3/2	PARDO GRISACEO MUY OSCURO	Moderadamente Baja	Baja
P-CMZ-RA-1	10YR 5/2	PARDO GRISACEO	10YR 3/2	PARDO GRISACEO MUY OSCURO	Medio	Medio
P-CMZ-RA-2	10YR 5/2	PARDO GRISACEO	10YR 4/2	PARDO GRISACEO OSCURO	Ideal	Medio
P-CMZ-SNCC	10YR 5/2	PARDO GRISACEO	10YR 3/3	PARDO OSCURO	Medio	Moderadamente Baja
P-CMZ-SNSC	10YR 6/2	PARDO GRISACEO CLARO	10YR 3/3	PARDO OSCURO	Moderadamente Baja	Baja
MTZ-CAC-PR	10YR 6/2	PARDO GRISACEO CLARO	10YR 4/3	PARDO	Moderadamente Baja	Baja
DUR-CFR-PR	10YR 6/2	PARDO GRISACEO CLARO	10YR 4/3	PARDO	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-SN-SI	10YR 6/2	PARDO GRISACEO CLARO	10YR 4/2	PARDO GRISACEO OSCURO	Baja	Baja
DUR-SN-MD	10YR 7/2	GRIS CLARO	10YR 5/3	PARDO	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-SN-PH	10YR 7/2	GRIS CLARO	10YR 5/2	PARDO GRISACEO	Ideal	Moderadamente Baja

DUR-CL-MC	10YR 4/1	GRIS OSCURO	10YR 2/1	NEGRO	Medio	Moderadamente Baja
DUR-CL-MA	10YR 7/2	GRIS CLARO	10YR 4/3	PARDO	Medio	Baja
BNX-B-P	10YR 4/2	PARDO GRISACEO OSCURO	10YR 3/2	PARDO GRISACEO OSCURO	Ideal	Ideal

El Cuadro 12 muestra los resultados de color seco y húmedo en los escenarios, con la relación a los criterios de respiración total en los dos tratamientos alcalinos. No es observable una relación directa entre ambos parámetros, ya que la mayoría de los escenarios presentan el color gris y pardo, ya que la respiración es diversa. Por ejemplo, los modelos ideales de actividad biológica se relacionan con suelos pardos para este estudio, y los modelos bajo y moderadamente bajo de actividad, presentan también colores pardos grisáceos, concordando con Mellville y Atkinson (1985) sobre suelo con poca disponibilidad de oxígeno.

**Para la evaluación de las propiedades físicas y químicas restantes, fue necesario la unión de los Sitios Estudiados que cumplieran las características de las Unidades de Cultivo y Ecosistemas naturales, resultando una nueva Clasificación Agroecológica (Cuadro 13) válida para las evaluaciones siguientes:**

<b>Cuadro 13. Estandarización del I.R.E., conforme a los escenarios valorados</b>					
<b>Nueva Clasificación</b>	<b>Agroecosistema / Ecosistema Natural</b>	<b>I.R.E.t. NaOH</b>		<b>I.R.E.t. KOH</b>	
<b>SN-CC</b>	Suelo Natural con Costra Microbiótica	16.43	Moderadamente Baja	8.89	Baja
<b>SN-SC</b>	Suelo Natural sin Costra Microbiótica	9.02	Baja	4.49	Baja
<b>AT</b>	Agricultura de Temporal	13.25	Moderadamente Baja	8.80	Baja
<b>PR</b>	Parcela de Riego	26.43	Media	10.76	Moderadamente Baja
<b>RA</b>	Riego Auxiliar	41.29	Ideal	23.47	Media
<b>MA-SS</b>	Mezquital Abierto en Suelos Salinos	18.40	Media	6.60	Baja

<b>MC-SS</b>	Mezquital Cerrado en Suelos Salinos	19.50	Media	11.84	Moderadamente Baja
<b>HF</b>	Huertos Familiares	14.20	Moderadamente Baja	13.29	Moderadamente Baja
<b>MD</b>	Mezquital Desmontado	39.10	Ideal	13.03	Moderadamente Baja
<b>SI</b>	Suelos Inundables	2.46	Baja	0.99	Sin actividad
<b>PH</b>	Pastizal Halófito	38.40	Ideal	10.62	Moderadamente Baja
<b>BE</b>	Bosque de Encino (Blanco)	68.56	Ideal	43.30	Ideal

Por medio de la normalización de los datos de puntos de muestreo (IBM SPSS Statistics 21) la respiración edáfica en las unidades agrícolas, se obtuvieron nuevos criterios de evaluación que corresponden a los atributos físicos y químicos del área de estudio; ahora se observa la categoría sin actividad para los suelos inundables en el tratamiento de KOH, además de encontrar tres zonas de actividad ideal que fueron Riego Auxiliar, Mezquital de Desmonte, Pastizal Halófito y el sitio Bosque de Encino, que fue tomado como referencia blanco. Sin embargo en el Cuadro 14 se muestran los resultados de textura de cada punto de muestreo junto con los criterios de la respiración.

### 8.5.2. Textura del Suelo

La textura del suelo es uno de los atributos con mayor importancia, ya que se puede predecir el comportamiento físico del suelo, haciendo inferencias acerca del movimiento del agua en el perfil, la facilidad de manejo y la cantidad de nutrientes. La textura indica la proporción de partículas fundamentales en el suelo: arcilla, limo y arena, que se agrupan en suelos de textura fina, media y gruesa. Con la proporción relativa de estas fracciones minerales se obtienen un gran número de combinaciones que originan las clases texturales (Burt, 2004).

La determinación de la textura del suelo o análisis granulométrico consiste en la separación y cuantificación de las partículas de arena, limo y arcilla de una muestra de suelo, y en la consulta del triángulo de texturas para obtener la clase textural del mismo. La cuantificación de las partículas minerales puede hacerse por el método del tamiz, y por el de sedimentación de las partículas (Klute, *et al.*, 1965).

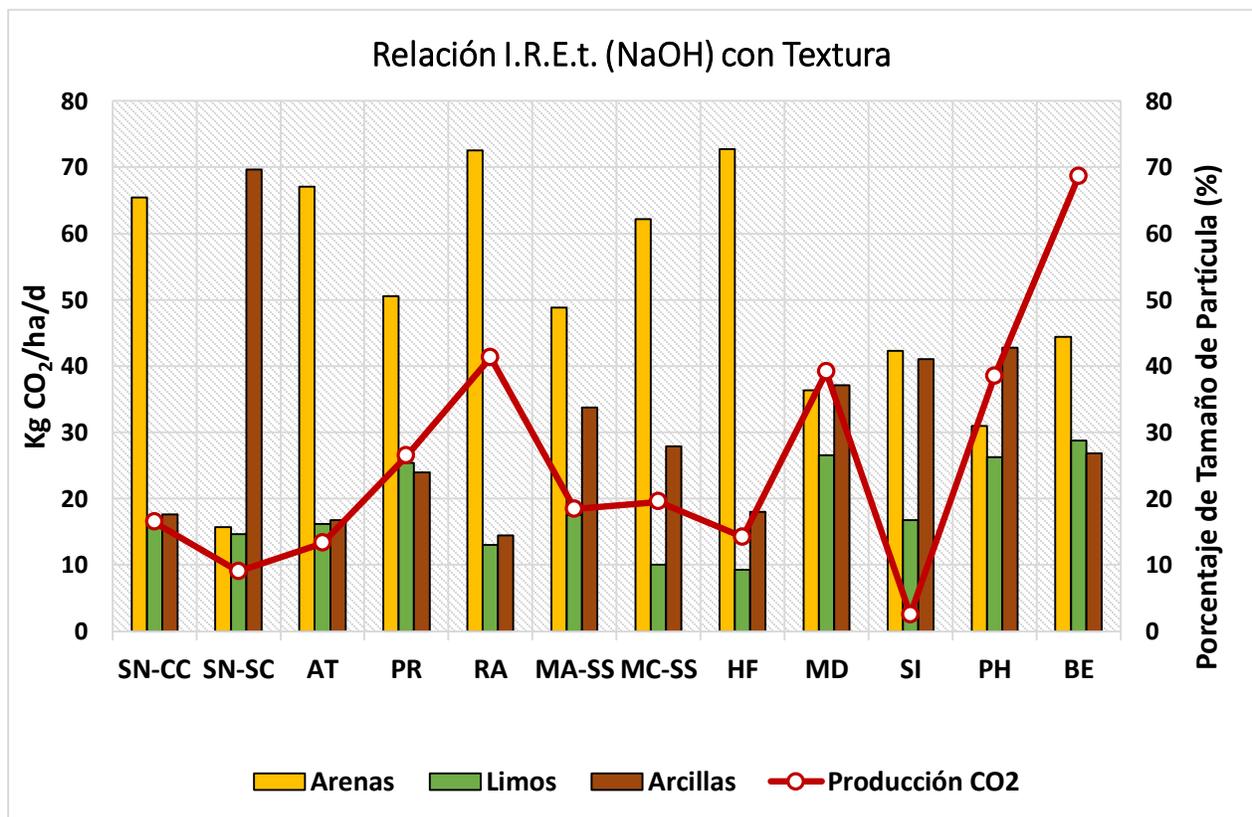


Gráfico 30. Relación del I.R.E.t. (NaOH) con la textura del suelo de los agroecosistemas.

Conforme a la nueva clasificación, las unidades de cultivo se relacionaron con el contenido porcentual de arenas y limos; Luo y Zhou (2006) establecen que la respiración tiende a disminuir en sitios arenosos con poca humedad (cuando este atributo es proporcionalmente mayor a los contenidos de arcillas y limos), como se observa en el Gráfico 30, los escenarios SN-CC, AT, MA-SS, MC-SS, HF y SI, obtuvieron los índices de respiración más bajos (actividad moderadamente baja y baja) cuya composición de arenas fue mayor al 40%; determinando la humedad (véase apartado 8.5.3.) que los índices de respiración resultaran disminuidos.

Los sitios SN-CC, SN-SC, AT, MA-SS y MC-SS son zonas cuyo riego depende completamente de la época de lluvias, la disponibilidad de agua está comprometida al tiempo climático, y al tratarse de zonas áridas y semiáridas, este parámetro se encuentra aún más reducido.

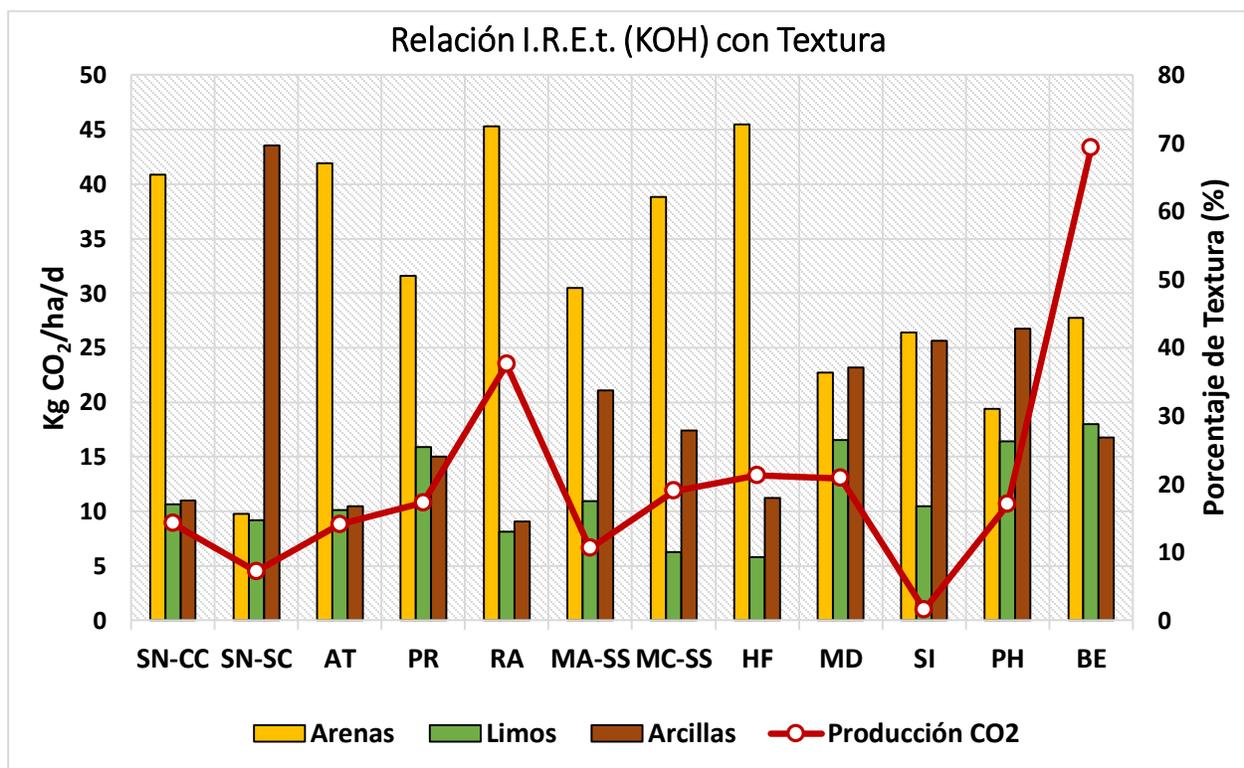
La zona de HF, es de los escenarios con mayor contenido de arenas con 72%, y el riego es administrado por medio de agua almacenada durante todo el año, por lo que la calidad del agua de riego influye en la respiración, además de que este fenómeno se suprime a mayores temperaturas en los periodos secos (Dilustro *et al.*, 2005). En la zona SI, el exceso de agua determina negativamente que se realice la respiración, ya que como se ha mencionado anteriormente, es un área de captación del líquido.

Caso contrario, las zonas PR, RA, MD, PH, BE resultaron con índices de respiración de Medio a Ideal; principalmente relacionado con el contenido de limos, donde se ha observado que bajo condiciones de suficiente humedad, sitios proporcionados de arenas y limos permiten el desarrollo de la respiración del suelo (Luo y Zhou, 2006).

El sitio PR contiene más del 20% de limos cuyo riego es efectuado constantemente, promoviendo buena humedad en la zona. En cambio RA es un punto con textura similar a HF, con la diferencia de que el riego para el primer caso, es utilizada agua tratada, además de la abastecida en época de lluvias.

El agroecosistema de agostadero PH muestra actividad ideal de respiración, cuyo contenido textural es similar para los tres tipos de partícula; a pesar de encontrarse en la localidad de El Durazno y ser suelos salinos, la cercanía geográfica con la zona SI, permite obtener riego para el sistema.

El área de mezquital desmontado (MD), es una zona de cambio de uso de suelo forestal a agrícola, por lo que las características de un sistema vegetal estable continúan vigentes hasta la total transformación del medio, por ello que la respiración se clasifica como ideal; por último la zona testigo (BE), obtuvo la mayor producción de gas CO<sub>2</sub>, donde las arenas (45%) y limos (28%) se encuentran proporcionales en textura, y con la humedad suficiente para el óptimo desarrollo de los microorganismos (Madenjian, 1990).



**Gráfico 31.** Relación del I.R.E.t. (KOH) con la textura del suelo de los agroecosistemas.

Dentro del Gráfico 31, se observa una dinámica similar al tratamiento de NaOH, donde continúa una producción reducida de CO<sub>2</sub>. Virtualmente y de forma proporcional a los índices de respiración de los escenarios bajo el tratamiento de KOH, los casos PH y MD parecen mostrar mayor producción de gas y la zona PH disminuye conforme a la composición de textura.

<b>Cuadro 14. Clase textural de los sitios valorados</b>						
<b>Escenarios</b>	<b>Arenas %</b>	<b>Limos %</b>	<b>Arcillas %</b>	<b>Textura</b>	<b>I.R.E. TOTAL NaOH</b>	<b>I.R.E. TOTAL KOH</b>
DX-HF-L	72.75	9.25	18.00	FRANCO ARENOSA	Moderadamente Baja	Moderadamente Baja
P-B-SNCC	58.33	24.00	17.67	FRANCO ARENOSA	Moderadamente Baja	Baja
P-B-SNSC	63.33	21.33	15.34	FRANCO ARENOSA	Baja	Baja
P-CAV-AT	60.67	19.33	20.01	FRANCO ARCILLOSA ARENOSA	Moderadamente Baja	Baja
P-CMZ-AT	73.50	13.00	13.50	ARENOSA FRANCOSA	Moderadamente Baja	Baja
P-CMZ-RA-1	72.50	12.50	15.00	ARENOSA FRANCOSA	Medio	Medio
P-CMZ-RA-2	72.50	13.50	14.00	FRANCO ARENOSA	Ideal	Medio
P-CMZ-SNCC	72.50	10.00	17.50	ARENOSA FRANCOSA	Medio	Moderadamente Baja
P-CMZ-SNSC	76.00	10.00	14.00	FRANCO ARENOSA	Moderadamente Baja	Baja
MTZ-CAC-PR	64.67	17.33	18.00	FRANCO ARENOSA	Moderadamente Baja	Baja
DUR-CFR-PR	36.50	33.50	30.00	FRANCO ARCILLOSA	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-SN-SI	42.25	16.75	41.00	FRANCO	Baja	Baja
DUR-SN-MD	36.36	26.50	37.14	FRANCO ARCILLOSA	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-SN-PH	31.00	26.25	42.75	FRANCO ARCILLOSA	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-CL-MC	62.15	10.00	27.85	FRANCO ARCILLOSA ARENOSA	Medio	Moderadamente Baja
DUR-CL-MA	48.79	17.50	33.71	FRANCO ARCILLOSA ARENOSA	Medio	Baja
BNX-B-P	44.41	28.80	26.79	FRANCO ARCILLOSA	Ideal	Ideal

En el Cuadro 14 se registraron los valores por puntos de muestreo de la composición de arenas, limos y arcillas, la clase textural en la cual se clasifican y su relación con la respiración del suelo.

Las actividades biológicas ideales, medio y moderadamente baja, se distribuyen en todas las clases de textura registradas, sin embargo la clase textural FRANCO, definida como ideal, fue relacionada con respiración baja, por lo que la asociación con otros atributos físicos, explicará dicho fenómeno registrado.

### **8.5.3. Humedad**

Los diferentes tipos de suelos tienen distintas capacidades para la retención del agua, cuando en uno existe abundante agua y no se drena, las raíces de las plantas pueden morir por la carencia del oxígeno; por otra parte si poca agua está presente, el crecimiento de las plantas se detiene y finalmente sobreviene el marchitamiento.

Entre un suelo seco y uno saturado, existe una variación considerable de humedad; éste contenido se puede expresar en porcentaje respecto del suelo seco (USDA, 2012).

Los resultados muestran que el contenido de humedad está muy ligado al tipo de textura del suelo y al contenido de actividad biológica (Cuadro 15): en suelos con alto contenido de arcilla y de materia orgánica aumenta la retención total de agua, aunque también origina grandes cantidades de agua estrechamente retenidas por adhesión; en suelos de textura media tales como los francos pueden retener grandes cantidades de agua disponible, en estos el agua es retenida más suavemente, sin embargo en suelos arenosos se retiene muy poca agua total y es menor la cantidad de agua disponible (Cisneros, 2003).

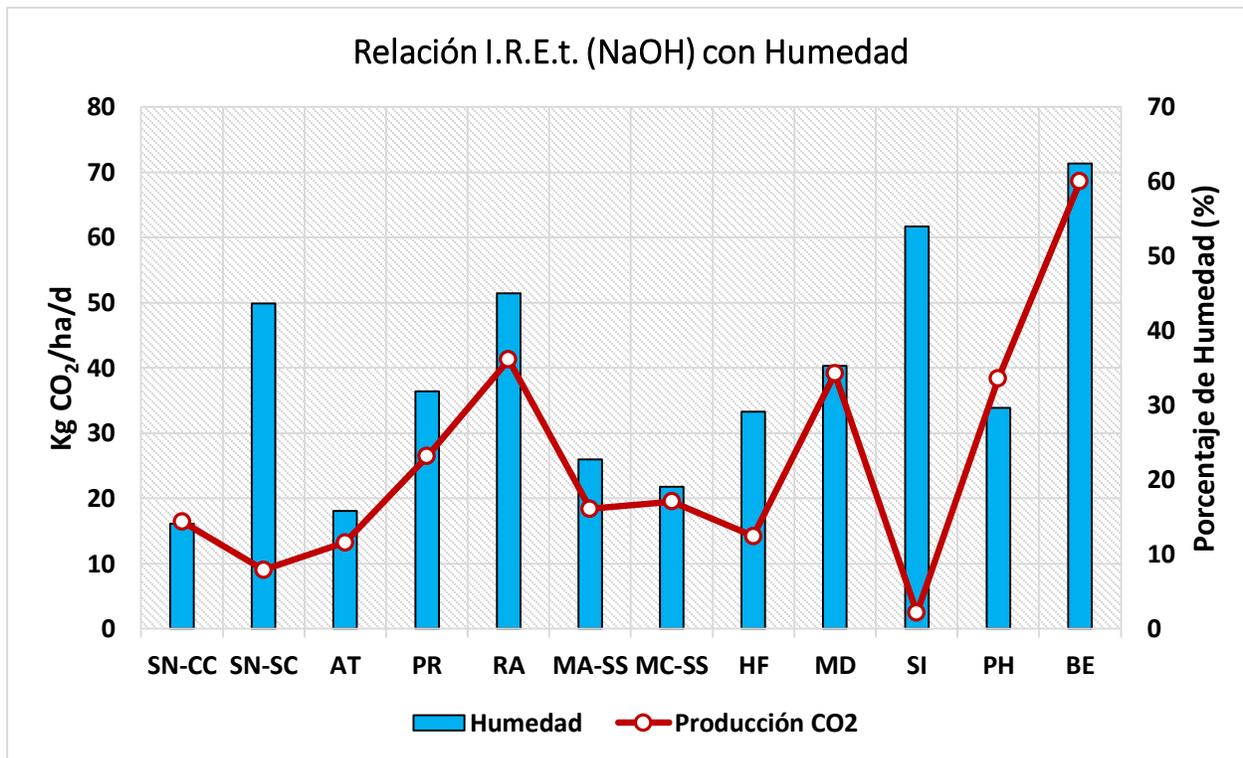


Gráfico 32. Relación del I.R.E.t. (NaOH) con la humedad del suelo de los agroecosistemas.

En el Gráfico 32 se muestran los resultados de la humedad del suelo, contrastados con el índice de respiración, en donde, se observa que los escenarios SN-CC, AT, MA-SS, MC-SS y HF obtuvieron porcentajes de humedad menores al 30%, por lo que la respiración resulta comprometida (Cuadro 15). Esto corrobora lo mencionado en el apartado anterior en relación a la actividad biológica medianamente baja a baja.

Para el escenario SN-SC cuyo I.R.E.t. fue bajo, el porcentaje de humedad fue de 43.61%, observándose un proceso de disminución de la actividad biológica, en cambio la zona SI con el segundo porcentaje de humedad más alto de 54%, resultó con la producción de CO<sub>2</sub> más baja, coincidiendo con la problemática del espacio poroso compactado y gran cantidad de humedad (Mogollón, *et al.*, 2010).

Para los casos PR, RA, MD y PH, la humedad se encuentra entre el 29% y 45%, que establecen actividades biológicas de medio a ideal, donde se observa que dicha actividad se acerca al desarrollo óptimo. El área testigo de bosque de encino, presentó la mayor humedad (62%), confirmando la relación textura – humedad – respiración de suelos (Luo y Zhou, 2006).

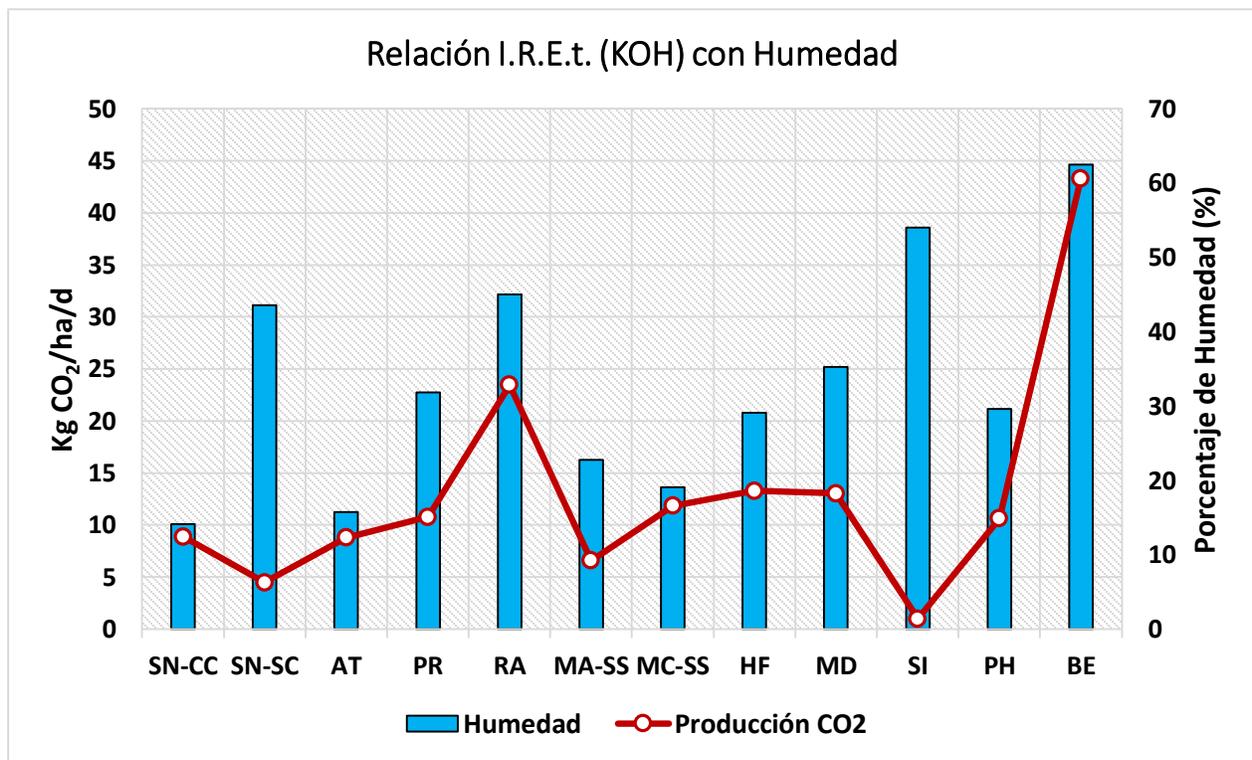


Gráfico 33. Relación del I.R.E.t. (KOH) con la humedad del suelo de los agroecosistemas.

El Gráfico 33 muestra la relación de la humedad con la respiración edáfica bajo el tratamiento de hidróxido de potasio, donde la dinámica registrada es similar al tratamiento con NaOH respecto al contenido de agua, exceptuando a la zona MD ya que ésta tuvo un valor menor.

<b>Cuadro 15. Interpretación de porcentajes de humedad con respecto a la actividad biológica</b>		
Porcentaje de humedad	Criterio	Actividad Biológica
> 30%	BAJO	La actividad microbiana generalmente disminuye o se detiene.
30 – 60%	MEDIO	La actividad microbiana se acerca al desarrollo óptima o comienza a disminuir.
60 – 80%	ÓPTIMO	La actividad microbiana se desarrolla de forma óptima.
80% <	ALTO	Suelo saturado. La respiración está restringido por las condiciones de humedad.

Barley, 1963; Domínguez y Aguilera, 1989; Muñoz *et al.*, 2013; & USDA, 2012.

<b>Cuadro 16. Humedad en los sitios evaluados</b>				
Escenarios	Humedad (%)		I.R.E.t. NaOH	I.R.E.t. KOH
	Valor	Criterio		
DX-HF-L	29.13	BAJO	Moderadamente Baja	Moderadamente Baja
P-B-SNCC	20.80	BAJO	Moderadamente Baja	Baja
P-B-SNSC	59.80	MEDIO	Baja	Baja
P-CAV-AT	16.89	BAJO	Moderadamente Baja	Baja
P-CMZ-AT	14.68	BAJO	Moderadamente Baja	Baja
P-CMZ-RA-1	14.24	BAJO	Medio	Medio
P-CMZ-RA-2	10.30	BAJO	Ideal	Medio
P-CMZ-SNCC	7.46	BAJO	Medio	Moderadamente Baja
P-CMZ-SNSC	27.42	BAJO	Moderadamente Baja	Baja
MTZ-CAC-PR	27.29	BAJO	Moderadamente Baja	Baja
DUR-CFR-PR	14.43	BAJO	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-SN-SI	25.00	BAJO	Baja	Baja
DUR-SN-MD	15.29	BAJO	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-SN-PH	15.65	BAJO	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-CL-MC	19.05	BAJO	Medio	Moderadamente Baja
DUR-CL-MA	22.74	BAJO	Medio	Baja
BNX-B-P	62.45	ÓPTIMO	Ideal	Ideal

El Cuadro 16 contiene los valores de humedad y la relación con la respiración del suelo en los dos tratamientos de cada punto de muestro, donde se observa que para la estimación de las respiración (NaOH) se encontraron humedades bajas; para el caso del punto P-B-SNSC, registró la mayor humedad de la zona de estudio (59.80%), con actividad baja, por lo que el análisis directo de cada punto de muestro, no permite observar la relación directa de los parámetros, es por ello que éstos fueron estandarizados y normalizados en los escenarios ecológicos presentes.

### **8.6. Propiedades químicas de los suelos**

El suelo es un sistema complejo formado por partículas sólidas orgánicas e inorgánicas, aire, agua y microorganismos. Estos elementos conocidos como fases, interactúan debido a la enorme cantidad de reacciones químicas que sufren, por ejemplo: aire y agua intemperizan las partículas sólidas, y los microorganismos se encargan de catalizar estas reacciones. La meteorización del material parental por efecto del agua determina en gran medida la composición química del suelo formado. Las sustancias químicas se lixivian en las capas inferiores del suelo donde se acumulan, mientras las sustancias insolubles o poco solubles se establecen en las capas superiores del suelo (Aguilera, 1989).

El aire presente en el suelo contiene también dióxido de carbono. Al combinarse con agua, ese gas puede formar un ácido débil (ácido carbónico) que reacciona con algunas de las sustancias químicas del suelo para formar nuevos compuestos. La química de los elementos implica, tanto el estudio del origen de las cargas en los coloides, como los fenómenos de adsorción y el equilibrio dinámico del suelo. Con base en la información sobre la composición, propiedades y reacciones químicas que ocurren en el suelo, se pueden aclarar problemas relacionados con la fertilidad y la nutrición vegetal. Los resultados de los análisis químicos permiten clasificar a los suelos en sus diferentes grupos y servir como base en la planificación del desarrollo agrícola, ganadero y forestal (Domínguez y Aguilera, 1989).

### 8.6.1. pH del Suelo

El pH determina muchas de las actividades químicas y biológicas que ocurren en el suelo y tiene una influencia indirecta en el desarrollo de las plantas; con la variación de este factor la disponibilidad de elementos minerales y orgánicos puede favorecerse; en medios ácidos es necesario la adición de naturaleza alcalina para mejorar la disponibilidad de los nutrientes. El pH del suelo está determinado por el material parental, la naturaleza química de la lluvia, las prácticas de manejo del suelo y las actividades de las plantas, animales y microorganismos (Muñoz *et al.*, 2013; & Luo y Zhou, 2006).

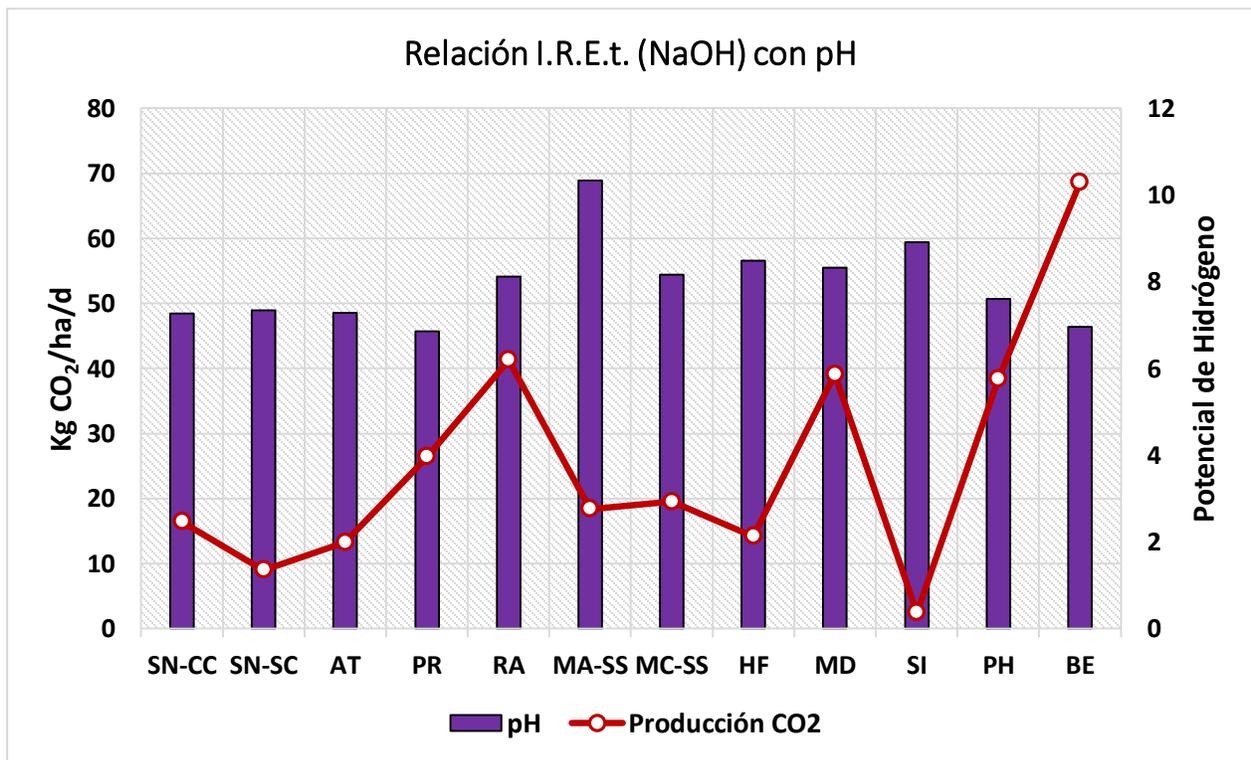


Gráfico 34. Relación del I.R.E.t. (NaOH) con el pH del suelo de los agroecosistemas.

En el Gráfico 34 se observa el índice de respiración junto con los resultados de pH de las unidades de cultivo, con un promedio generalizado de 7.97, clasificado como moderadamente alcalino (Cuadro 17).

Los escenarios con actividad ideal de respiración y pH son: RA (8.12), MD (8.32), clasificados como moderadamente alcalinos, donde la actividad de los hongos se ve restringida, pero el desarrollo de bacterias es óptimo, por ello que la respiración se produce de forma estable (Glinski y Lipiec, 1990).

El pastizal halófito (PH) presentó un potencial de hidrógeno fue de 7.60, (ligeramente alcalino), condición en la que de igual forma se generan colonias bacterianas aunque las comunidades de hongos se encuentran en un medio hostil para su desarrollo. El caso de BE (6.97) es considerado neutro, donde la producción de CO<sub>2</sub> aumenta en un medio de bosque cuando este posee valores de pH entre 6.5 a 7, sin embargo si pasa ese nivel, la respiración disminuye (Kowalenko *et al.*, 1978).

En caso contrario las áreas evaluadas que obtuvieron pH con baja actividad biológica fueron SN-SS (7.33) ligeramente alcalino, siendo de naturaleza salina, ya que en este tipo de medios la emisión de CO<sub>2</sub> disminuye en alrededor del 18% al pasar de un medio neutro a uno alcalino (Xu y Qi, 2001), y SI (8.91) denominado alcalino fuerte, que a pesar de presentar un medio para bacterias, la saturación de agua y compactación continúan impidiendo el desarrollo de la respiración edáfica.

El ecosistema natural MA-SS registró el mayor valor de pH de 10.33 (Alcalino muy fuerte) que también pertenece a suelos salinos, donde aparentemente no existe actividad de microorganismos, sin embargo la presencia del sistema vegetal (Mezquite) permite acidificar la rizósfera disminuyéndola hasta en dos unidades de pH debido a la liberación de ácidos orgánicos en los exudados y mayor absorción de la raíz de cationes que aniones, lo que lleva a la raíz liberar iones H<sup>+</sup> (Glinski y Lipiec, 1990), teniendo así una actividad biológica de suelo registrada como media en el presente estudio. Estas mismas relaciones son observables para el tratamiento de hidróxido de potasio en el Gráfico 35.

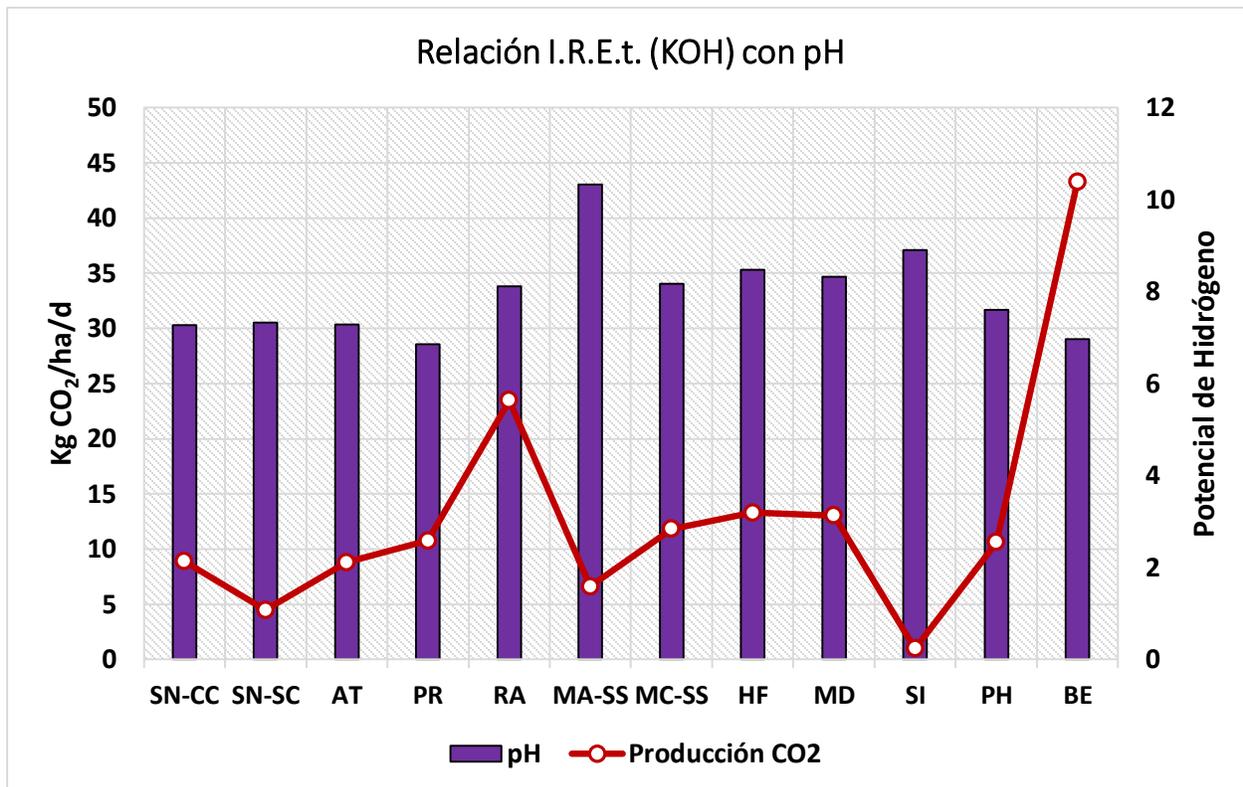


Gráfico 35. Relación del I.R.E.t. (KOH) con el pH del suelo de los agroecosistemas.

Rango de pH	Criterio	Actividad Biológica	
< 3.5	Ultra ácido	Sin actividad aparente	Sin actividad aparente
3.5–4.4	Ácido extremo	La mayoría de las especies bacterianas crecen dentro de este rango.	Los hongos se desarrollan dentro de este rango
4.5–5.0	Ácido muy fuerte		
5.1–5.5	Ácido fuerte		
5.6–6.0	Moderadamente ácido		Actividad altamente disminuida en hongos
6.1–6.5	Ligeramente ácido		Actividad restringida en Hongos
6.6–7.3	Neutro		
7.4–7.8	Ligeramente alcalino		
7.9–8.4	Moderadamente alcalino		
8.5–9.0	Alcalino fuerte		
> 9.0	Alcalino muy fuerte	Sin actividad aparente	Sin actividad aparente

Luo y Zhou, 2006; USDA; 1986.

<b>Cuadro 18. pH e I.R.E.t. en cada sitio</b>				
<b>Escenarios</b>	<b>pH</b>		<b>I.R.E.t. NaOH</b>	<b>I.R.E.t. KOH</b>
	<b>Valor</b>	<b>Criterio</b>		
DX-HF-L	8.48	MODERADAMENTE ALCALINO	Moderadamente Baja	Moderadamente Baja
P-B-SNCC	6.36	LIGERAMENTE ÁCIDO	Moderadamente Baja	Baja
P-B-SNSC	6.33	LIGERAMENTE ÁCIDO	Baja	Baja
P-CAV-AT	6.31	LIGERAMENTE ÁCIDO	Moderadamente Baja	Baja
P-CMZ-AT	8.26	MODERADAMENTE ALCALINO	Moderadamente Baja	Baja
P-CMZ-RA-1	8.13	MODERADAMENTE ALCALINO	Medio	Medio
P-CMZ-RA-2	8.11	MODERADAMENTE ALCALINO	Ideal	Medio
P-CMZ-SNCC	8.19	MODERADAMENTE ALCALINO	Medio	Moderadamente Baja
P-CMZ-SNSC	8.34	MODERADAMENTE ALCALINO	Moderadamente Baja	Baja
MTZ-CAC-PR	6.23	LIGERAMENTE ÁCIDO	Moderadamente Baja	Baja
DUR-CFR-PR	7.49	LIGERAMENTE ALCALINO	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-SN-SI	8.91	ALCALINO FUERTE	Baja	Baja
DUR-SN-MD	8.32	MODERADAMENTE ALCALINO	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-SN-PH	7.60	LIGERAMENTE ALCALINO	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-CL-MC	8.17	MODERADAMENTE ALCALINO	Medio	Moderadamente Baja
DUR-CL-MA	10.33	MUY FUERTEMENTE ALCALINO	Medio	Baja
BNX-B-P	6.97	NEUTRO	Ideal	Ideal

En el Cuadro 18 se registraron los valores y criterios del potencial de hidrógeno de cada agroecosistema con la integración de la calidad del suelo con base en la respiración del suelo. La zona testigo registró una condición ideal, relacionada con el pH neutro, demostrando que el bosque en el Banxú, es un sistema ecológicamente estable y dinámico, que conforme a los parámetros medidos, se infiere una buena salud de sus suelos. En cambio los suelos del área de estudio, la mayoría son de naturaleza alcalina, siendo éstas las regiones Dexthí-San Juanico, 5 puntos de La Palma-San Juanico y todas las áreas de El Durazno, lo que impide el óptimo desarrollo de organismos fúngicos, pero con presencia de especies bacterianas (Kowalenko *et al.*, 1978).

En cambio se registraron 4 áreas con pH ligeramente alcalino, P-B-SNCC, P-B-SNSC, P-CAV-AT, las dos primeras son suelos naturales en el área de barranca con fuerte presencia de costras microbióticas, éste tipo de comunidades modifican el medio en el que se desarrollan y el pH debe ser un elemento constante para su reproducción, como lo reporta Núñez (2013) para zonas semiáridas; el tercer sitio se encuentra geográficamente asociado a la barranca, por lo que las características de potencial de Hidrogeno son similares en los sitios.

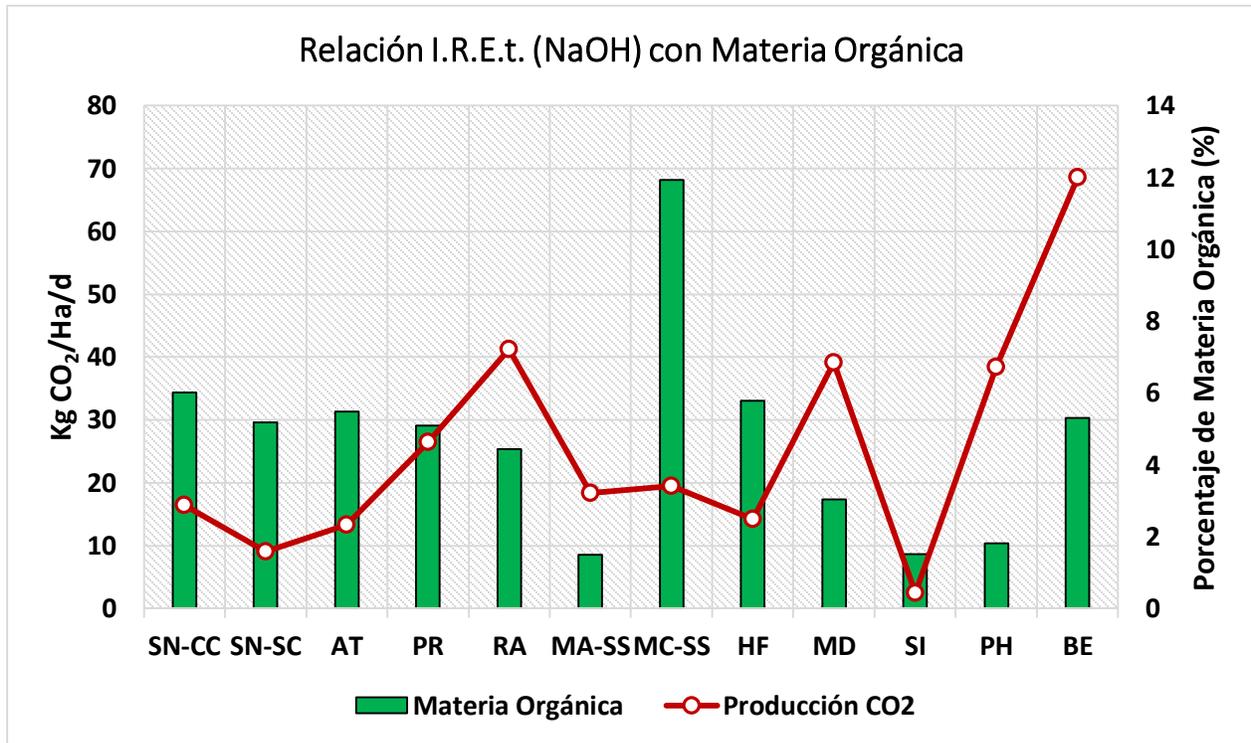
El punto de muestreo MTZ-CAC-PR conocido como Barrio los Martínez, son cultivos de acelgas cuya producción está regulada por el uso de fertilizantes químicos y riego constante, como consecuencia el pH de la zona se torna ligeramente ácido.

### **8.6.2. Materia orgánica del suelo**

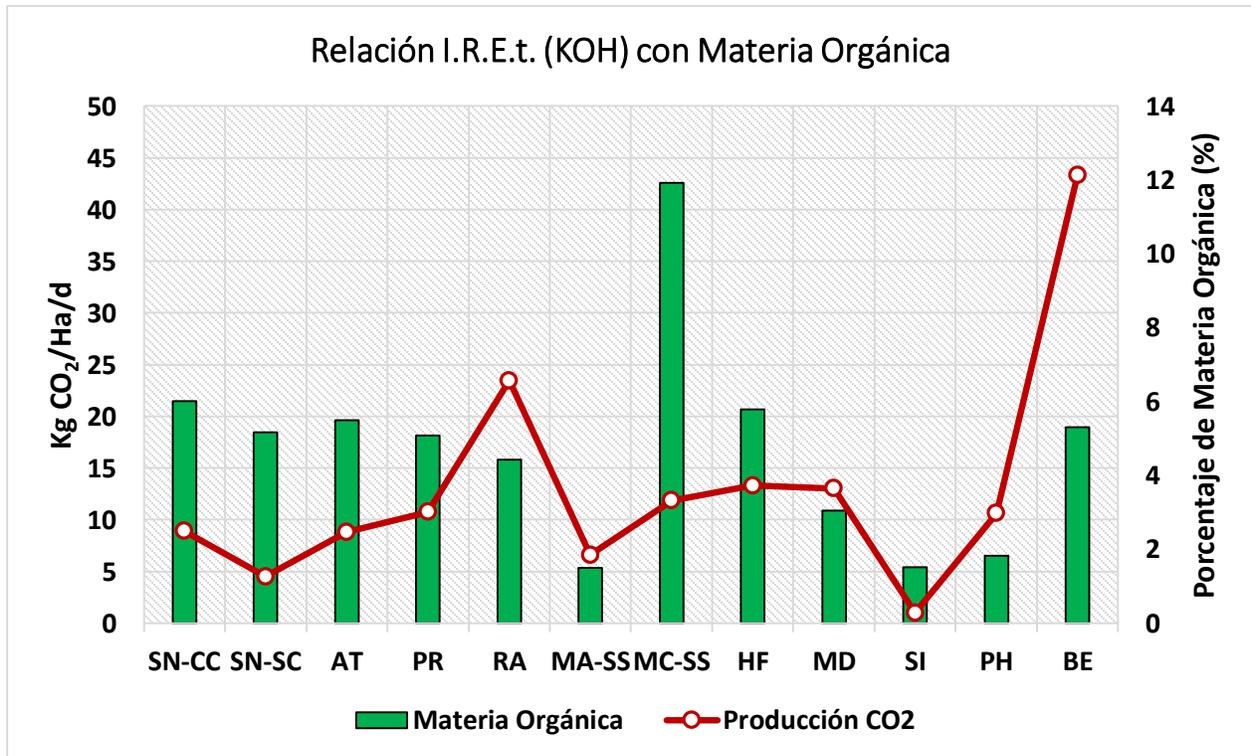
Se define como la fracción orgánica del suelo y por lo general no incluye las raíces de las plantas, o residuos animales y vegetales en proceso de descomposición en el suelo. Este parámetro suministra nutrientes para el crecimiento de las plantas, contribuye a la capacidad de intercambio catiónico para el mantenimiento de la fertilidad y mejora la estructura del mismo. Recientes investigaciones intentan explicar el potencial del suelo para contener carbono en forma de materia orgánica (Cotler, 2003).

La materia orgánica del suelo varía por distintos factores, siendo determinantes la humedad y la temperatura, además de la entrada de biomasa al sistema edáfico y la expulsión de CO<sub>2</sub> por respiración. Está compuesto en su mayoría por sustancias húmicas (80%), formadas por reacciones secundarias del metabolismo de microorganismos; el 20% restante lo integran las sustancias no húmicas cuya entrada son los residuos orgánicos no reconocibles de plantas y animales.

Dicho parámetro es un importante contribuyente de nitrógeno, fósforo y azufre, así como de otros nutrientes para el desarrollo microbiano del suelo y es la principal fuente de carbono para la actividad metabólica, que a su vez determina el flujo de nutrientes en el sistema edáfico (Kirschbaum, 1995).



**Gráfico 36.** Relación del I.R.E.t. (NaOH) con la materia orgánica del suelo de los agroecosistemas.



**Gráfico 37.** Relación del I.R.E.t. (KOH) con la materia orgánica del suelo de los agroecosistemas.

Los Gráficos 36 y 37, registran los resultados normalizados de las unidades de cultivo y ecosistemas naturales, respecto al contenido de la materia orgánica observándose dinámicas similares en ambos tratamientos; el área de estudio fue valorada en función al contenido de MO y se catalogó de moderadamente rico a rico, donde teóricamente la actividad biológica del sistema correspondería a un desarrollo óptimo (Cuadro 19), sin embargo la disponibilidad de Carbono por parte de este parámetro está determinado por la acción de los otros atributos del suelo, principalmente el contenido de humedad, es por ello que la respiración ha sido disminuida (Whitbread, 1995).

Las zona con menor contenido de materia orgánica registrada es MA-SS (1.50%), que es la zona de mezquital abierto en suelos salinos, que espacialmente está cercana a las zonas de cultivo de lechuguilla y riego constante, por lo que el arrastre del material orgánico es constante y no permite su completa adición al suelo. En contraste el escenario que produjo mayor materia orgánica es MC-SS (11.93%), que de igual forma es un área asociada al cultivo de lechuguilla y al mezquital abierto; la principal diferencia radica en que es un sistema de mezquital cerrado, que debido a la cercanía de los organismos dominantes, no permite el desarrollo de otras especies de plantas, y el constante aporte de ramas y hojarasca de mezquite, deja al sistema saturado de estos desechos y por ende la acumulación de materia orgánica. Y aunque la producción de CO<sub>2</sub> es de media actividad, debido a que los atributos físicos y químicos del lugar no permiten ese desarrollo óptimo del proceso, el gas generado es procesado directamente por las especies vegetales presentes (Witkamp, 1996).

En el caso de mezquite desmontado (MD), tuvo un contenido del 3.04% de materia orgánica, incluso sigue clasificándose como suelo rico, sin embargo el potencial de la zona es diferente, por lo que la respiración del suelo disminuye después de la tala de vegetación nativa para su posterior cultivo y cosecha. Estas prácticas reducen del 31% al 60% del contenido de materia orgánica, en especial componentes de carbono, dependiendo de la técnica usada como es la tala desmesurada, perforación directa o labranza (Parton *et al.*, 1987).

La zona de bosque (BE) no presentó la mayor producción de materia orgánica (5.3%), pero es un medio rico en este atributo, que permite tener la actividad óptima para que se genere la respiración edáfica.

Valor (%)	Categoría	Actividad Biológica
< 0.6	Extremadamente Pobre	Sin actividad aparente
0.6 – 1.2	Pobre	Muy Baja
1.3 – 1.8	Moderadamente Pobre	Moderadamente Baja
1.9 – 2.4	Medio	Actividad Media
2.5 – 5.0	Moderadamente Rico	Óptimo desarrollo de la actividad
5.1 – 14.0	Rico	
> 14.0	Extremadamente Rico	Actividad Inusual

Muñoz *et al.*, 2013; Whitbread, 1995.

Escenarios	Materia Orgánica		I.R.E.t. NaOH	I.R.E.t. KOH
	Valor	Criterio		
DX-HF-L	5.78	RICO	Moderadamente Baja	Moderadamente Baja
P-B-SNCC	9.34	RICO	Moderadamente Baja	Baja
P-B-SNSC	7.87	RICO	Baja	Baja
P-CAV-AT	8.27	RICO	Moderadamente Baja	Baja
P-CMZ-AT	2.70	MODERADAMENTE RICO	Moderadamente Baja	Baja
P-CMZ-RA-1	2.20	MEDIO	Medio	Medio
P-CMZ-RA-2	2.67	MODERADAMENTE RICO	Ideal	Medio
P-CMZ-SNCC	2.69	MODERADAMENTE RICO	Medio	Moderadamente Baja
P-CMZ-SNSC	2.48	MEDIO	Moderadamente Baja	Baja
MTZ-CAC-PR	7.97	RICO	Moderadamente Baja	Baja
DUR-CFR-PR	2.19	MEDIO	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-SN-SI	2.50	MODERADAMENTE RICO	Baja	Baja
DUR-SN-MD	3.04	MODERADAMENTE RICO	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-SN-PH	1.82	MODERADAMENTE POBRE	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-CL-MC	11.93	EXTREMADAMENTE RICO	Medio	Moderadamente Baja
DUR-CL-MA	1.50	MODERADAMENTE POBRE	Medio	Baja
BNX-B-P	3.00	MODERADAMENTE RICO	Ideal	Ideal

El Cuadro 20 contiene los valores registrados en materia orgánica de cada punto de muestreo; los criterios de evaluación caracterizan a la zona como suelos moderadamente ricos y ricos de MO, sin embargo al relacionarlos con los estándares de respiración de suelo, principalmente del tratamiento de hidróxido de sodio, se observan relaciones aparentemente no directas entre los atributos, como el caso de DUR-SN-PH, donde a pesar de registrar el valor mínimo de MO, siendo moderadamente pobre, de igual manera generó uno de los más altos índices de respiración, cuya actividad biológica fue ideal.

Por lo que la presente investigación, generó dos modelos de relación multivariante para conocer la asociación entre la respiración edáfica y los parámetros físicos y químicos (véase apartado 8.7.).

### 8.6.3 Nitrógeno del Suelo

El nitrógeno es uno de los elementos principales para los organismos, es esencial para el desarrollo de las plantas, ya que estimula el crecimiento por encima del suelo, y contribuye al color brillante verde característico de plantas saludables. Aunque el nitrógeno molecular ( $N_2$ ) compone el 78% de la atmósfera, ésta forma de no puede usarse por los animales ni por la mayoría de las plantas en la fabricación de aminoácidos y proteínas esenciales, este elemento molecular debe ser fijado (combinado con oxígeno o hidrógeno) para formar compuestos tales como amoníaco ( $NH_3$ ) o nitrato ( $NO_3^-$ ) u otra forma orgánica de nitrógeno (Aguilera, 1989).

Parte de la fijación del nitrógeno ocurre por las algas verde-azules sin embargo, la mayor parte de la fijación se lleva a cabo por bacterias que se desarrollan en el ambiente edáfico. Diversas especies de bacterias fijadoras de nitrógeno viven libres en el suelo y otras especies son simbiotes al interior de los nódulos de las raíces de las legumbres (la soya, o soja, el maní, las habichuelas, el trébol, la alfalfa). La descomposición de materiales en el suelo de los bosques, también, constituye una fuente de nitrógeno porque el amoníaco o el amonio ( $NH_4^+$ ) se produce en el proceso de descomposición (Ibarra, 2010).

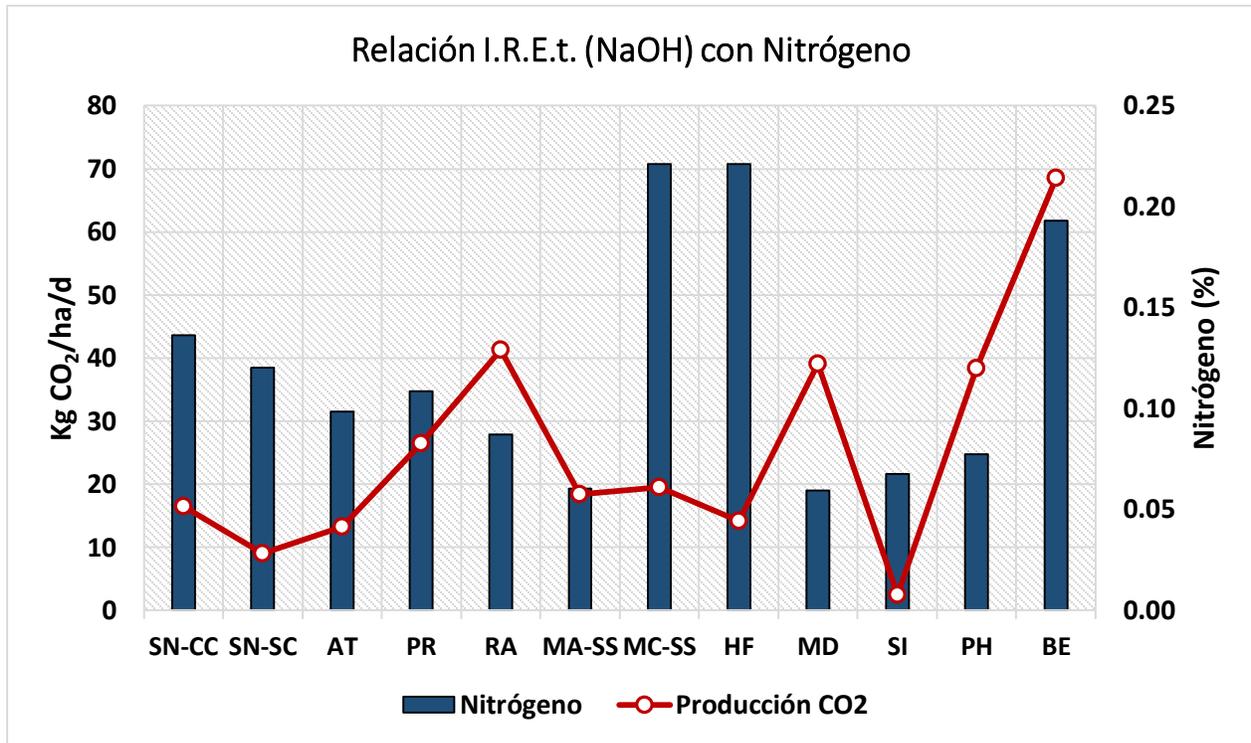


Gráfico 38. Relación del I.R.E.t. (NaOH) con el nitrógeno del suelo de los agroecosistemas.

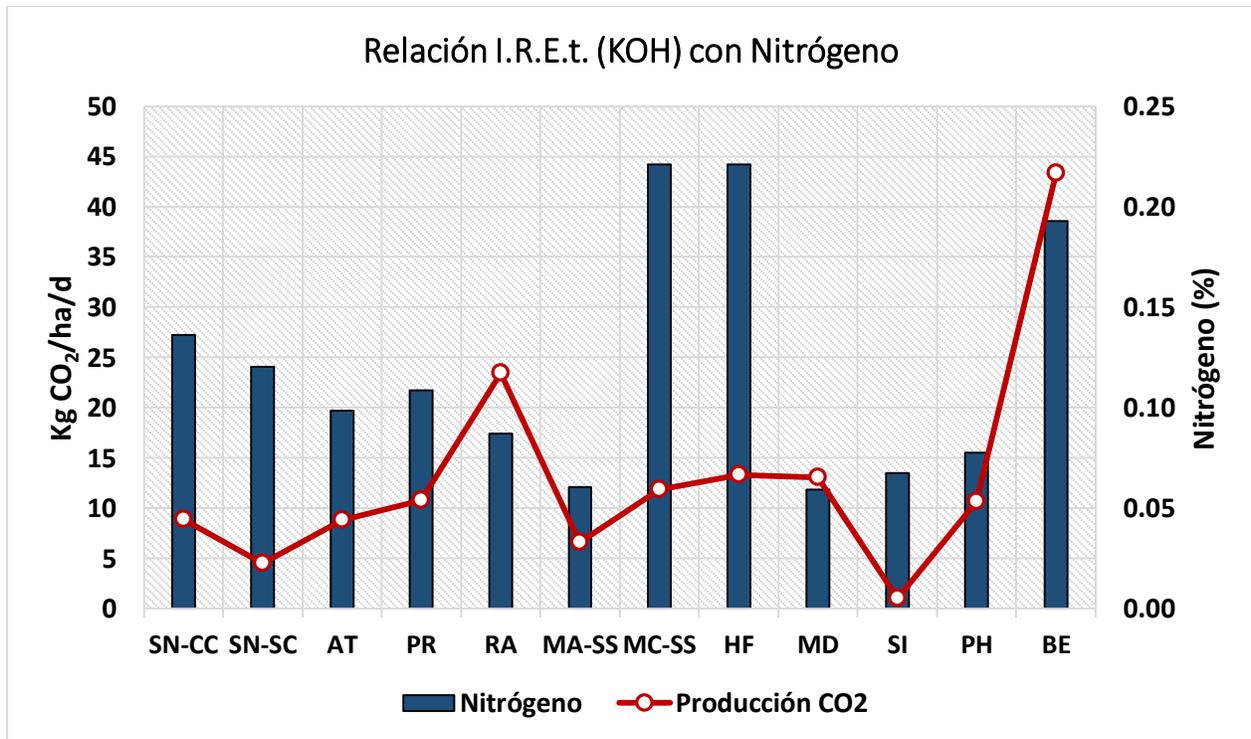


Gráfico 39. Relación del I.R.E.t. (KOH) con el nitrógeno del suelo de los agroecosistemas.

Los Gráficos 38 y 39 muestran la relación entre los índices de respiración de los escenarios y el contenido de nitrógeno. La respiración edáfica genera energía que las plantas aprovechan para la absorción y asimilación de nitrógeno por medio de las raíces, esto es que dichos organismos para poder procesar una unidad de  $\text{NO}_3^-$ , requieren de dos unidades de  $\text{CO}_2$  para llevarlo a cabo (generalizado 1:2); este comportamiento es visto en sistemas dinámicos estables de bosque (Bouma *et al.*, 1996). Este proceso se puede observar en área blanca (BE), cuyo I.R.E.t. es ideal y el contenido de nitrógeno (0.193) es definido como Rico (Cuadro 21), observando una relación positiva directa entre ambos parámetros.

El pastizal halófito (PH), tuvo un proceso similar cuyo índice de respiración es ideal, aunque la disponibilidad de nitrógeno sea moderadamente pobre, la generación del gas continúa gracias a la actividad de otros microorganismos.

Los escenarios de riego auxiliar (RA) y mezquital desmontado (MD), obtuvieron registros de nitrógeno medianamente pobre y pobre respectivamente, sin embargo el índice de respiración en ambos casos es ideal, explicándose este fenómeno por la disponibilidad de humedad en los escenarios, que resulta ser mayor al 30%, propiciando el desarrollo de las colonias bacterianas y fúngicas.

Se registraron dos casos extraordinarios de disponibilidad de nitrógeno, el mezquital cerrado MC-SS con 0.220 N, y los huertos familiares HF con 0.221 N interpretados como extremadamente ricos cuya relación biológica es inusual para el sistema; sin embargo la respiración observada fue media y moderadamente baja respectivamente; donde el alto contenido de nitrógeno se asocia generalmente con altas tasas de crecimiento, que supondría altos índices de respiración; sin embargo el poco contenido de humedad (ambos menores al 30%), propicio que la actividad biológica resultara altamente disminuida (Burton *et al.*, 2000).

Los altos niveles de nitrógeno se deben para el mezquital cerrado, a la acumulación constante de hojarasca y ramas y la fijación del mismo por *P. laevigata* (Rodríguez *et al.*, 2014); para el caso de los huertos familiares, la fertilización natural por compostaje artesanal promueve la acumulación del elemento.

Valor (%)	Categoría	Actividad Biológica
< 0.032	Extremadamente Pobre	Sin actividad aparente
0.032 – 0.063	Pobre	Muy Baja
0.064 – 0.095	Moderadamente Pobre	Moderadamente Baja
0.096 – 0.126	Medio	Actividad Media
0.127 – 0.158	Moderadamente Rico	Óptimo desarrollo de la actividad
0.159 – 0.221	Rico	
> 0.221	Extremadamente Rico	Actividad Inusual

Muñoz *et al.*, 2013; Whitbread, 1995.

Escenarios	Nitrógeno		I.R.E.t. NaOH	I.R.E.t. KOH
	Valor	Criterio		
DX-HF-L	0.437	RICO	Moderadamente Baja	Moderadamente Baja
P-B-SNCC	0.167	MEDIANAMENTE RICO	Moderadamente Baja	Baja
P-B-SNSC	0.137	MEDIANAMENTE RICO	Baja	Baja
P-CAV-AT	0.132	MEDIANAMENTE RICO	Moderadamente Baja	Baja
P-CMZ-AT	0.065	MEDIANAMENTE POBRE	Moderadamente Baja	Baja
P-CMZ-RA-1	0.063	MEDIANAMENTE POBRE	Medio	Medio
P-CMZ-RA-2	0.111	MEDIO	Ideal	Medio
P-CMZ-SNCC	0.105	MEDIO	Medio	Moderadamente Baja
P-CMZ-SNSC	0.104	MEDIO	Moderadamente Baja	Baja
MTZ-CAC-PR	0.157	MEDIANAMENTE RICO	Moderadamente Baja	Baja
DUR-CFR-PR	0.060	MEDIANAMENTE POBRE	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-SN-SI	0.068	MEDIANAMENTE POBRE	Baja	Baja
DUR-SN-MD	0.059	POBRE	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-SN-PH	0.078	MEDIANAMENTE POBRE	Ideal	Moderadamente Baja
DUR-CL-MC	0.476	POBRE	Medio	Moderadamente Baja
DUR-CL-MA	0.060	MEDIANAMENTE POBRE	Medio	Baja
BNX-B-P	0.057	POBRE	Ideal	Ideal

El Cuadro 22 contiene los valores por punto de muestreo del contenido de nitrógeno y la respiración del suelo. Los escenarios de respiración ideal (P-CMZ-RA-2, DUR-CFR-PR, DUR-SN-MD, DUR-SN-PH), están directamente relacionados a contenidos de nitrógeno medianamente pobre y pobre, lo que se interpreta como (con base en la humedad) como que la baja disponibilidad del elemento determina la continua generación de CO<sub>2</sub> de acuerdo con Bouma y sus colaboradores (1996), que indican que el consumo de unidades de nitrógeno requiere alrededor de dos unidades de CO<sub>2</sub>.

Las zonas asociadas a suelos naturales y presencia de costra muestran los contenidos mayores de nitrógeno (P-B-SNCC, P-B-SNSC y P-CAV-AT), de igual forma que las unidades de cultivo con constante riego y aporte de fertilizantes (DX-HF-L y MTZ-CAC-PR).

### **8.7. Relación respiración del suelo–propiedades físicas y químicas**

La relación entre la respiración edáfica diaria y los propiedades físicas y químicas del suelo, se llevaron a cabo a través de un análisis de correlación paramétrico (Pearson) y un análisis multivariante de agrupación por medio de clúster y su representación en dendogramas (Gómez, 2011), utilizando el software de estadística IBM SPSS Statistics 21.

El análisis de conglomerados es una técnica multivariante que permite agrupar los atributos del suelo o las zonas estudiadas, en función a la similaridad existente entre ellos. Como técnica de agrupación de variables, es parecido al análisis factorial, sin embargo la aglomeración es menos restrictiva en sus supuestos ya que no exige linealidad, ni simetría, permite variables categóricas y admite diversos métodos de estimación de la matriz de distancias.

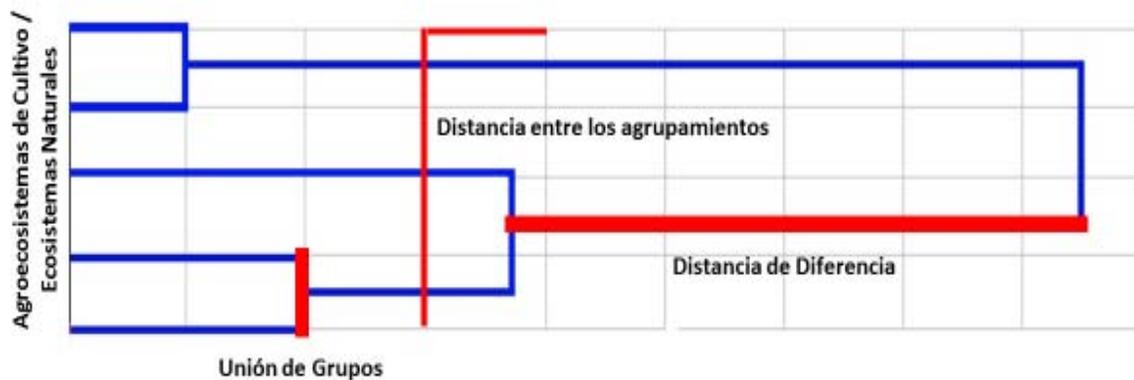
Como técnica de agrupación de casos, permite detectar el número óptimo de grupos y su composición, únicamente a partir de las similitudes existente entre ellos y no asume ninguna distribución específica para las variables (De la Fuente, 2011).

Para la presente investigación se utilizó el Algoritmo Jerárquico, donde la agrupación se realiza en un proceso de fases sucesivas de aglomeración o desagregación, teniendo como resultado una jerarquía de unión completa en el que cada grupo formado es unido o disociado en una sola fase, tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los

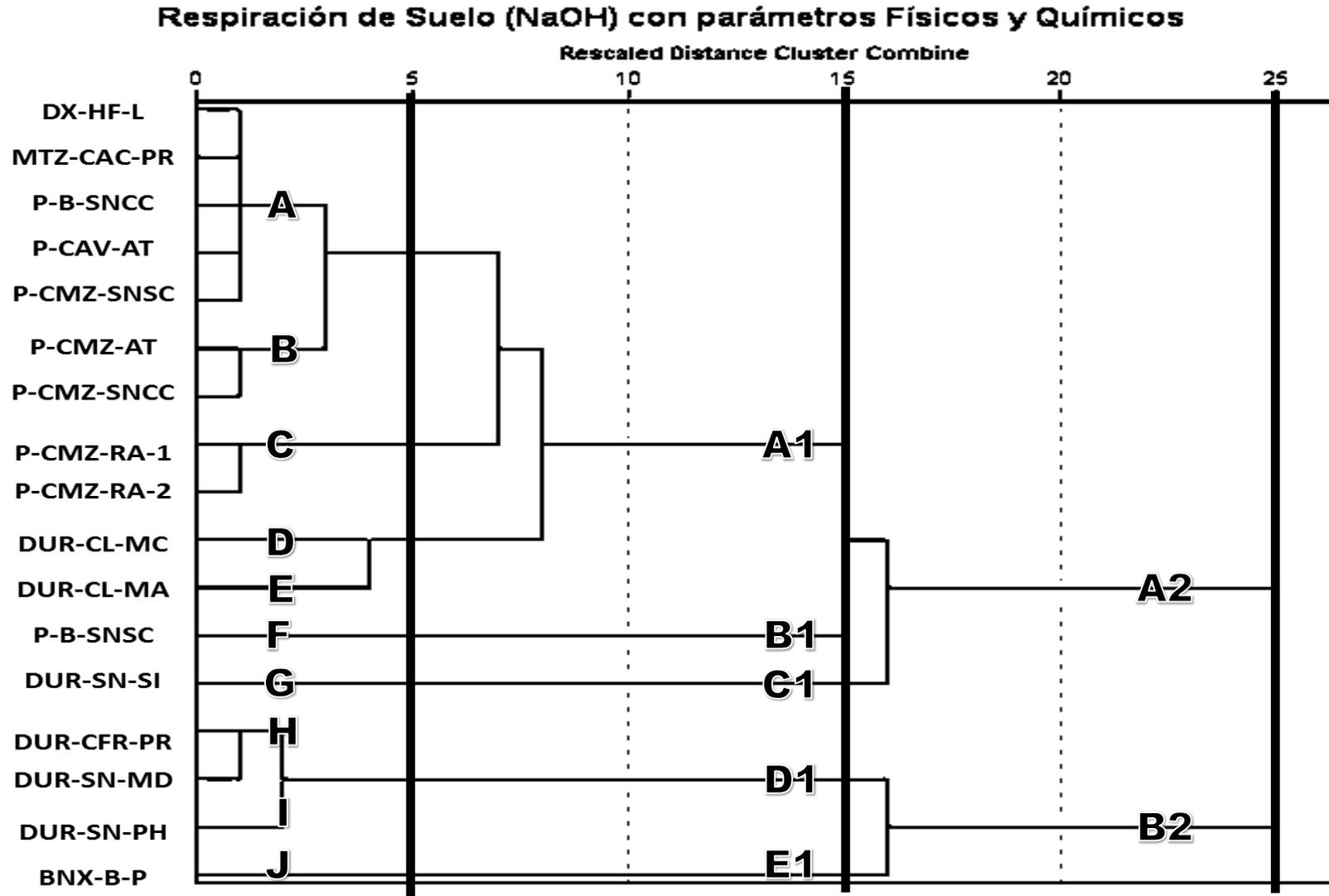
grupos (Mahía, 2008). La decisión sobre el número óptimo de clústers para las evaluaciones del suelo, se basó de acuerdo con Mahía (2008), en la distancia determinada (euclidiana al cuadrado) a la que se producían las fusiones de los grupos y la adecuación conforme a los agroecosistemas de cultivo y ecosistemas naturales.

Por ello se establecieron tres principales divisiones a las distancias 5, 15 y 25 que presentaron los puntos críticos de fusión y de organización de conglomerados; la lectura del gráfico (Figura 19) se realiza de izquierda a derecha, y en su interior se conforma por líneas horizontales y verticales, utilizando estas últimas para indicar el punto de unión entre dos agroecosistemas.

Así la posición de la línea vertical respecto a la regla situada en la parte superior indica la distancia donde se han realizado la unión de dos grupos, de modo que cuanto más en dirección a la derecha se produzca una agrupación existirá más diferencia entre los casos, formando grupos más heterogéneos.



**Figura 19.** Estructura generalizada del Dendograma por Conglomerados Jerárquicos.



**Gráfico 40.** Análisis de clúster de la Respiración de Suelo (NaOH) y los parámetros Físicos y Químicos.

### 8.7.1. División de los Sitios Investigados

Conforme a lo establecido anteriormente, el Gráfico 40 contiene el análisis multivariado de los puntos de muestreo que integraron las variables evaluadas del suelo que son para este caso, el tratamiento de respiración edáfica con hidróxido de sodio, relacionados directamente con los atributos de textura, humedad, pH, materia orgánica y nitrógeno. Con el objetivo de establecer las relaciones ambientales de los agroecosistemas y conjuntarlos en grupos que representan atributos de suelo similares.

A cada clúster formado, se le asignó una letra del abecedario y conforme se alejaban en similitud y distancia se adicionó un número a la categoría para designar el corte. Tomando en consideración, el primero de los cortes (distancia 5) representará las similitudes por atributos ambientales entre las unidades de cultivo, por lo que su asociación obedecerá a los puntos de muestreo; el segundo corte de distancia 15 se conformará de una aglomeración de mayor escala, por lo que se considera una agrupación de dinámica del medio y el último corte 25, representa en total el comportamiento de la zona de estudio y su relación con otro medio como es el Bosque Banxú.

Se observa que el primer corte a la distancia cinco, con una agrupación que va de arriba hacia abajo, se forman 10 clústers de manera directa y dos grandes que integran a los primeros tres, pero conforme a la elección óptima de los clústers solo se tomarán los de corte directo (Mahía, 2008).

- Grupo A: Es integrado por los sitios **DX-HF-L**, **MTZ-CAC-PR**, **P-B-SNCC**, **P-CAV-AT** y **P-CMZ-SNSC**; dichas zonas son asociadas a suelos poco impactados y con un buen manejo de tierras en caso de los cultivos, geográficamente se encuentran en las porciones norte y centro del área estudiada; cuyo riego es óptimo y en las zonas de temporal, la humedad es mayor al 30%. La asociación de producción de CO<sub>2</sub> y atributos de suelos en cada sistema, los conjuntó como los mejores suelos agrícolas de la zona.
- Grupo B: **P-CMZ-AT** y **P-CMZ-SNCC**, se encuentran muy relacionadas debido a la presencia del cultivo de maíz y por posición geográfica, por lo tanto las características evaluadas son altamente similares.

- Grupo C: **P-CMZ-RA-1** y **P-CMZ-RA-2**, dentro de ésta aglomeración se da la primera división importante entre las asociaciones, siendo la variable de humedad determinante para ello, ya que las zonas siguientes presentan porcentajes bajos de humedad en las unidades de estudio. En el caso de éstas, que a pesar de ser cultivos de maíz como la mayoría de los grupos anteriores, el riego es auxiliar basado en colección de agua almacenada por largos periodos de tiempo (López, 1997).
- Grupo D: **DUR-CL-MC** éste clúster junto con el grupo E, son los suelos encontrados en las áreas del mezquital, dicho especie promueve islas de fertilidad que determinan suelos con buena cantidad de materia orgánica (Montaño *et al.*, 2007), además representan el ecosistema natural de la especie dominante de mezquite.
- Grupo E: **DUR-CL-MA** punto asociado al clúster anterior tanto por vegetación dominante y características edáficas, la principal razón que se encuentran en grupos diferentes es la condición de mezquital abierto, además que es una zona que presenta impacto antrópico por lo que las condiciones ambientales están comprometidas.
- Grupo F: **P-B-SNSC**, ésta unidad presenta características edáficas similares al grupo A, pero la actividad biológica fue determinante para éste caso, por lo que ahora se le da una asociación directa a los suelos inundados del siguiente grupo; se infiere que la falta de costras microbióticas repercute en la respiración del suelo. Dentro de éste clúster se da la gran división de grupos a causa de la actividad biológica.
- Grupo G: **DUR-SN-SI**, resultó con la actividad biológica más baja del área de estudio y representa la primera zona de suelos con alto contenido de sales, por lo que fue directamente relacionado con los grupos posteriores. Para ésta evaluación, dicho clúster se separa aún más de todos los grupos incluido F, siendo la unidad que registró la menor respiración y bajos atributos del suelo, considerándose un agroecosistema no apto para la producción agrícola.

- Grupo H: **DUR-CFR-PR** y **DUR-SN-MD**, dichas unidades están asociadas geográficamente a la zona anterior, por lo que el aporte de humedad es constante. La primera es un cultivo de frijol con buen manejo de tierra y el segundo un mezquite en desmonte para condicionarlo a suelos agrícolas, siendo las características ambientales entre ambos muy asociadas.
- Grupo I: **DUR-SN-PH**, coincidiendo en localización con los grupos G y H, ésta zona de pastizales asociada a suelos naturales (posee gran cantidad de sales), se diferencia pues no ha sido impactada por actividades agrícolas, sin embargo al estar relacionado con la carretera y caminos rurales, las condiciones se vuelven particulares para el grupo. A una distancia de clústers mayor ésta unidad se conjunta con H; la localización geográfica de ambos grupos les confiere parámetros ambientales similares, siendo que la presencia de las especies vegetales modifica dichos atributos.
- Grupo J: **BNX-B-P**, el grupo que fue utilizado como blanco, representó la mayor división en todos los clúster, es el área con mejores condiciones ambientales y por ende no fue relacionado directamente con las zonas áridas estudiadas. Posee similitudes con los grupos H e I en las humedades registradas; sin embargo lo que lo diferencia de todas las unidades, es la alta actividad biológica que registró. La actividad biológica del bosque lo separa como un grupo único, aunque los atributos edáficos lo agrupan junto a la mayoría de los suelos de El Durazno formando clúster cuya similitud es distante.

Para la distancia 15, se agrega un nuevo clúster siendo concretamente el grupo C1:

- Grupo A1: Conformada por **A, B, C, D** y **E**, bajo la nueva asignación solo respalda 5 clústers debido a la fusión de algunas agrupaciones anteriores, sin embargo continúa la gran división de agroecosistemas influenciados directamente por la actividad biológica y la humedad, ya que los sistemas de riego presentes y los suelos naturales con especies nativas permiten buena captación de agua (Motaño *et al.*, 2007), diferenciándose así de los grupos posteriores con niveles bajos en los parámetros del suelo.

- Grupo B1: El clúster **F** a pesar de su separación directa de los anteriores grupos y conforme a una mayor distancia de similitud se asocia con A1, esto debido a los bajos registros de variables físicas y químicas registradas.
- Grupo C1: Integrado solamente por **G**, ésta nueva clase se formó por ser la unidad con los niveles más bajos registradas y la necesidad de ordenar con mayor restricción a los agroecosistemas conforme a la actividad biológica presente. Como se ha mencionado anteriormente, es la zona de suelos inundables, donde se observó un gran impacto antrópico.
- Grupo D1: **H** e **I** lo integran y representan a los suelos con mayor contenido de sales de la región.
- Grupo E1: El clúster **J** lo conforma el ecosistema de Bosque, cuyas características continúan asociándolo a los sistemas edáficos de la región sur del área de estudio.

Siendo los grandes grupos a la distancia 25:

- Grupo A2: **A1**, **B1** y **C1** presentan tanto a los suelos con mayor actividad biológica y los menores productores de dióxido de carbono. Siendo la humedad la segunda característica importante para generar estas categorías.
- Grupo B2: **D1** y **E1**, el clúster engloba a la unidad con mayor producción de CO<sub>2</sub> (testigo) y lo relaciona con los grupos de suelo de la comunidad El Durazno.

### Respiración de Suelos (KOH) con parámetros Físicos y Químicos

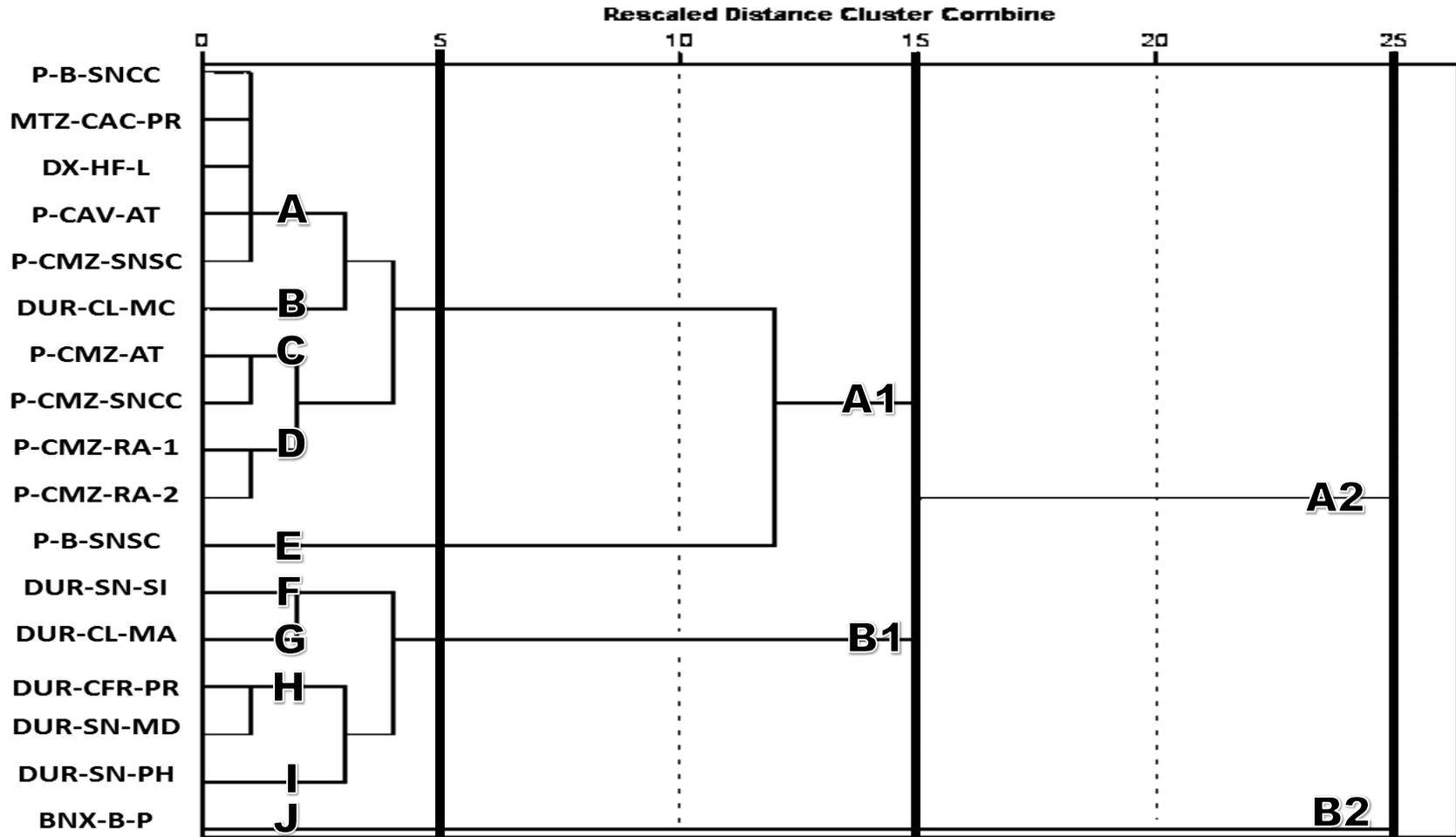


Gráfico 41. Análisis de clúster de la Respiración de Suelo (KOH) y los parámetros Físicos y Químicos

En el análisis con hidróxido de potasio se observó una agrupación muy marcada después de la distancia 15, sin embargo dentro de los primeros clústers se vio una organización diferente de los puntos de muestreo, con respecto a la evaluación anterior.

A la distancia 15, los primeros grupos resultaron similares a NaOH, no así el último clúster pues se observó un grupo aislado; al corte 5 se formaron la misma cantidad de clústers y cambiaron el orden de los agroecosistemas pero a partir de la unidad **C** la organización se diversificó.

Como es la categorización del Gráfico 41, en el cual se registró el análisis multivariante con la influencia directa del tratamiento alcalino de hidróxido de potasio, que para las determinaciones de respiración de suelo, mostraron los valores de mayor error, traduciéndose en actividad biológica de menor producción. Ahora los agroecosistemas se relacionaron en 10 clústers en el corte de distancia número 5.

- Grupo A: Lo conforman los puntos **P-B-SNCC**, **MTZ-CAC-PR**, **DX-HF-L**, **P-CAV-AT** y **P-CMZ-SNSC**, éste grupo es muy similar a la evaluación de NaOH, la única diferencia es la distribución de los puntos en el mismo; continua la clasificación de los puntos con mejores condiciones ambientales y actividad biológica.
- Grupo B: Integrado solo por **DUR-CL-MC**, anteriormente era conformado por los puntos de cultivo de maíz, sin embargo la influencia directa del KOH le otorga dicha categoría a pesar de ser uno de los puntos con actividad biológica moderadamente baja.
- Grupo C: **P-CMZ-AT** y **P-CMZ-SNCC**, continúa con la adición gracias a la presencia de los cultivos de maíz, sin embargo ahora es posicionado en un nivel jerárquico inferior.

- Grupo D: **P-CMZ-RA-1** y **P-CMZ-RA-2**, en NaOH se posicionaban dentro del grupo C, pero la nueva categorización los distribuye en niveles diferentes, sin embargo los conforman los mismos puntos de muestro que son cultivos de maíz y con aporte de agua de tipo riego auxiliar.
- Grupo E: **P-B-SNSC**, junto con el grupo **F**, representan los puntos con la menor actividad biológica, pero las condiciones de suelo de éste clúster permite la separación del mismo y su asociación directa con los primeros grupos.
- Grupo F: **DUR-SN-SI**, Es la primera gran división de grupos, obedeciendo principalmente a la respiración edáfica, además de ser el punto con la actividad biológica más baja, sin embargo las atributos evaluados lo relacionan de forma muy similar a los grupos de la zona sur.
- Grupo G: **DUR-CL-MA**, a un corte mayor al propuesto, se relaciona directamente con el grupo **F**, dicha clasificación se ordena por los atributos físicos y químicos evaluados, además que forman la segunda gran división de clústers que integran solamente a los suelos de la comunidad de El Durazno; exceptuando el grupo **B**.
- Grupo H: **DUR-CFR-PR** y **DUR-SN-MD**, ésta agrupación es idéntica a la evaluación de NaOH, tanto por los puntos que la integran y el nivel jerárquico en el que se ubican. Se infiere que dicho orden se da por la asociación geográfica del grupo.
- Grupo I: **DUR-SN-PH**, Catalogado como el punto de menor nivel jerárquico dentro de los suelos de El Durazno, a pesar de que la actividad biológica que mostró es moderadamente baja y cuya humedad es considerada baja.
- Grupo J: **BNX-B-P**, siendo el punto con mejores condiciones ambientales y la respiración biológica ideal, representaría el grupo jerárquico más bajo, sin embargo al aumentar la distancia de similitud, se establece que éste clúster es único en la evaluación de KOH, que no forma metagrupos al aumentar la escala de distancias.

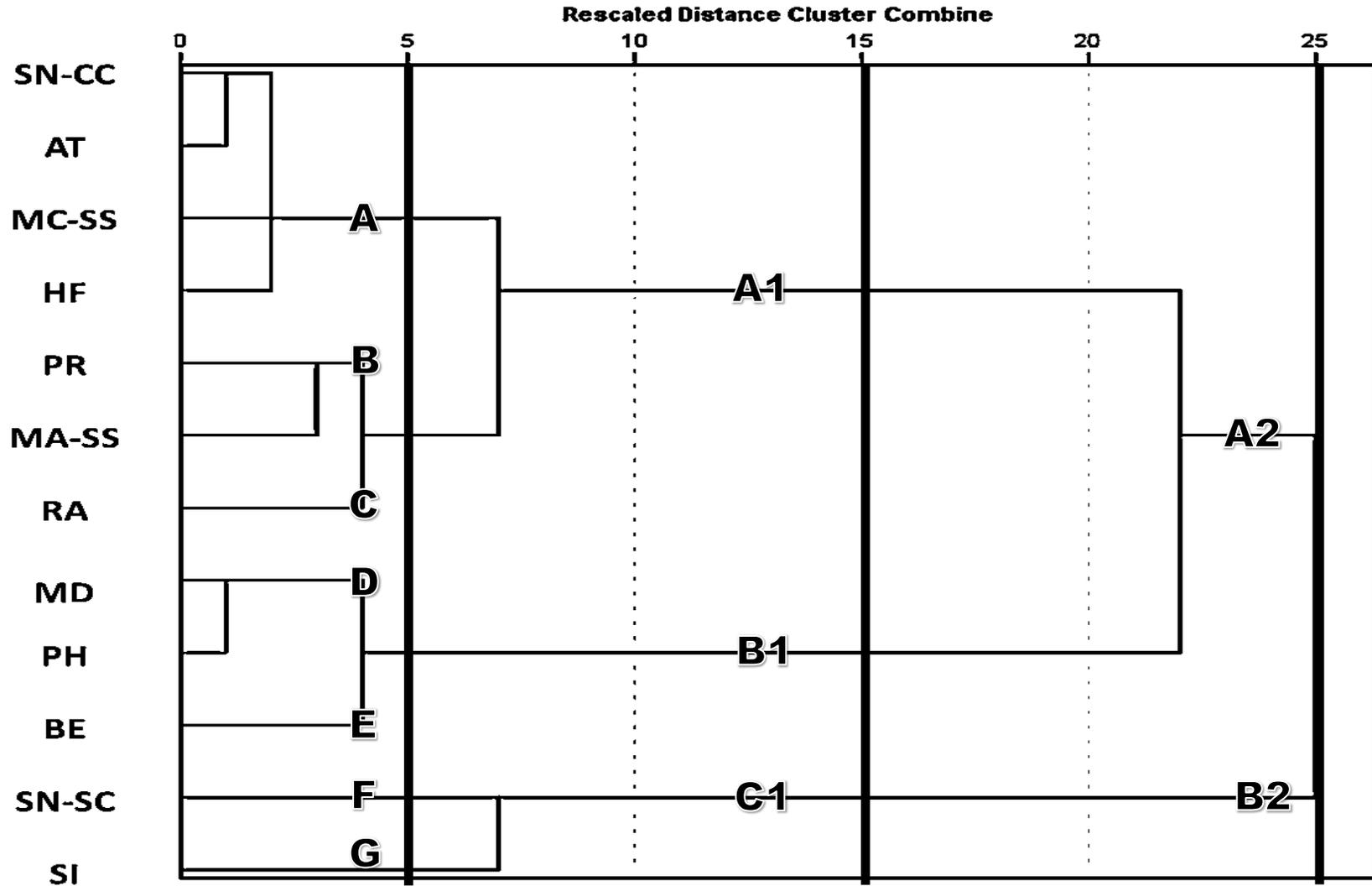
Además se observó éstos órdenes a la distancia de corte 15, con la diferencia de que en KOH solo se formaron dos grupos.

- Grupo A1: **A, B, C, D y E**, Se formó un grupo idéntico a la evaluación del Gráfico 40, la diferencia radica en el contenido de los clúster, sin embargo se observa la gran división de los suelos de las comunidades El Dexthí, La Palma y Los Martínez con un solo punto de muestreo de la comunidad El Durazno. Dicha organización obedece principalmente a los atributos de respiración edáfica y humedad.
- Grupo B1: Se integra por los puntos **F, G, H y I**, que son los suelos restantes de El Durazno, donde se infiere que la asociación geográfica, las condiciones ambientales y sobre todo la humedad presente, los organizan dentro de éste grupo. Cabe mencionar que no se formó un grupo C1 para integrar al clúster **J**, ya que ahora la diferencia entre los suelos del Alto Mezquital y el Banxú es muy determinante.

Siendo las últimas agrupaciones formadas a un corte 25, se formaron también dos grandes clústers.

- Grupo A2: **A1 y B1**, dicho grupo se formó por todos los suelos evaluados en el Alto Mezquital. Sin embargo la diversificación de los puntos de muestreo dentro de los clústers no permite una conclusión definitiva de la distribución.
- Grupo B2: Integrado solo por el clúster **J**, es el único punto perteneciente al Bosque de Encino localizado en la localidad de El Banxú, dicha categorización con KOH, permitió la separación definitiva que antes era muy asociado a los suelos del EL Durazno. Sin embargo con lo establecido en el *subtema 8.3.2. Solución KOH*, no se llega a una conclusión definida de dicho comportamiento.

### Respiración de Suelos (NaOH) con parámetros Físicos y Químicos



**Gráfico 42.** Análisis de clúster de la Respiración de Suelo (NaOH) y los parámetros Físicos y Químicos.

### 8.7.2. División de agroecosistemas y ecosistemas naturales

La determinaciones analíticas anteriores, expusieron las diferentes relaciones de los puntos de muestreo respecto a lo atributos del suelo que se registraron, todo esto relacionado a ambos tratamientos de capacidad de dióxido de carbono.

Para ésta nueva evaluación, se utilizó la segunda clasificación que corresponde a los agroecosistemas de cultivo, agostadero y ecosistemas naturales, originada de la asociación de los puntos de muestreo a las características ambientales que presentaron; para ello fueron normalizados y transformados las evaluaciones de respiración edáfica tanto del hidróxido de sodio como el hidróxido de potasio para conjuntarlos con las demás variables y hacer la categorización de las nuevas unidades (De la Fuente, 2011). Para los siguientes casos, fueron separados los tratamientos en los análisis de conglomerados, obteniendo nuevas clasificaciones de los grupos en el área de estudio y por ende nuevas relaciones ambientales.

Bajo la nueva asignación (Gráfico 42), la distribución de los agroecosistemas se da en 7 clústers iniciales dentro del corte 5, donde los grupos han sido diversificados por las condiciones ambientales y la actividad biológica de los mismos, estableciéndose de ésta forma:

- Grupo A: Ahora son conformados por los sistemas **SN-CC**, **AT**, **MC-SS** y **HF**, que se clasifican en respiración de suelo que va de media a moderadamente baja; en las determinaciones anteriores representaron los mayores puntos de producción de gas carbónico, pero la transformación de los datos a características ambientales similares los redujeron de categoría. Son un primer gran grupo que se diferencia por las condiciones de humedad.
- Grupo B: Con los sistemas **PR** y **MA-SS**, son el segundo gran grupo que junto con grupo **C** tienen los mejores índices de respiración de suelo. La unión de dichas unidades se influencia directamente de la humedad registrada. Junto con las unidades **A** y **C**, se clasifican como los suelos más aptos para las actividades agrícolas de la zona.

- Grupo C: **RA** es la unidad de cultivo con ideal actividad biológica, incluso en las evaluaciones de los puntos de muestreo, representaron los más altos índices de respiración edáfica. Como se ha mencionado anteriormente el constante aporte de agua a los cultivos, tanto de precipitaciones naturales como agua almacenada, confieren el medio ideal para el establecimiento de microorganismos.
- Grupo D: **MD** y **PH**, similar a los grupos anteriores, obtuvieron ideales actividades biológicas y coincidiendo con la extrapolación estadística, son suelos pertenecientes a El Durazno, cuya relación de atributos resultó muy similar por relación geográfica.
- Grupo E: **BE** son los suelos que fungieron como tratamiento blanco para el contraste de las zonas áridas y semiáridas, siendo el ecosistema natural con la mayor producción de CO<sub>2</sub>. Junto con el grupo **D**, forman el tercer grupo de suelos, influenciados por la humedad que registraron.
- Grupo F: **SN-SC** se definen como suelos naturales sin la intervención de costras microbióticas, cuyas evaluaciones de respiración resultaron muy bajas junto con el clúster G. Con la ausencia de las comunidades microorgánicas, se infiere que no permite que el CO<sub>2</sub> producido sea utilizado por lo que pasa directamente a la atmósfera.
- Grupo G: **SI**, continúa siendo el agroecosistema con los más bajos estándares ambientales y de actividad biológica. Conforman el cuarto gran grupo de suelos con la unión del clúster **F** y representan la unidad con menor categoría jerárquica del área de estudio.

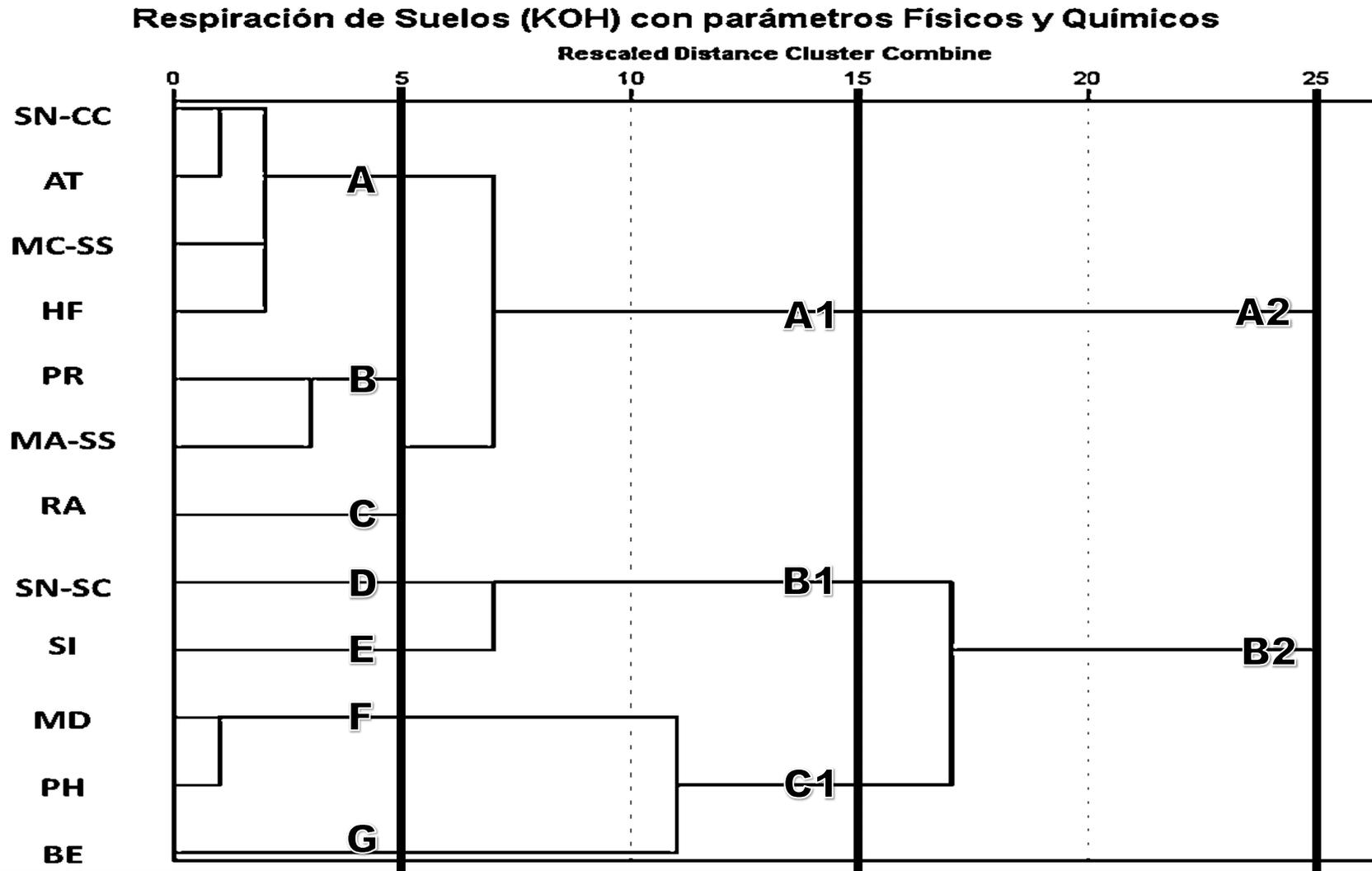
Para el corte 15 se conforman los órdenes:

- Grupo A1: Integrado por los clústers **A**, **B** y **C**, forman el primer metagrupo que contiene a los suelos con las mejores condiciones de producción de dióxido de carbono, además que las condiciones de humedad, textura, pH, materia orgánica y nitrógeno son similares entre las unidades de cultivo y ecosistemas naturales, por lo que se consideran las zonas más aptas para actividades agrícolas.

- Grupo B1: **D** y **E**, dicho grupo posee ideales actividades biológicas, sin embargo los atributos edáficos son diversos en los puntos de muestreo. Se definen como la segunda categoría de mayor importancia en el estudio realizado.
- Grupo C1: **F** y **G**, grupo con los más bajos estándares evaluados y de menor rango jerárquico. Se observa una gran separación de similitud con las demás unidades al aumentar el rango de escala.

Siendo la última generación de clústers al corte 25:

- Grupo A2: **A1** y **B1**, que como se ha mencionado anteriormente, lo integran los suelos cuya actividad biológica y humedad obtuvieron las más altas evaluaciones. Cabe resaltar que continúa la adición del grupo **E** dentro de ésta categoría a pesar de pertenecer a suelos de otra comunidad.
- Grupo B2: **C1**, de igual forma que las evaluaciones anteriores, se generó una división significativa entre los suelos estudiados, coincidiendo que los atributos determinados registraron concentraciones bajas. Haciendo énfasis en la modelización de los agroecosistemas y ecosistemas naturales, donde coinciden lógicamente con su contraparte (puntos de muestreo), mostrando distribuciones de grupos similares y por ende dinámicas contrastables.



**Gráfico 43.** Análisis de clúster de la Respiración de Suelo (KOH) y los parámetros Físicos y Químicos.

Continuando con la lógica del análisis de conglomerados en los puntos de muestreo, se realizó el Dendograma de la categorización del hidróxido de potasio en las unidades de cultivo (Gráfico 43). Se formaron la misma cantidad de clúster que en las determinaciones anteriores, teniendo como diferencia que el segundo gran grupo se diversificó de la misma forma que el tercero. Siendo que para el corte 5 se conformaron:

- Grupo A: **SN-CC, AT, MC-SS y HF**, éste clúster es virtualmente idéntico al del Gráfico 42, la única diferencia radica en la unión de los grupos, debido a que en la evaluación de KOH ésta dividió en dos subgrupos, siendo los suelos naturales con costra microbiana y la agricultura de temporal conforman el primero de los pequeños grupos.
- Grupo B: **PR y MA-SS**, de igual forma, éste grupo es idéntico al anterior, pero para éste caso la unión de grupos ocurre exactamente al corte 5, diferenciándose del anterior cuya unión era posterior a las 5 unidades.
- Grupo C: **RA**, Caso similar al grupo **B** cuya distribución es virtualmente la misma que en la determinación con NaOH. Aquí se forma el primer gran grupo de suelos estudiados.
- Grupo D: **SN-SC** a partir de éste clúster, la distribución de los grupos es totalmente diferente al Gráfico 42. Dicha categorización obedece exclusivamente al tratamiento de hidróxido de potasio y que caracteriza a los suelos con las más bajas producciones de CO<sub>2</sub> en el Alto Mezquital.
- Grupo E: **SI**, Al igual que el clúster **D** forman el grupo con la más baja actividad biológica, y coincide con los metagrupos formados en la división de puntos de muestreo.
- Grupo F: **MD y PH** para ésta asociación, fue determinante la humedad del suelo y continúa con la lógica registrada en las evaluaciones anteriores.
- Grupo G: **BE** se observa nuevamente la separación a gran escala de los suelos estudiados del Banxú y su posterior similaridad con las unidades de la Localidad de EL Durazno.

#### Órdenes en el corte 15:

- Grupo A1: **A, B y C**, La división es idéntica a la agrupación en el tratamiento de hidróxido de sodio, dentro de este corte visible que la unión de **B** y **C** posee mayor similaridad al estar más próximo a corte 5.
- Grupo B1: **D y E**, caso similar de este clúster, donde se observa de la misma forma que los grupos tuvieron un punto crítico de unión posterior al corte 5, traduciéndose que bajo el tratamiento de KOH, dichos clúster no presenta las mismas características similares que con el tratamiento de Sodio.
- Grupo C1: **F y G** en la clasificación establecida, se infiere la estrecha relación de los suelos del Alto Mezquital y del Banxú, siendo en éste caso particular que la disimilitud en ambos es mayor.

#### Grupos formados para el corte 25:

- Grupo A2: **A1**, para éste único grupo, responde a las evaluaciones anteriores y se hace énfasis en los grupos con actividades biológicas altas.
- Grupo B2: **B1 y C1**, sin embargo, a pesar que el clúster contiene al mayor productor de CO<sub>2</sub>, es asociado a los suelos con los parámetros de menor registro, hecho registrado de igual forma en el Gráfico 40.

## 9. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas en la presente investigación describen:

### 9.1. Respiración edáfica

La evaluación de la respiración edáfica para el área estudiada presentó mejores resultados con el tratamiento de captación de CO<sub>2</sub> con el hidróxido de sodio (NaOH) ya que se registraron diferencias en producción de gas en ambos tratamientos de hasta el 50%.

El punto de muestreo que generó mayor dióxido de carbono fue DUR-CL-MA (NaOH), que son los suelos del mezquital abierto con una producción de 25.33 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d, es un ecosistema natural con poco impacto antrópico, donde los mezquites producen islas de fertilidad que promueven la salud del suelo. En cambio, para el tratamiento de KOH fue el punto DX-HF-L, que corresponde al agroecosistema de Huerto Familiar cuya producción se estimó en 21.03 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d, que son zonas de agricultura sustentable y con aporte constante de agua.

La zona de muestreo con el menor índice de producción fue DUR-SN-SI, que corresponde a los suelos inundables con respiraciones de 4.78 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d (NaOH) y 1.91 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d (KOH), respectivamente; siendo el agroecosistema de agostadero con mayor impacto de actividades humanas, altamente compactado y que es utilizado para la captación de agua.

Se observó que la producción de dióxido de carbono, llegó a su máximo a las 18 horas de incubación. Posteriormente la cantidad de gas decrecía hasta en un 30% por cada 6 u 8 horas transcurridas.

La degradación biológica del suelo, evaluada por medio de la respiración edáfica, muestra que el 50% de los sitios evaluados registran actividades biológicas de moderadamente bajas a bajas, por lo que se infiere que la zona ha sido severamente impactada por las actividades antrópicas y es necesario la implementación de estrategias de recuperación de suelo. Además el 25% de las zonas mostró actividad media, principalmente asociado a los ecosistemas naturales, siendo que las áreas restantes registraron actividades biológicas ideales, caracterizada por las unidades de cultivo con aporte continuo de agua.

## 9.2. Índice de Respiración Edáfica Total

La evaluación del I.R.E., nos revela que está directamente relacionada con los atributos de humedad y temperatura del suelo, para este caso se establecieron a un WPS de 60% y T de 25° C.

El mayor índice de respiración se obtuvo con ambos tratamientos en el sitio P-CMZ-RA-2, que corresponde al cultivo de maíz con riego auxiliar, ya que tiene la capacidad de producir en 48.44 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d (NaOH) y 28.16 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d (KOH), respectivamente.

El punto con menor índice de respiración fue el punto DUR-SN-SI, sitio que corresponde a los suelos indudables, que generan hasta 2.46 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d con tratamiento de hidróxido de sodio y 0.99 Kg CO<sub>2</sub>/ha/d con hidróxido de potasio.

El 25% del área presenta una actividad biológica ideal, el 62% registró valores de medio a moderadamente bajo y el 13% restante fue considerado de actividad baja.

Se demostró que el índice de respiración edáfica, funge como un indicador sensible para la evaluación de la actividad biológica del suelo.

## 9.3. Propiedades físicas y químicas

El 69% de los suelos evaluados poseen una coloración en seco de pardo grisáceo claro al pardo grisáceo, el 31% restante, se encuentran en los órdenes de gris claro a gris oscuro. En cambio el color en húmedo que presenta es de pardos, a pardos grisáceos muy oscuros (94%), y solo un 6% de gris muy oscuro.

La mitad de los puntos presentaron clases texturales francos arenosas, el otro 50% se clasificó como franco arcillo arenosa y arenosa.

EL 88% de los sitios muestreados, presentó niveles bajos de humedad, solo un muestro con categoría medio y otro clasificado como óptimo (Bosque-Testigo).

Los suelos son mayormente alcalinos (64%), presentando categorías de moderadamente a fuertemente alcalino. Los otros suelos se definieron como ligeramente ácidos. El testigo mostró un pH neutro.

El 70% de las zonas evaluadas registró materia orgánica que va de moderadamente rico a rico; los otros suelos se categorizaron cantidades medias a moderadamente pobres.

El nitrógeno en la zona de estudio, se categorizó de medianamente pobre a pobre para el 52% del territorio, mientras que el 32% se ubicaron como moderadamente ricos a ricos y los restantes con nitrógeno medio.

## 10. LITERATURA CITADA

- Aguilera, H. N. (Ed.). (1989). *Tratado de edafología de México. Tomo I.* (1ra.Ed.). México: Facultad de Ciencias. UNAM.
- Alef, K. (1995). *Soil respiration*. In: Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Alef, P. and Nannipieri, P. (Eds). Academic Press.
- Álvarez, C., & Velozo, C. (1974). *Contribución a la caracterización de suelos del área basáltica alrededores de Laureles, Depto. de Salto; primera aproximación* (Tesis de Ingeniería). Facultad de Agronomía, Uruguay. 30 p.
- Álvarez-Solís, J. D., & Anzueto-Martínez, M. de J. (2004). Actividad microbiana del suelo bajo diferentes sistemas de producción de maíz en los Altos de Chiapas, México. *Agrociencia* 38 (1), 13-22.
- ANZBIOCHAR: *Australia and New Zealand Biochar Researchers Network*. Obtenida el 7 de Mayo de 2013. <http://www.anzbiochar.org/projects.html>
- Arcos, P. M. del P., Ávila, S. L., Estupiñán T. S. M., & Gómez, P. A. C. (2005). Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua. *NOVA-PUBLICACIÓN CIENTÍFICA* 3, 69–79.
- Atlas, R. M. (1984). *Use of microbial diversity measurements to assess environmental stress*. In: Klug, M. J., Reddy, C. A. (Eds) Current perspectives in microbial ecology. American Society for Microbiology, Washington D.C., p 540–545.
- ASRVM: *Asociación de Silvicultores de la Región del valle del Mezquital*. (2010). *Estudio Regional Forestal Valle del Mezquital* (Informe Técnico). México. p 5–13.
- Ball, B. C., Crichton, I., & Horganc, G. W. (2008). Dynamics of upward and downward N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> fluxes in ploughed or no-tilled soils in relation to Water-Filled Pore Space, compaction and crop presence. *Soil and Tillage Research* 101, 20–30. doi: 10.1016/j.still.2008.05.012
- Barley, K. P. (1963). Influence of soil strength on growth of roots. *Soil sci.* 96: 175–180.
- Bates, R. G. (1964). Determination of pH: theory and practice. Wiley, J. (ED). New York. 435 p.
- Benalp, J., Hawkes, C. y Firestone, M. (2003). Boundaries in miniature: Two examples from soil. *BioScience*, 53(8), 739–749.
- Bernhardt, E. S., Barber, J. J., Pippen, J. S., Taneva, L., Andrews, J. A., & Schlesinger, W. H. (2006). Long-term effects of free air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) on soil respiration. *Biogeochemistry* 77, 91–116. Doi: 10.1007/s10533-005-1062-0
- Bowker, M., Belnap, J., Davidson, D. y Goldstein, H. (2006). Correlates of biological soil crust abundance across a continuum of spatial scales: support for a hierarchical conceptual model. *Journal of Applied Ecology*, 43, 152–163.

- Bowker, M. (2007). Biological soil crust rehabilitation in theory and practice: An underexploited opportunity. *Restoration Ecology*, 15(1), 13–23.
- Bolstad, P. V., & Vose, J. M. (2005). Forest and Pasture Carbon Pools and Soil Respiration in the Southern Appalachian Mountains. *Forest Science*, 51(4), 372–383.
- Bossert, I. D., and Kosson, D. S. (1997). *Measurement of hydrocarbon degradation in soils*. In: Manual of environmental microbiology. Hurst, C. J., Knudsen, G. R., McInerney, M. J., Stetzenbach, L. D., & Walter M. V. (Eds). American Society for Microbiology Press, p. 738-752.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal* 54, 464-465.
- Bouma, T. J., Broekhuysen, A. G. M., & Veen, B. W. (1996). Analysis of root respiration of *Solanum tuberosum* as related to growth, ion uptake and maintenance of biomass. *Plant Physiology and Biochemistry* 34, 795–806.
- Bray, R. H., & Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59, 39–45.
- Bremner, J. M. (1965). Total nitrogen. *Agronomy* 9: 1149–78.
- Brookes, P. D. & Paul, E. A. (1987). A new automated technique for measuring respiration in soil samples. *Plant Soil*, 101: 183–187.
- Buntley, G.J., & Westin, F. C. (1965). A comparative study of developmental color in a Chestnut-Chernozem-Brunizem soil climosequence. *Soil Sci* 23, 579-582.
- Burt, R. (Ed.). (2004). *Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42. Version 4.0*. USA: United States Department of Agricultural. Natural Resources Conservation Service. 700 p.
- Burton, A. J., Pregitzer, K. S., & Hendrick, R. L. (2000). Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. *Oecologia* 125, 389–399.
- CDI: *Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas, antes INI*. (2003). Pueblos indígenas de México. Obtenida el 29 de Agosto de 2013, de <http://www.cdi.gob.mx/monografias/otomiesvm.html>.
- Cepeda, D. J. (1991). *Química de Suelos* (1ra ed.). México: Editorial Trillas.
- CEPIS: *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria*. (2002). *Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en América Latina: Realidad y Potencial. ESTUDIO COMPLEMENTARIO DEL CASO MEZQUITAL, ESTADO DE HIDALGO, MÉXICO*. México: Convenio IDRC – OPS/HEP/CEPIS. 52 p.
- Cervantes, R. M. C. (2005). Plantas de importancia económica en zonas áridas y semiáridas de México. *Anais do X Encontro de Geógrafos da América Latina*, 2, 3388–3407.}

- Chiriboga, C. F. (2008). *Medida de la respiración del suelo y determinación de biomasa en zonas de pastos activos y pastos abandonados*. Tesis de grado. Universidad Técnica Particular de Loja. Ecuador.
- Cisneros, A. R. (2003). *Riego y Drenaje*. Informe Técnico. Centro de Investigación y Estudios de Posgrado y área Agrogeodésica. UASLP, México.
- Coleman, D. C. (1973). Soil carbon balance in a sucesional grassland. *Oikos* 24, 195–199.
- Coleman, D. C., Hunter, M. D., Hutton, J., Pomeroy, S., Swift, L. (2002). Soil respiration from four aggrading forested watersheds measured over a quarter century. *Forest Ecology and Management* 157, 247-253. PII: S0378-1 127(00)00649-6.
- CONAGUA: *Comisión Nacional del Agua Servicio Meteorológico Nacional*. (2011). Hidalgo, Servicio Meteorológico Nacional. Obtenida el 29 de Agosto de 2012, de [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=185:hidalgo&catid=14:normales-por-estacion](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=185:hidalgo&catid=14:normales-por-estacion).
- CONAZA: *Comisión Nacional de las Zonas Áridas*. (1994). *Mezquite (Prosopis sp.). Cultivo alternativo para las zonas áridas y semiáridas de México*. México: Instituto Nacional de Ecología, 30 p.
- Concilio, A., Qinglin Ma, S., Lemoine, L., Chen, J., North, J., Morrhead, M., Jensen, D. (2005). Soil respiration response to prescribed burning and thinning in mixed-conifer and hardwood forests. *Canadian Journal of Forest Research*. 35: 1581–1591.
- Contreras-Arias, A. (1955). *Definición de las zonas áridas y su delimitación en la República Mexicana*. En: E. Beltrán (ed.). *Problemas de las zonas áridas de México*. México: Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables. 3-40 pp.
- Cotler, A., H. (2003). El uso de la información edáfica en los estudios ambientales. *Gaceta Ecológica*, 68, 33–42.
- Davidson, E. a, Verchot, L. V, Henrique Cattânio, J., Ackerman, I. L., & Carvalho, J. E. M. (2000). Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 48(1), 53–69. <http://doi.org/10.1023/A:1006204113917>
- De la Fuente, F., S. (2011). *Análisis de Conglomerados* (Reporte Técnico). Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, UAM. España.
- Díaz, L. F. J., Díaz, S. F., Filardo, K. S. (2005). Conocimiento local y tecnología apropiada: lecciones del Alto Mezquital mexicano. *Alteridades* 15, 9–21.
- Dilustro, J. J., Collins, B., Duncan, L., & Crawford, C. (2005) Moisture and soil texture effects on soil CO<sub>2</sub> efflux components in southeastern mixed pine forests. *Forest Ecology and Management* 204, 85–95.
- Domínguez, R. L. & Aguilera, H. N. (1989). *Metodología de análisis físico-químicos de suelos*. *Facultad de Ciencias*. UNAM. México. 35 p.

- Dörr, H., & Münnich, K. O. (1980). Carbon-14 and Carbon-13. In soil CO<sub>2</sub>. *Radiocarbon* 22, 909–918.
- Durán, D. A., Cisneros, C. A. E., Vargas, V. A. (2008). *Análisis de regresión*. En: Ávila V. J. J. (ED.), Bioestadística, pp. 121–135. FES Iztacala-UNAM, México.
- Edwards, N. T. (1982). The use of soda lime for measuring respiration rates in terrestrial systems. *Pedobiología* 23, 321–330.
- Fang, C., & Moncrieff, J. B. (1998). An open-top chamber for measuring soil respiration and the influence of pressure difference on CO<sub>2</sub> efflux measurement. *Functional Ecology* 12, 319–325.
- FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1993). *Desarrollo sostenible de tierras áridas y lucha contra la desertificación*, (1ra ed). Roma. Obtenida el 14 de Julio de 2012, de <http://www.fao.org/docrep/v0265s/v0265s01.html>.
- FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2006). *World reference base for soil resources 2006 A framework for international classification, correlation and communication*, (2006 ed). Rome. 145 pp. ISBN 92-5-105511-4.
- FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2014). Degradación de Suelo. Obtenida el 5 de Mayo de 2014, de <http://www.fao.org/soils-portal/degradacion-del-suelo/es/>.
- Fernández-Badillo, L., & Goyenechea-Mayer, I. (2010). Anfibios y reptiles del valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 81, 705–712.
- Fernández-Getino, A. P., Guerrero, F., & Gascó, J. M. (2002). Comparative study of soil respiration in soil samples from pine and holm oak ecosystems. *Options Méditerranéennes, Série A*, 50, 121–125.
- Field, C. B., Ball, J. T., & Berry, J. A. (1989). *Photosynthesis, Principles and field techniques*. In Percy, R., Ehleringer, J., Mooney, A., & Rundel, W., (Eds). Plant physiological ecology, field methods and instrumentation. New York: Chapman and Hall. 209–253.
- Filardo, S. (2001). Una contribución al estudio etnobotánico de la zona del Alto Mezquital y propuesta biotecnológica para el aprovechamiento de la tuna (género *Opuntia*, subgénero *opuntia*) en tres comunidades hñahñus del estado de Hidalgo, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, México.
- Flores, D. L., & Alcalá, M. J. R. (2005). *Manual de Procedimientos Analíticos Laboratorio de Física de Suelos*. Departamento de Edafología, Instituto de Geología, UNAM. México.
- García, E. (1973). *Modificaciones al sistema de clasificación climática Köppen*. Segunda edición, Instituto de Geografía, UNAM, México.

- García, R. (1986). *Conceptos Básicos para el Estudio de Sistemas Complejos*. En Leff, E. (coord.), Los problemas del conocimiento y la perspectiva ambiental del desarrollo. México: México Siglo XXI. 243 p.
- García-Sánchez, R. (2005). Restauración de la cubierta vegetal de los matorrales semiáridos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Cuba*. ISBN 959-250-156-4.
- Gayoso, J., & Alarcón, D. (Eds.). (1999). *Guía de conservación de suelos forestales: Proyecto de certificación del manejo forestal en las regiones Octava, Décima y Duodécima*. Chile: Facultad de Ciencias Forestales.
- Glinski, J., & Lipiec, J. (1990). *Soil physical conditions and plant roots*, Finland: CRC Press.
- Gómez, Z. A. (2011). *Evaluación de la actividad y la diversidad bacteriana con potencial biorremediador asociada a diferentes profundidades en el suelo del morro de Moravia mediante análisis de secuencias del Gen 16s rDNA* (Tesis de Maestría). Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.
- González, L. N., & Smith, L. D. (1998). *BIODIVERSIDAD*. En Sánchez, M., Literal, S., Almeida, L., Real, R., & Eccardi, F (Eds), La diversidad biológica de México: Estudio de País, 1998 (pp. 60–102). México: Conabio.
- González, M. F. (Ed). (2012). *Las zonas áridas y semiáridas de México y su Vegetación* (1ra Ed). México: Instituto Nacional de Ecología. 194 p.
- Granados-Sánchez, D., Hernández-García, M. A., Vázquez-Alarcón, A., & Ruiz-Puga, P. (2013). Los procesos de Desertificación y las regiones Áridas. *Revista Chapingo*, 19, 45–66.
- Granados-Sánchez, D., López-Ríos, G. F., Hernández-Hernández, J. (2004). Agricultura Nhanñhu-Otomí del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Terra Latinoamericana*, 22 (1), 117–126.
- Granier, A., Ceschia, E., Damesin, C., Dufrêne, E., Epron, D., Gross, P., Lebaube, S., Dantec, V. Le., Goff, N., Lemoine, D., Lucot, E., Ottorini, J. M., Pontailler J. Y., & Saugier B. (2000). The carbon balance of a young Beech forest. *Functional Ecology* 14, 312–325.
- Grogan, P. (1998) CO<sub>2</sub> flux measurement using soda lime: Correction for water formed during CO<sub>2</sub> adsorption. *Ecology* 79, 1467–1468.
- Guadarrama, A., & Peña, Y. (2013). Actividad respiratoria vs variaciones físicas y químicas en la maduración de frutos de naranjita china (*Citrus x microcarpa* Bunge). *Bioagro* 25, 57–63.
- Guerrero-Ortiz, P. L., Quintero-Lizaola, R., Espinoza-Hernández, V., Benedicto-Valdés, G. S., Sánchez-Colín, M., de J. (2012). Respiración de CO<sub>2</sub> como indicador de la actividad microbiana en abonos orgánicos de Lupinus. *Terra Latinoamericana* 30, 355–362.
- Gulledge, J., & Schimel, J. P. (2000). Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of taiga forest stands in interior Alaska. *Ecosystems* 3, 269–282.

- Hernández, A. J. A., Quintero, F. C. F., Santos, P. R., Esparza, B. D., & Ferrer, G. M. S. (1995). Efecto de la condición del suelo según el estado de desarrollo del cultivo de la guayaba (*Psidium guajava* L) sobre la actividad biológica del suelo. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* 12, 293–302.
- Hernández, M. M. M. (2001). *Caracterización y Evaluación del Recurso del Suelo mediante la aplicación de Sistema de Información Geográfica en el Alto Mezquital, Hidalgo* (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Iztacala. UNAM. México.
- Hernández, M. M. M. (2006). *Evaluación del proceso de degradación del suelo mediante modelos con indicadores edáficos, topográficos y climáticos, en el Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla* (Tesis de Maestría). Facultad de Estudios Superiores Iztacala. UNAM. México.
- Hernández, M. S. (2014). *Evaluación de los Recursos Naturales socialmente valorados de la Microcuenca Banxú-Lagunita en Ixmiquilpan, Hidalgo, México* (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Iztacala. UNAM. México.
- Higashi, R. M., Fan, T. W. M., & Lane, A. N. (2001). *Dependence of Metal Ion Bioavailability on Biogenic Ligands and Soil Humic Substances* (2000 Progress Report). C. C. Washington: United States Environmental Protection Agency.
- Howard, D. M., & Howard, P. J. A. (1993). Relationships between CO<sub>2</sub> evolution, moisture content and temperature for a range of soil types. *Soil Biology and Biochemistry* 25, 1537–1546. doi: 10.1016/0038-0717(93)90008-Y
- Hunt, J., & Midwood, A. (2013). Measuring the δ<sup>13</sup>C of the soil surface efflux. Obtenida el 7 de Mayo de 2013. <http://prometheuswiki.publish.csiro.au/tiki-index.php?page=Measuring+the+%CE%B413C+of+the+soil+surface+efflux>
- Ibáñez, J. J., González, J. L. R., García A. A., & Saldaña A. (1997). *Los geosistemas mediterráneos en el espacio y en el tiempo*. En J. J. Ibáñez, B. L. V., Garcés, & C. Machado (Eds.), *El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación* (pp. 27–130). España: Geofoma Ediciones.
- Ibarra, S., C., L. (2010). *Diversidad de bacterias fijadoras de nitrógeno aisladas de suelo de chinampa y su efecto en plantas de interés agrícola* (Tesis de Maestría). Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN. México.
- INE: *Instituto Nacional de Ecología* (1995). *Estudio de País: México ante el Cambio Climático*. Informe Técnico. México: U.S. Country Studies Program Support for Climate Change Studies, UNAM-Centro de Ciencias de la Atmósfera.
- INEGI: *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática* (1992). *Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo*. México: INEGI.
- INEGI: *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática* (2001). *Carta Topográfica Tasquillo, escala 1:50,000* (2da Ed.). México: INEGI.

- INEGI: *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática* (2008). *Guía para la interpretación de cartografía: Edafología*. México: INEGI.
- Jaramillo, J. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo* (Tesis de Licenciatura). Facultad de Ciencias Medellín, Universidad Nacional de Colombia. Colombia. 613 p.
- Kabwe, L. K., Hendry, M. J., Wilson, G. W., & Lawrence, J. R. (2002). Quantifying CO<sub>2</sub> fluxes from soil surfaces to the atmosphere. *Journal of Hydrology* 260, 1–14.
- Kennedy, A. C., & Smith, K. L. (1995). *Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils*. In: The significance and regulation of soil biodiversity (1 ed). Collins, Harold, Robertson, Philip, Klug, Michael (Eds.). Netherlands: Springer Netherlands, pp 75–86. doi: 10.1007/978-94-011-0479-1
- Kirita, H.; & Hozumi, K. (1966). Re-examination of the absorption method of measuring soil respiration under field conditions. I. Effect of the amount of KOH on observed values. *Seiri, Seitai*, 14, 23–31.
- Kirschbaum, M. U. F. (1995). The temperature dependence of soil organic matter decomposition and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry* 27, 753–760. doi: 10.1016/0038-0717(94)00242-S
- Klute, A., Scott, E. J., & Whisler, F. D., (1965). Steady state water flow in a saturated inclined soil slab. *Water Resources Research*, 1, 287–294. doi: 10.1029/WR001i002p00287
- Kowalenko, C. G., Ivarson, K. C., & Cameron, D. R. (1978). Effect of moisture content, temperature and nitrogen fertilization on carbon dioxide evolution from field soils. *Soil Biology and Biochemistry* 10, 417–423.
- Krebs, R. L. (2003). *Respiración del suelo como herramienta para evaluar la calidad de fondos en acuicultura. I. Desarrollo de un protocolo estándar para medir Dióxido de carbono*. Tesis de Grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador.
- LADA: *Land Degradation Assessment in Drylands*. (2013). *LAND DEGRADATION ASSESSMENT IN DRYLANDS: Methodology and Results*. Roma: FAO, 63 p.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123, 1-22.
- Landa, R., & Neri, C. (2002). *El diagnóstico socioambiental como herramienta para orientar política pública en la gestión de riesgos hidrometeorológicos en la región semiárida del Alto Mezquital en Hidalgo y el Centro-Oeste de Querétaro*. (Reporte de Actividades). México: SEMARNAT – CONACYT.
- León, G., & Moscoso, J. (1995). *Uso de aguas residuales tratadas Potencialidades y Limitaciones*. CEPIS/OPS, Lima, Perú.
- Lloyd, J., & Taylor, J. a. (1994). On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology* 8(3), 315–323.

- López, F. R. (1991). *Caracterización Agroecológica del Ejido Acayuca, Municipio de Zapotlan de Juárez, y Áreas aledañas, Estado de Hidalgo* (Tesis de Licenciatura). Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM. México.
- López, F. R. (2002). *Degradación del Suelo: Causas, Procesos, Evaluación e Investigación* (2a ed). Venezuela: CIDIAT, 280 p. ISBN: 980-6483-10-3
- López, G. F. (2001). *Evaluación de Recursos y Planificación Ecológica del Uso del Suelo en los municipios del EL Cardonal, Tasquillo y Norte de Ixmiquilpan, Estado de Hidalgo* (Tesis de Maestría). Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- López, G. F., Muñoz, I. D. J., Hernández, M. M. M. & Soler, A. A., (1997). *Programa de Manejo Sustentable de Recursos, Restauración y Conservación de Suelos en el Dexthí, Alto Mezquital, Hidalgo* (Informe Técnico). México: UNAM – SEMARNAP.
- López, G. F., Muñoz, I. D. J., Hernández, M. M. M. & Soler, A. A., (1999). Programa de manejo integral de recursos e investigación participativa en el Alto Mezquital, Hgo., (Centro Piloto Dexthí-Valle del Mezquital). *Cuadernos de investigación interdisciplinaria en ciencias de la salud, la educación y el ambiente*, 2, 2-20.
- Lundegårdh, H. (1927). Carbon dioxide evolution of soil and crop growth. *Soil Science* 23, 417–453.
- Luo, Y., & Zhou, X. (Eds). (2006). *Soil Respiration and the Environment*. USA: Elsevier. ISBN 13: 978-0-12-088782-8. ISBN 10: 0-12-088782-7.
- Ma, S., Chen, J., Butnor, J. R., North, M., Euskirchen, S., & Oakley B. Biophysical Controls on Soil Respiration in the Dominant Patch Types of an Old-Growth, Mixed-Conifer Forest. *Forest Science* 51(3), 221–232.
- Madenjian, C. P. (1990). Estimation of whole pond respiration rate. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 47, 682–686.
- Magistad, O. C., Reitemeier, R. F., & Wilcox, L. V. (1945). Determination of soluble salts in soils. *Soil sci*, 59, 65–76.
- Mahía, R. (2008). *Minería de datos para análisis predictivos en la empresa.*, (Reporte Técnico). Departamento de Economía Aplicada, UAM. España.
- Mateos, A. M. A. (2011). *Evaluación del estado actual de 4 Microcuencas ubicadas en el poblado El Dexthí-San Juanico, Ixmiquilpan, Hgo.*, (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM. México.
- Mellville, M. D., & Atkinson, G. (1985). Soil colour: its measurement and its designation in models of uniform colour space. *Soil Sci.* 36, 495-512.
- Minderman, G., & Vulto, J. C. (1973). Comparison of techniques for the measurement of carbon dioxide evolution from soil. *Pedobiologia* 13, 73–80.

- Mogollón, J. P., Torres, D., & Martínez A. (2010). Cambios de algunas propiedades biológicas del suelo según el uso de la tierra en el sector El Cebollal, estado Falcón, Venezuela. *Bioagro* 22, 217–222.
- Molina, J. D. (1983). *Recursos agrícolas de zonas áridas y semiáridas de México*. Simposio, Centro de Genética, Chapingo. México.
- Montaño-Arias, N. M., García-Sánchez, R., Ochoa-de la Rosa, G., Monroy-Ata, A. (2006). Relación entre la vegetación arbustiva, el mezquite y el suelo de un ecosistema semiárido en México. *Terra Latinoamericana* 24, 193–205.
- Montaño, N. M., Camargo, R. S. L., García-Sánchez, R., Monroy, A. (Eds). (2007). *Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos*. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, Mundi-Prensa SA de CV. Distrito Federal, México. 460 pp.
- Munsell Color Firm*. (1975). *Munsell soil color charts*. (2013 production Ed.). Baltimore, Md.
- Muñoz, I. D. J. (1999). *Estudio cartográfico y morfológico de los suelos de la porción sur del Valle del Mezquital* (Tesis de Maestría). Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Muñoz I. D. J., Mendoza C. A., López G. F., Soler A. A., Hernández M. M. M. (2013). *Manual de análisis de suelo. Edafología*. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM. México.
- Murcia-Rodríguez, M. A., & Ochoa-Reyes, M. P. (2008). Respiración del suelo en una comunidad sucesional de pastizal del bosque Altoandino en la cuenca del río Pamplonita, Colombia. *Caldasia*, 30, 337–353.
- Naganawa, T. (1990). *Studies on carbon dioxide evolution from the soil* (PhD Thesis). Kyoto University. Japan.
- Nannipieri P., Grego S., Ceccanti B. (1990). Ecological significance of the biological activity in soil. In *Soil biochemistry*. Vol. 6 Bollag J. M., Stotzky G. (eds). Marcel Dekker, New York, p. 293-355.
- Navarrete, S. A., Vela, C. G., López, B. J., & Rodríguez, G. Ma. de L. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *ContactoS*, 80, 29–37.
- Núñez, R., F. (2013). Composición de las costras microbióticas y su influencia en algunas propiedades del suelo en una zona semiárida. *Revista de Investigación*, 80 Vol. 37. ISSN 1010-2914
- Ortíz-Solorio, C. A., & Cuanalo H. E., (1981). *Introducción a los Levantamientos de Suelos*. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México, 81 p.
- Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (1982). *Methods of soil analysis; 2. Chemical and microbiological properties*, 2. American Soc. of Agronomy, Madison, Wisconsin, U.S.A. DOI: 10.1002/jpln.19851480319

- Pankhurst, C., Doube, B. M., & Gupta, V. S. R (Eds). (1997). *Biological Indicators of Soil Health* (1 ed.). UK: CAB International, 40 p. ISBN 0 85199 158 0
- Parton, W. J., Schimel, D. S., Cole, C. V. & Ojiam, D. (1987). Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 51, 1173–1179.
- Pregitzer, K., Wendy L. E., Mark K. E., & Zak, D. (2006) Soil respiration in northern forests exposed to elevated atmospheric carbon dioxide and ozone. *Oecologia* 148 (3), 503–516. Doi: 10.1007/s00442-006-0381-8
- Raich, J. W., & Schlesinger, W. H. (1992). The global carbon-dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus Ser. B Chem. Phys. Meteorol*, 44, 81–99.
- Raich, J. W., & Tufekcioglu, A. (2000). Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 48, 71–90.
- Rayner, P. J., & Law, R. M. (1999). The interannual variability of the global carbon cycle. *Tellus Ser. B. Chem. Phys. Meteorol*. 51, 210–212.
- Rodríguez, S. E., Rojo, M. G., Ramírez, V. B., Martínez, R. R., Cong, H. M. de C., Medina, T. S., & Piña, R. (2014). Análisis técnico del árbol del mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. & Bonpl. Ex Willd.), en México. *Ra Ximhai* 10, 173–193.
- RUA: *Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante*. (2012). *Cromatografía de Gases*. Universidad de Alicante, San Vicente del Raspeig, España. 20 p.
- Rzedowski, J. (1968) Las principales zonas áridas de México y su vegetación. *Bios, Revista del Seminario de Estudios Biológicos*, 1, 4–24.
- Salazar, F. J. G. (2011). La Respirometría de Suelos. Obtenida el 29 de Septiembre de 2011. <http://www.arkeaslab.com/>.
- Schlesinger, W. H., & Andrews, J. A. (2000). Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry* 48, 7–20.
- Schollenberger, C. J., & Simon, R. H. (1945). Determination of Exchange capacity and exchangeable bases in soils-ammonium acetate method. *Soil Sci*. 59, 13-24.
- SEDESOL: *Secretaría de Desarrollo Social*. (1993). *Ordenamiento Ecológico General del Territorio Nacional, memoria técnica y metodológica*. México: SEDESOL-INE, 202 p.
- SEMARNAP: *Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca*. (1999). *La Evaluación de la degradación del Suelo causada por el Hombre. Inventario Nacional de Suelos*. México: Dirección General de Restauración y Conservación de Suelos-SEMARNAP.
- SEMARNAT: *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. (2003 a). *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1: 250,000* (Informe Técnico). Memoria Nacional 2001-2002. México.

- SEMARNAT: *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. (2003 b). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México* (Informe Técnico). México: SEMARNAT.
- SEMARNAT: *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. (2003 c). *Protocolo de Montreal, aplicación de los criterios e indicadores para el manejo forestal sustentable: Informe de México* (Informe Técnico). México: SEMARNAT.
- SEMARNAT: *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. (2006). *Plan Estatal de Educación, Capacitación y Comunicación Ambiental para el Desarrollo Sustentable de Baja California Sur*. México: SEMARNAT, 170 p.
- SEMARNAT: *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. (2009). *El medio ambiente en México 2009: En resumen*. México: SEMARNAT, 66 pp. ISBN 978-968-817-948-2.
- Sharma, K. D. (1998). The hydrological indicators of desertification. *Journal of Arid Environments* 39, 121–132.
- Singh, J. S., & Gupta, S. R. (1977). Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Botanical Review* 43, 449–528.
- Siyan, M., Jiquan, Ch., Butnor, J. R., North, M., Euskirchen, S., & Oakley, B. (2005). Biophysical controls on Soil Respiration in the Dominant Patch Types of an Old-Growth, Mixed-Conifer Forest. *Forest Science* 51(3), 221–232.
- Stoyan, H., De-Polli, H., Böhm, S., Robertson, G. P., & Eldor, A. P. (2000). Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale. *Plant and Soil* 222, 203–214.
- Tarango, A. L. A. (2005). Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México. *Revista Chapingo: Serie Zonas Áridas*, 4, 17–21.
- Thuille, A., Buchmann, N., & Schulze, E. D. (2000). Carbon stocks and soil respiration rates during deforestation, grassland use and subsequent Norway spruce afforestation in the Southern Alps, Italy. *Tree Physiology* 20, 849–857.
- Tragua, C. (2010). *Ejemplos prácticos de reutilización de agua residual tratada y regenerada para el riego de cultivos. Evaluación de riesgo* (1ra ed.). Ministerio de Economía y Competitividad, España. ISBN: 978-84-695-4012-1
- Trevors, J. T. 1985. Oxygen consumption in soil: Effect of assay volume. *Soil Biol Biochem*, 17: 385–386.
- Trumbore, S. (2000). Age of soil organic matter and soil respiration: Radiocarbon constraints on belowground C dynamics. *Ecological Applications*, 10(2), 399–411.
- UNEP: *United Nations Environment Programme*. (1992). *World Atlas of Desertification*. UK: ONU 69 p.

- USDA: *United States Department of Agriculture*. (1999). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. *Instituto de Calidad de Suelos, Departamento de Agricultura de Los Estados Unidos*, 88 p.
- USDA: *United States Department of Agriculture*. (2012). Respiración de Suelo. *Instituto de Calidad de Suelos, Departamento de Agricultura de Los Estados Unidos*.
- USGS. *U. S. Geological Survey*. (2012). Ground Water Hydrology--Unsaturated Zone Field Studies. Obtenida el 5 de Mayo de 2013. [http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GW\\_Unsat/](http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GW_Unsat/)
- Vázquez, M. N. del C. 2012. *Evaluación del estado actual de la degradación de Tierras en la microcuenca "La Muñeca" en el Alto Mezquital, Ixmiquilpan, Hidalgo* (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM. México.
- Velázquez, A., Mas, J. F., & Palacio-Prieto, J. (2001). Análisis del cambio de uso del suelo. *Convenio, INE-IGg (UNAM)*.
- Verstappen, H. T., & Van Zuidam R. (1991). El Sistema ITC para levantamientos geomorfológicos, *Publicaciones ITC*, 10, 28–41.
- Walkley, A., & Black, A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil sci.* 37, 29–38.
- Whitbread, A. M. (1995). *Soil organic matter: Its fractionation and role in soil structure*. In Lefroy, R. D. B., Blair, G. J., & Craswell, E. T. (Eds.). *Soil Organic Matter Management for Sustainable Agriculture*. Australia: ACIAR Proceeding, Australian Centre for International Agricultural Research. 124–130.
- Wildung, R. E., Garland, T. R., & Buschbom R. L. (1975). The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry* 7, 373–378. doi: 10.1016/0038-0717(75)90052-8
- Witkamp, M., (1996). Rates of Carbon Dioxide Evolution from the Forest Floor. *Ecology* 47:492–494. <http://dx.doi.org/10.2307/1932992>
- Xu, M., & Qi, Y. (2001). Soil-surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology* 7, 667–677.
- Zapata, H. R. D. (2006). *Química de los procesos Pedogenéticos*. Medellín: Facultad De Ciencias Universidad Nacional De Colombia. 358 pp.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., & Smith, G. M. (2007). *Linear regression*, In: *Analyzing Ecological Data* (1 ed). Zuur, Ieno (Eds.). Springer-Verlag New York, pp 49–73. doi: 10.1007/978-0-387-45972-1

## ANEXO I: Fórmulas y cuadros

### a) Proceso analítico para la evaluación de la respiración edáfica

<b>Soluciones para la evaluación de la respiración edáfica:</b>			
<b>Compuesto</b>		<b>Concen.</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Hidróxido de Sodio</b>	<b>NaOH</b>	<b>0.1 N</b>	<b>25 ml</b>
<b>Hidróxido de Potasio</b>	<b>KOH</b>	<b>0.1 N</b>	<b>25 ml</b>
<b>Gas Carbónico</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>-</b>	<b>5ml</b>
<b>Cloruro de Bario</b>	<b>BaCl<sub>2</sub></b>	<b>5%</b>	<b>1 ml</b>
<b>Anaranjado de Metilo</b>	<b>C<sub>14</sub>H<sub>14</sub>N<sub>3</sub>NaO<sub>3</sub>S</b>	<b>0.1%</b>	<b>1 gota</b>
<b>Fenolftaleína</b>	<b>C<sub>20</sub>H<sub>14</sub>O<sub>4</sub></b>	<b>1%</b>	<b>1 gota</b>
<b>Ácido Clorhídrico</b>	<b>HCl</b>	<b>0.1 N</b>	<b>-</b>

De la muestra secada al aire, se toma 100 gr de suelo y se colocan en el dispositivo, posteriormente se le añaden 40 ml de agua destilada y es sellada con la tapa modificada.

A partir del sellado de los dispositivos y transcurrido las horas establecidas (18, 24, 32 y 40), se extraerán por medio de jeringas 5 ml de gas CO<sub>2</sub>, las cuales se incluirán en 25 ml de hidróxido de sodio (o potasio), agitando levemente para no generar burbujas; posteriormente se añadirá a dicha solución 1ml de cloruro de bario, 1 gota de anaranjado de metilo y 1 gota de fenolftaleína. Al final se titulará con ácido clorhídrico, el proceso deberá ser lento y paulatino, debido a que el cambio de coloración es específico. El presente estudio manejó gastos de HCl a partir de 30 ml.

La tasa de respiración del suelo se calcula utilizando la cantidad total de CO<sub>2</sub> atrapado en un período de absorción y aplicando los siguientes algoritmos (Edwards, 1982):

$$\text{mgCO}_2 = (B - V) NZ$$

**B = Volumen consumido del ácido clorhídrico HCL (Blanco)**

**V = Volumen consumido del ácido clorhídrico HCL (Muestra)**

**N = Normalidad del ácido clorhídrico HCL**

**Z = Peso equivalente del dióxido de carbono CO<sub>2</sub>**

$$R = (\text{mgCO}_2/A) \times 1\text{m}^2$$

**R = Miligramos de CO<sub>2</sub> generados en un metro cuadrado**

**A = Área a testar de la cámara sellada:**

$$D^2 \times (\pi/4)$$

**D = Diámetro de la cámara**

$$\text{I.R.E. mgCO}_2/\text{m}^2/\text{h} = R/T$$

**I.R.E. = Índice de respiración edáfica en miligramos de CO<sub>2</sub>, por metro cuadrado por hora**

**T = Horas de Captura: 18 – 40 horas**

$$\text{I.R.E. Kg CO}_2/\text{ha}/\text{d} = (\text{mgCO}_2/(A \times T)) \times 2400$$

**I.R.E. = Convertido en Kilogramos de CO<sub>2</sub> por hectárea por día**

**2400 = Factor de Conversión de Unidades**

### b) Índice de Respiración Edáfica total

La tasa de respiración total fue calculada empleando las siguientes relaciones (Ball, et al., 2008; Edwards, 1982; Howard y Howard, 2008; Salazar, 2011; & USDA, 2012):

$$TE = I.R.E.máx \times 2^{[(25-T)/10]}$$

**TE = Temperatura estandarizada a 25 °C. (Funciona para suelos entre 15 y 35° C).**

**I.R.E.máx = Respiración máxima, todos los escenarios deben coincidir en un tiempo determinado (Hora de captura).**

**T = Temperatura de suelo en el momento de la muestra.**

$$TE = I.R.E.máx \times 4^{[(25-T)/10]}$$

**TE = Temperatura estandarizada a 25 °C. (Funciona para suelos entre 0 y 15° C).**

$$CAS = (PH - PS)/PS$$

**CAS = Contenido de Agua en el Suelo (g/g).**

**PH = Peso del suelo húmedo. (Peso del suelo seco al aire más los 40 ml de agua añadida).**

**PS = Peso del suelo seco al aire.**

$$CVA = CAS \times DA$$

**CVA = Contenido Volumétrico de Agua (g/cm<sup>3</sup>).**

**DA = Densidad Aparente del suelo.**

$$\text{WFPS} = (\text{CVA} \times 100) / [1 - (\text{DA} / 2.65)]$$

**WFPS = Espacio Poroso Saturado de Agua (%).**

$$\text{I.R.E.t.} = \text{I.R.E.}_{(TE)} \times (60 / \text{WFPS})$$

**I.R.E.t. = Índice de Respiración Edáfica Total (Kg CO<sub>2</sub>/ha/d). Para suelos entre 30 a 60% de WFPS.**

**I.R.E.<sub>(TE)</sub> = Índice de Respiración con temperatura estandarizada a 25 °C.**

$$\text{I.R.E.t.} = \text{I.R.E.}_{(TE)} \times (80 / \text{WFPS})$$

**I.R.E.t. = Índice de Respiración Edáfica Total (Kg CO<sub>2</sub>/ha/d). Para suelos entre 60 a 80% de WFPS.**

- c) **Total de gráficos de Regresión Lineal de cada uno de los sitios y con ambos tratamientos**

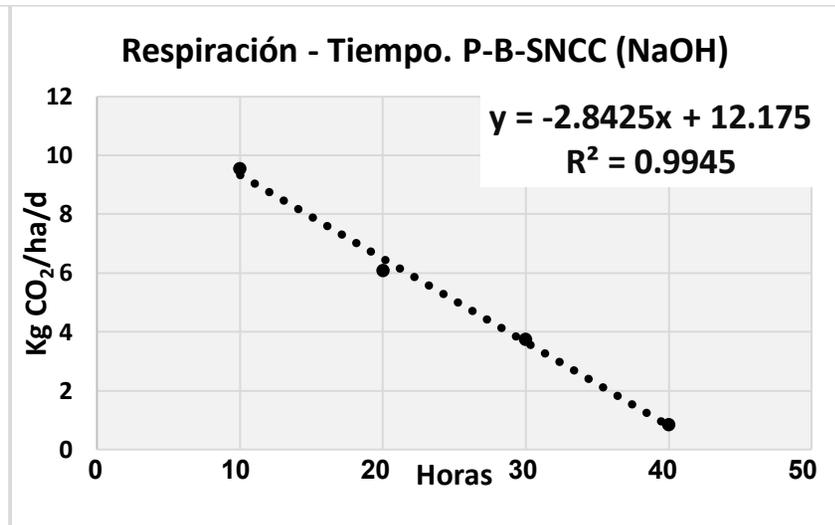
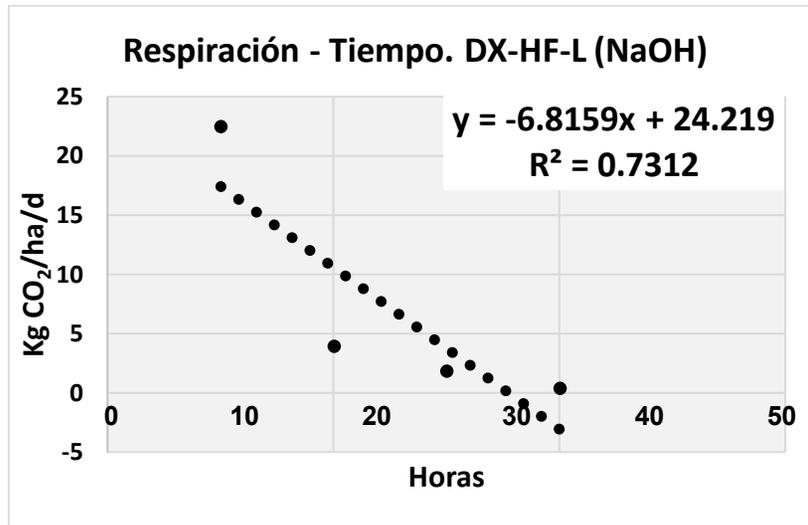


Gráfico 44 y Gráfico 45. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento NaOH.

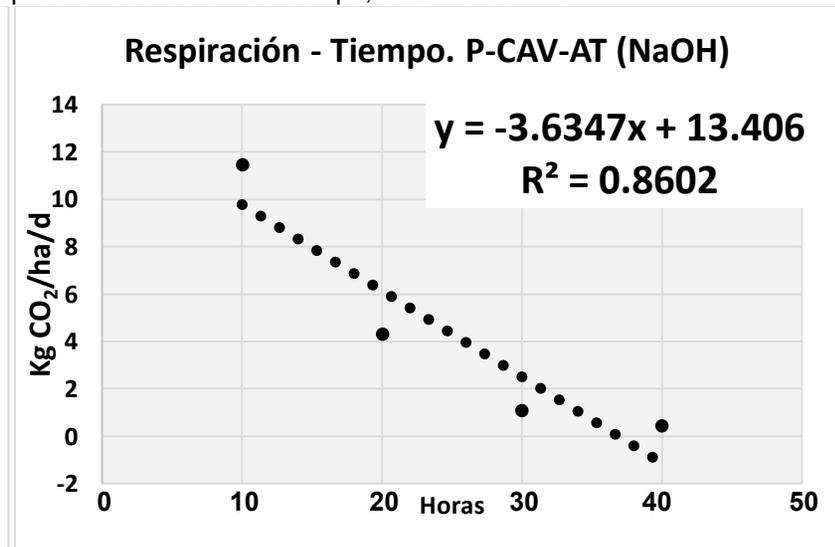
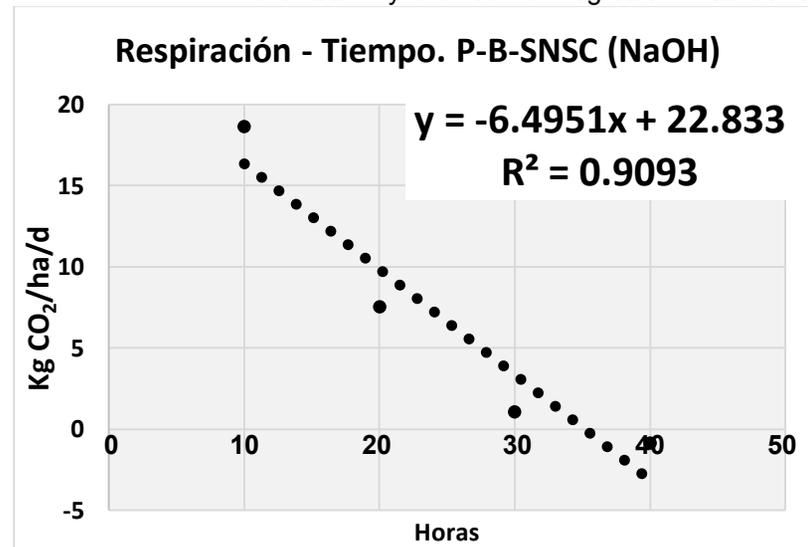


Gráfico 46 y Gráfico 47. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento NaOH.

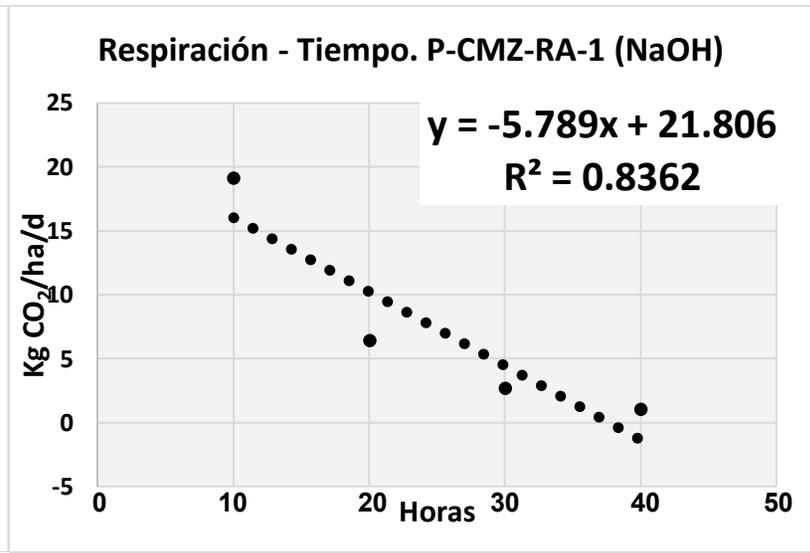
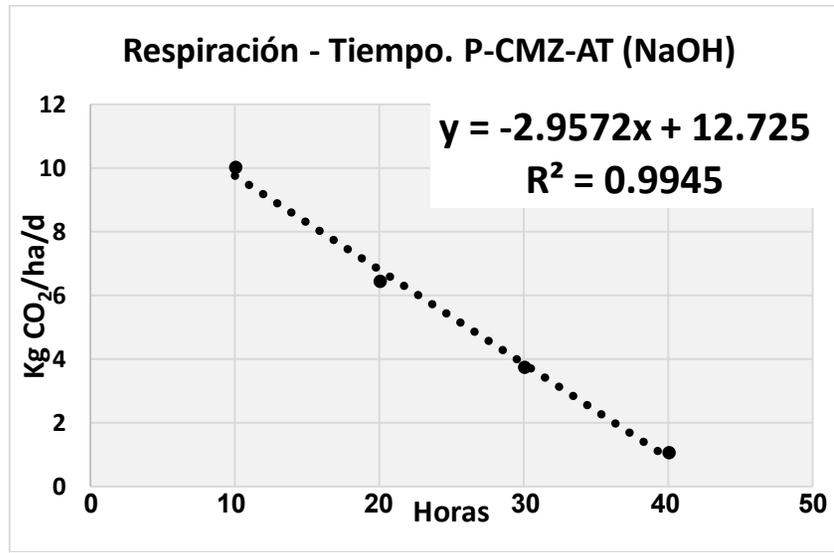


Gráfico 48 y Gráfico 49. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento NaOH.

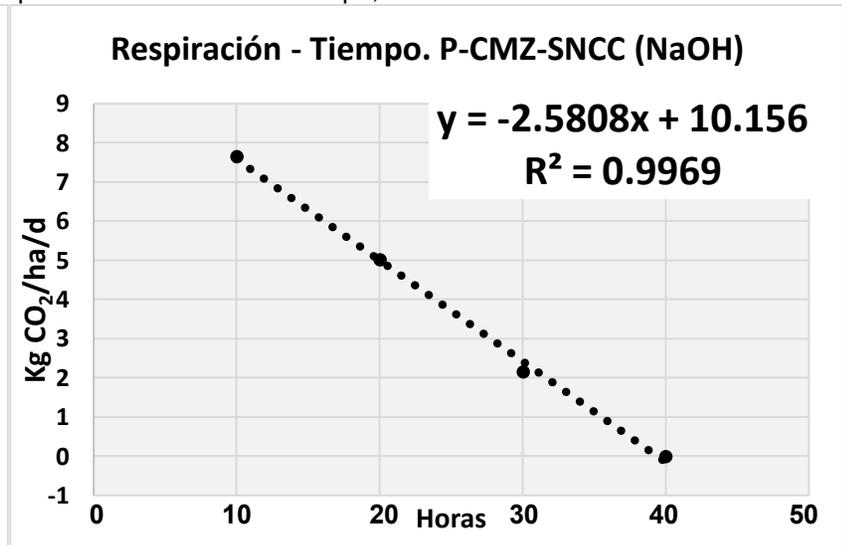
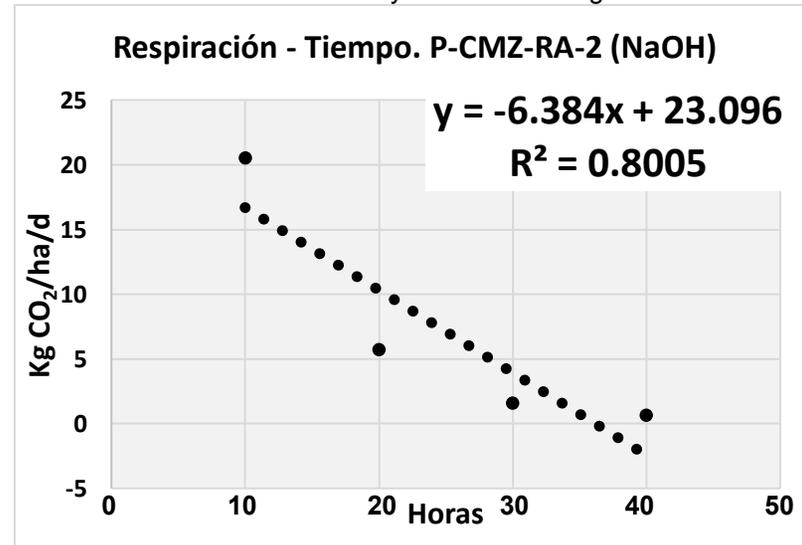


Gráfico 50 y Gráfico 51. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento NaOH.

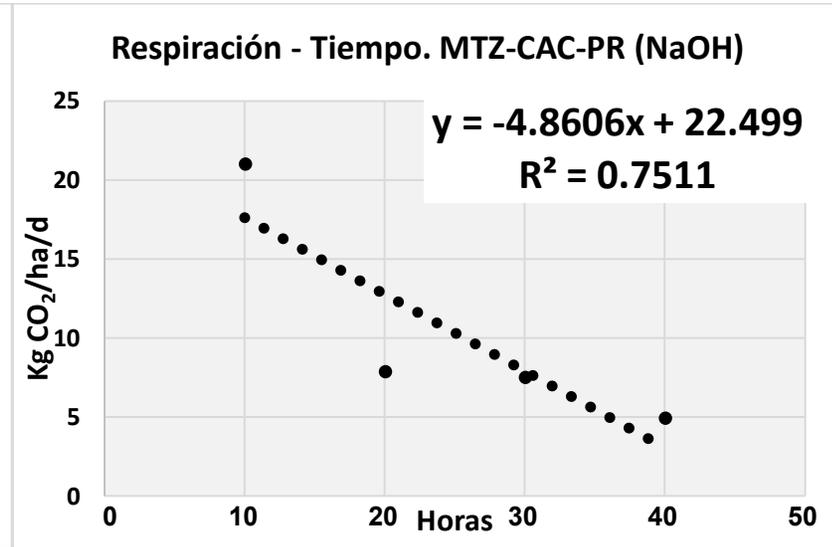
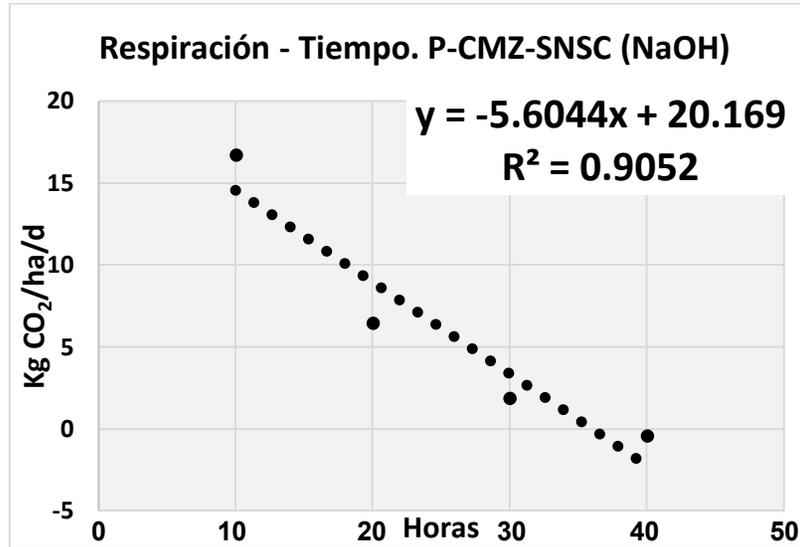


Gráfico 52 y Gráfico 53. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento NaOH.

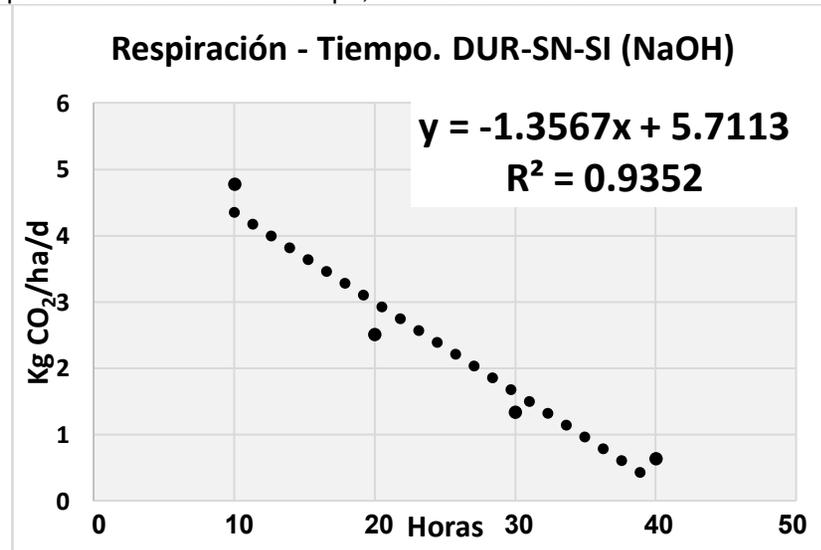
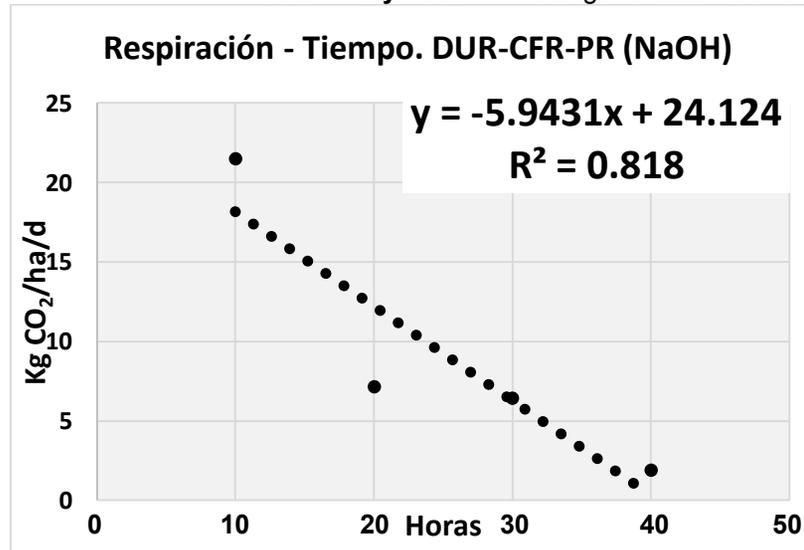


Gráfico 54 y Gráfico 55. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento NaOH.

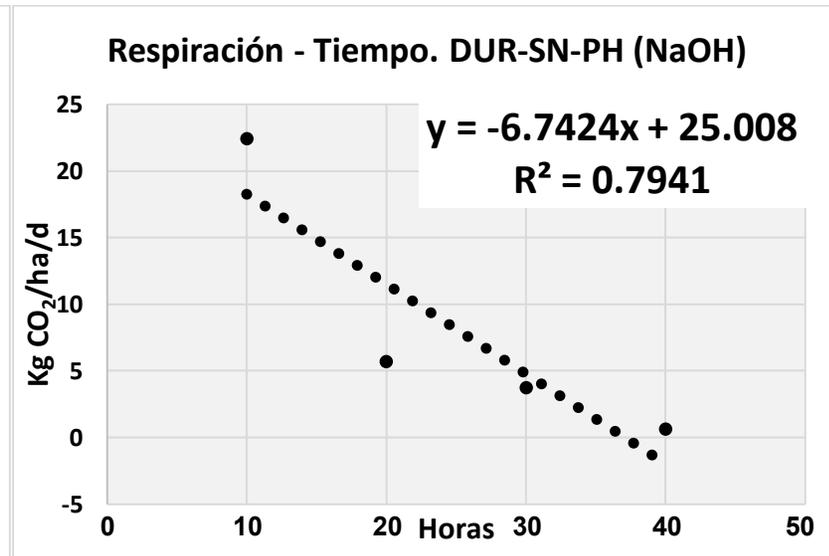
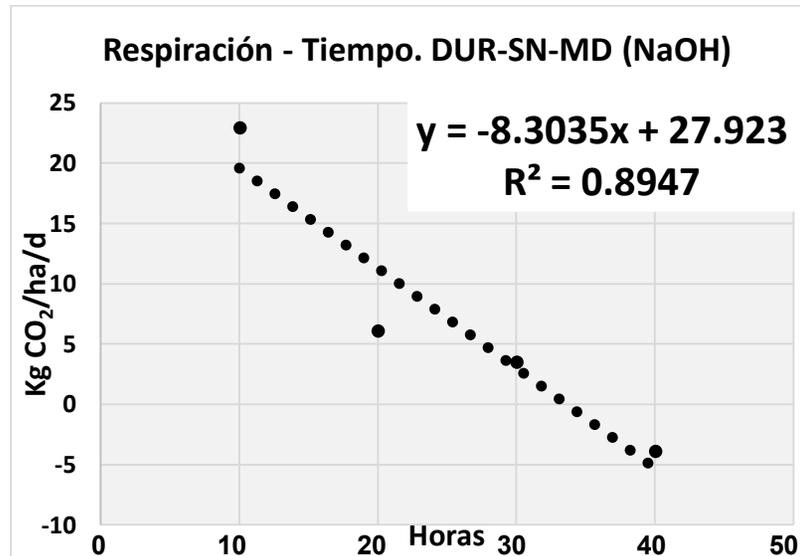


Gráfico 56 y Gráfico 57. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento NaOH.

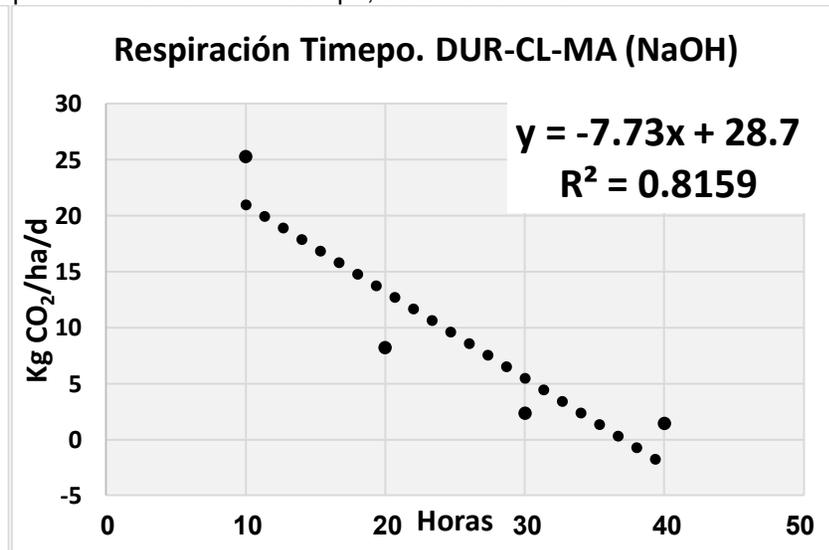
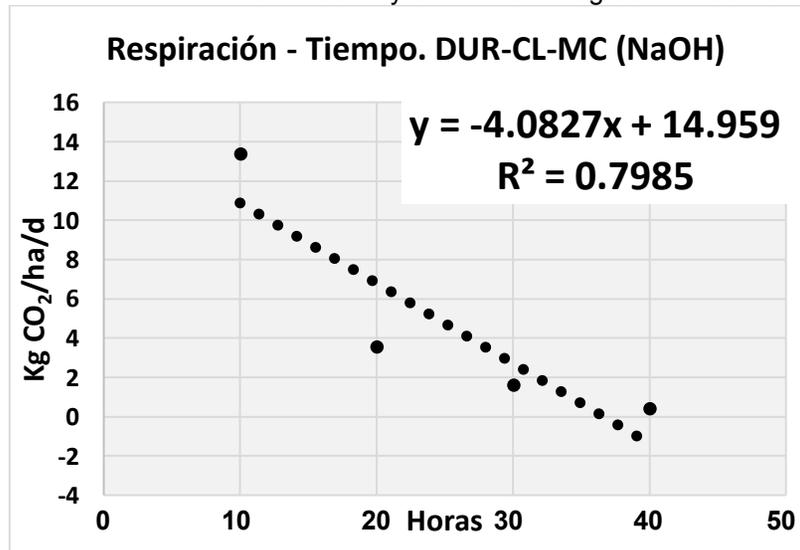


Gráfico 58 y Gráfico 59. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento NaOH.

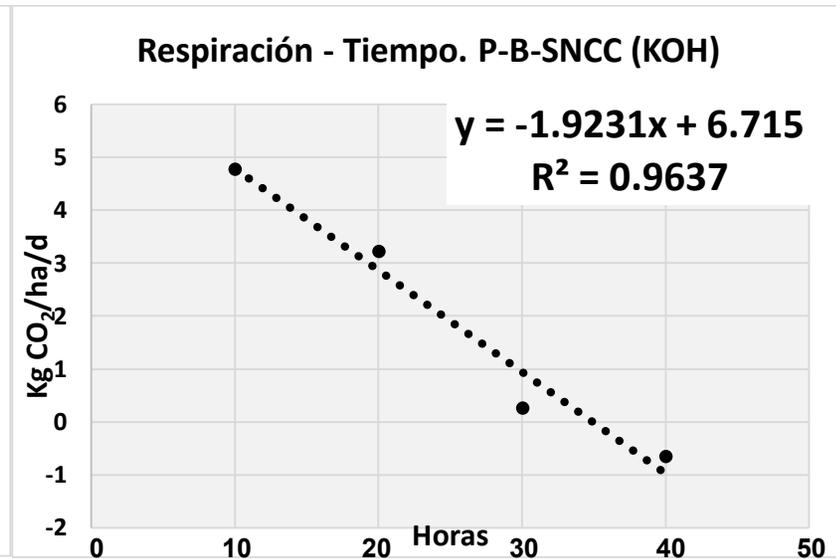
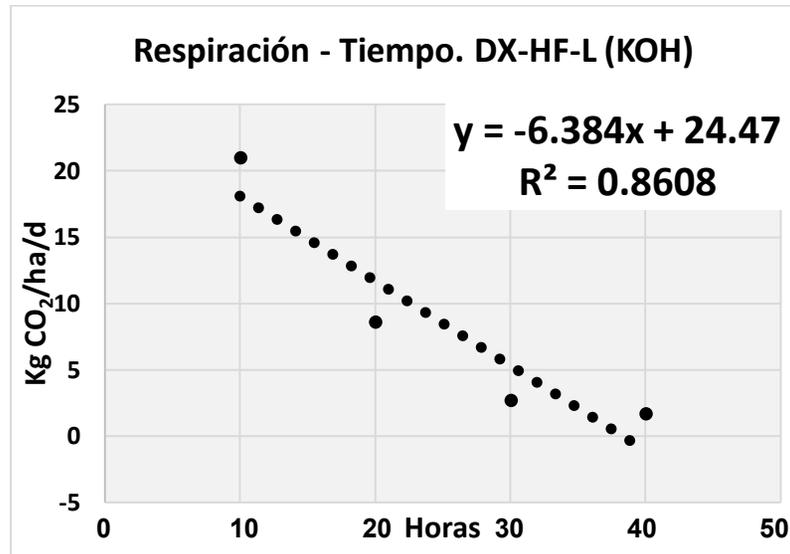


Gráfico 60 y Gráfico 61. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento KOH.

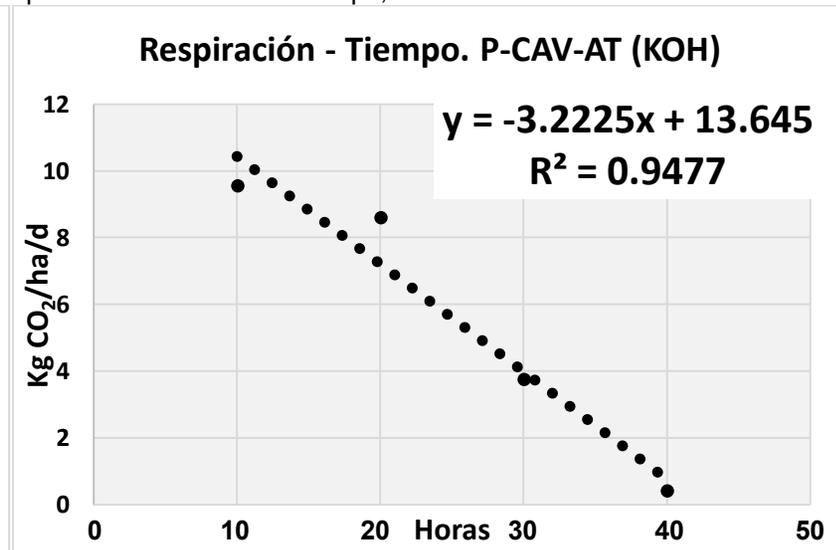
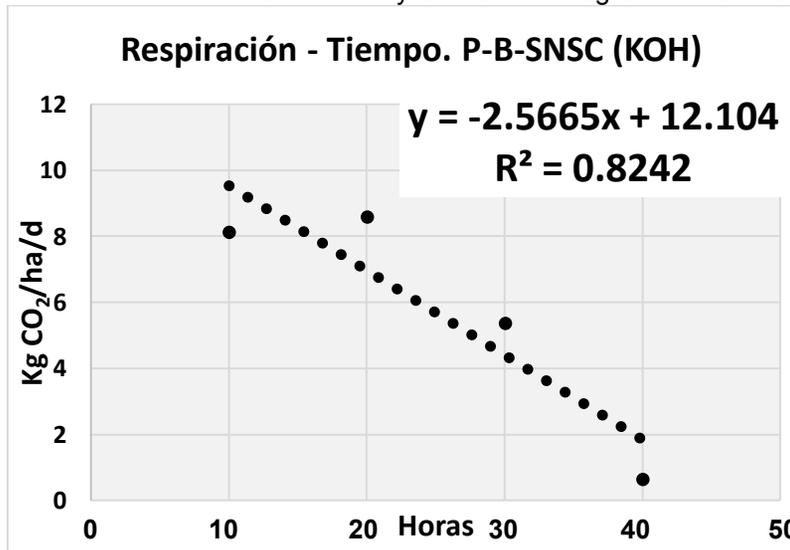


Gráfico 62 y Gráfico 63. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento KOH.

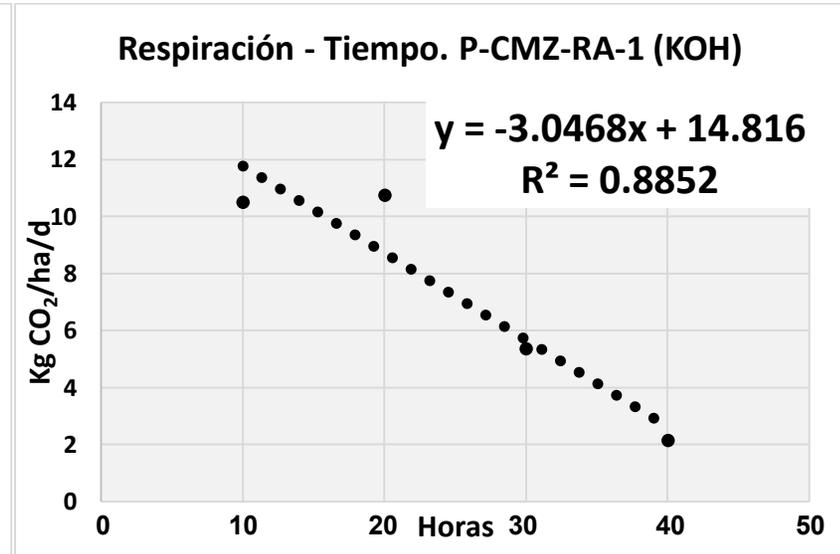
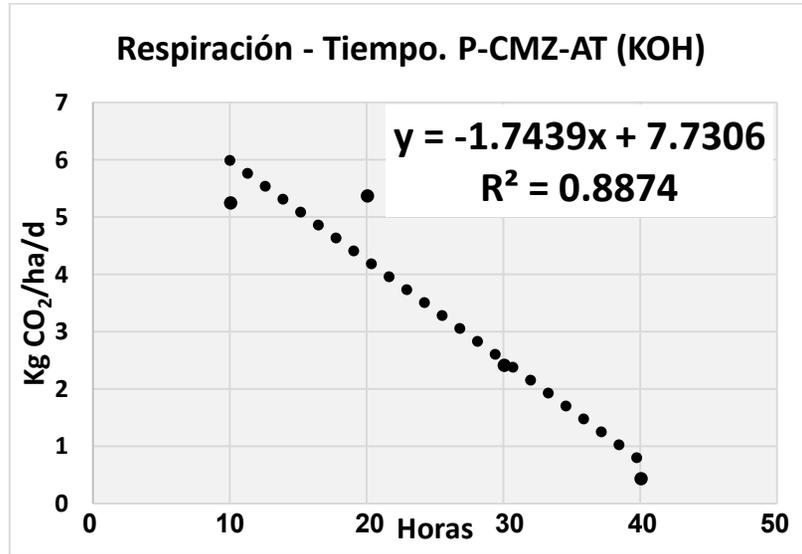


Gráfico 64 y Gráfico 65. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento KOH.

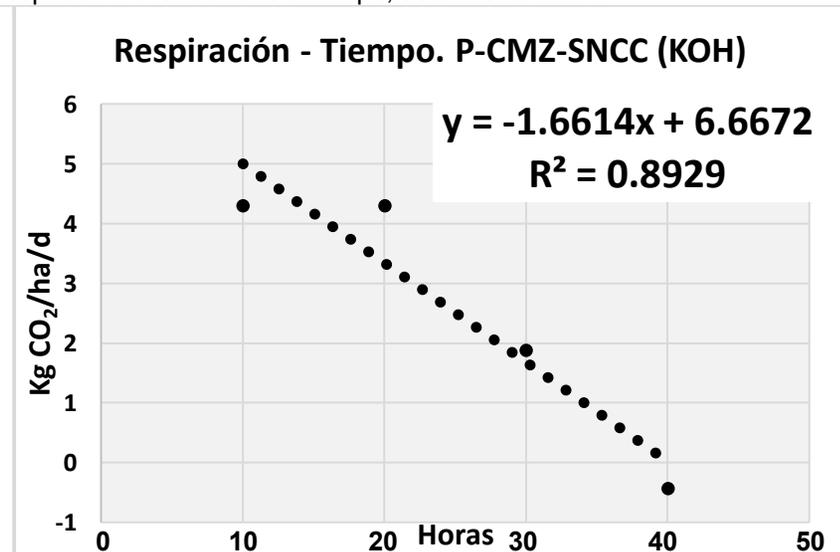
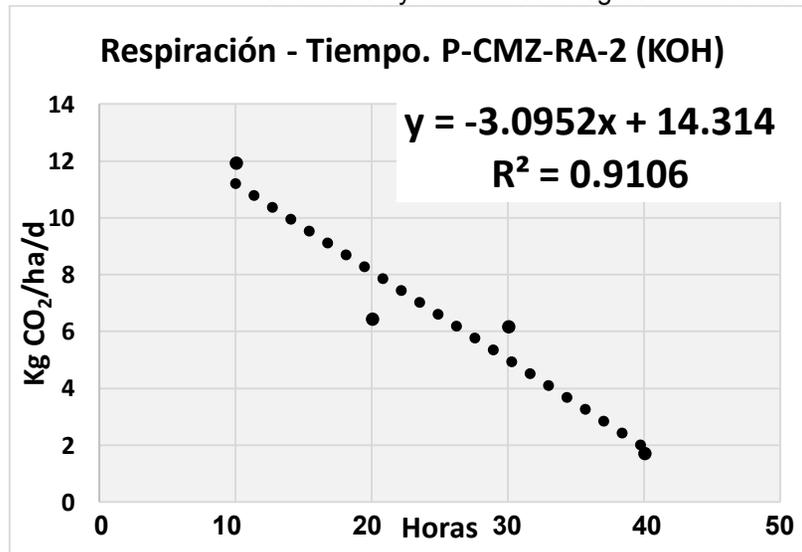


Gráfico 66 y Gráfico 67. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento KOH.

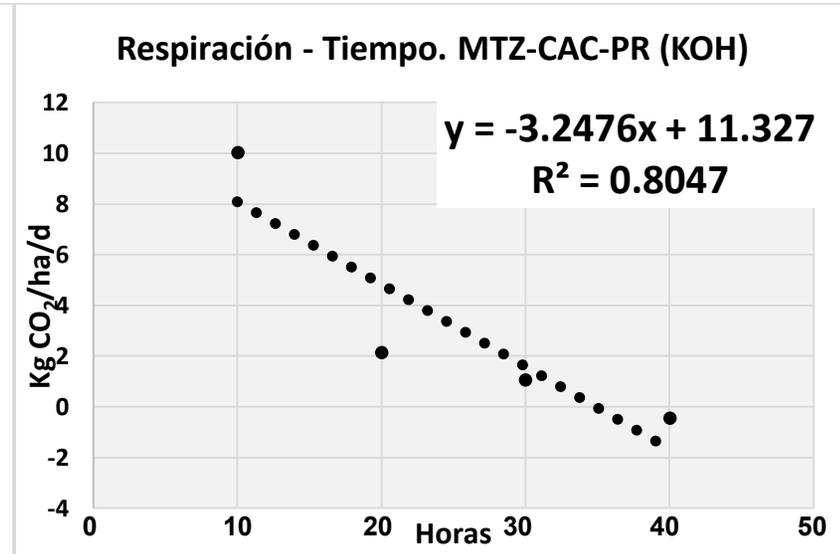
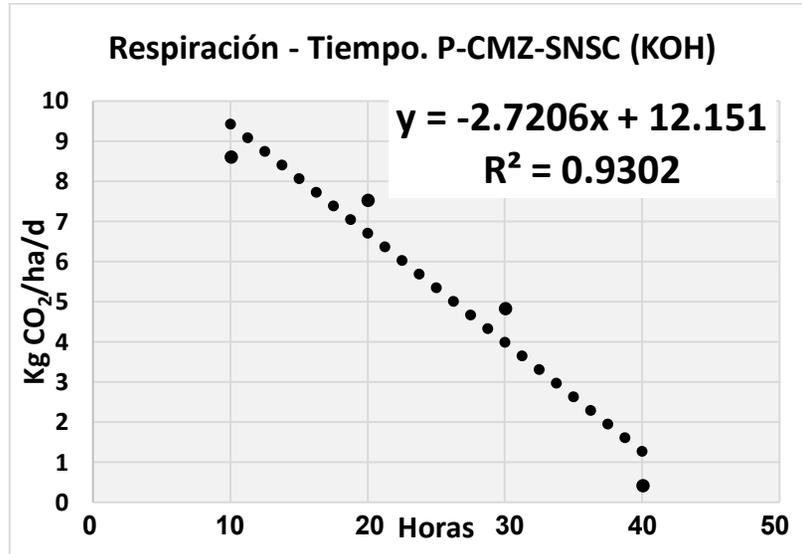


Gráfico 68 y Gráfico 69. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento KOH.

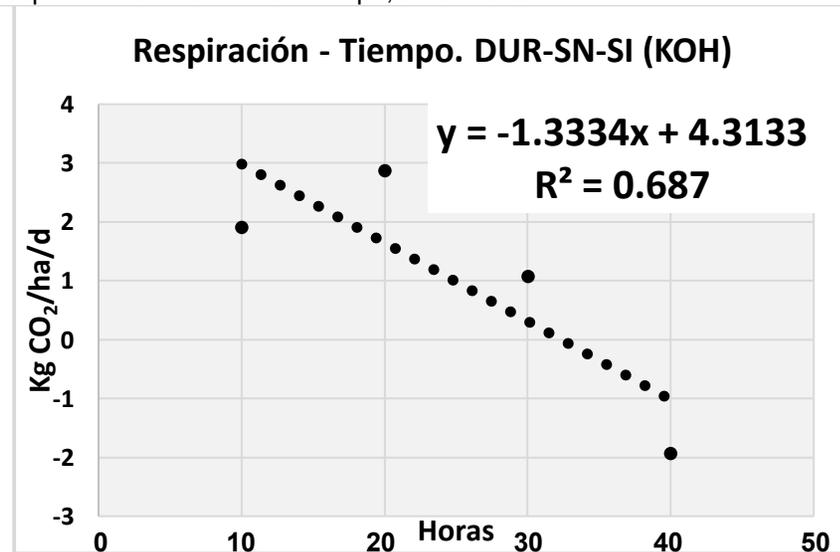
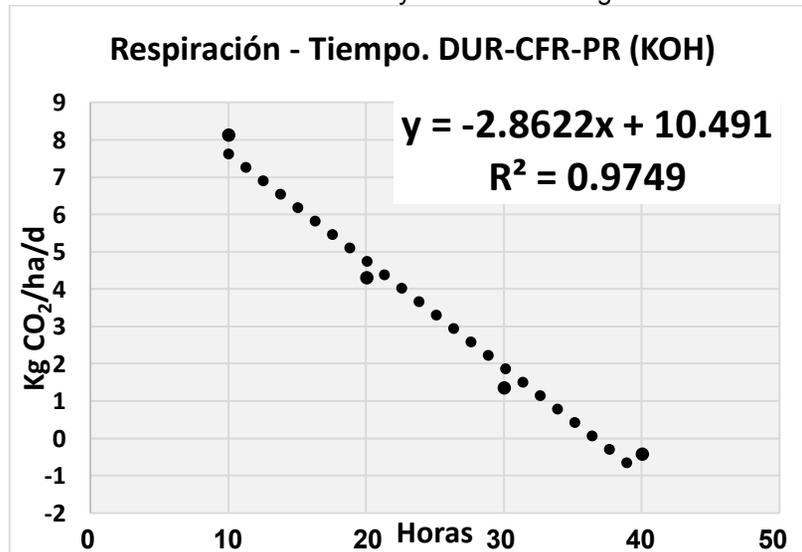


Gráfico 70 y Gráfico 71. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento KOH.

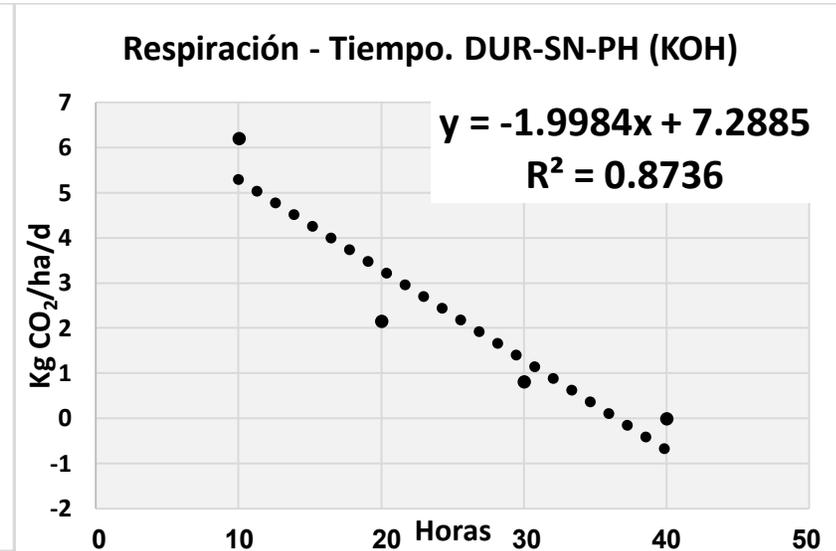
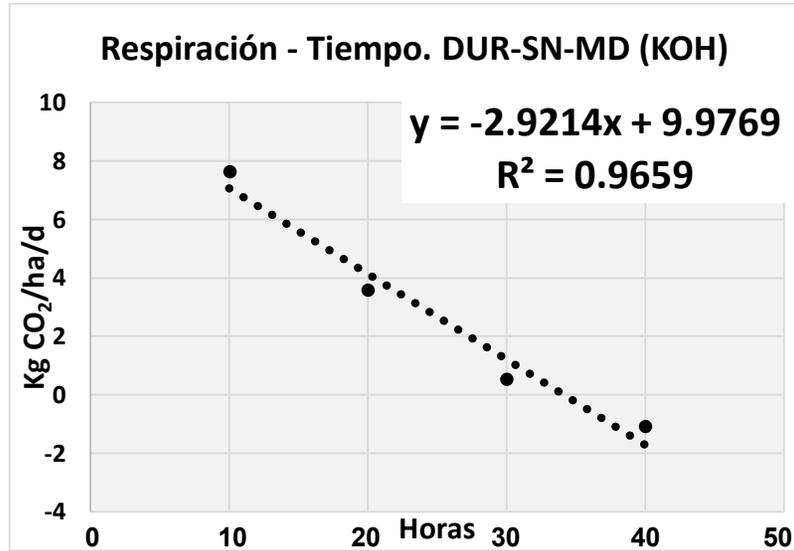


Gráfico 72 y Gráfico 73. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento KOH.

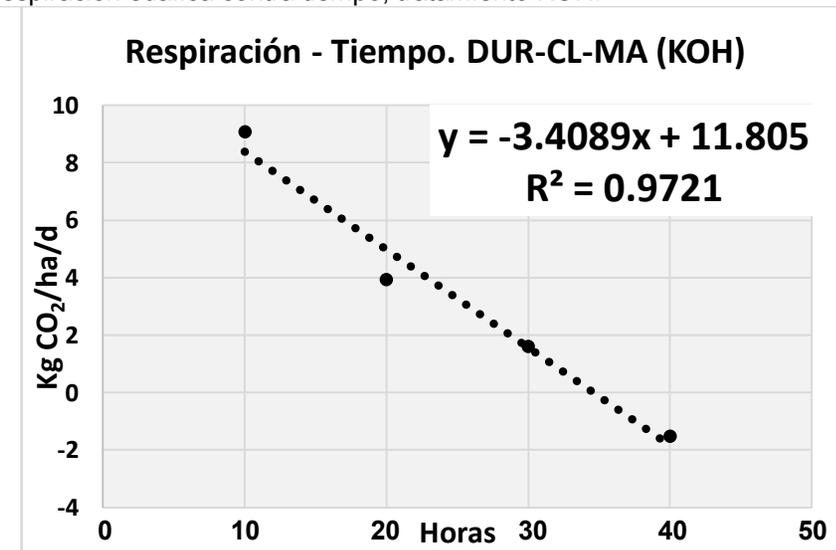
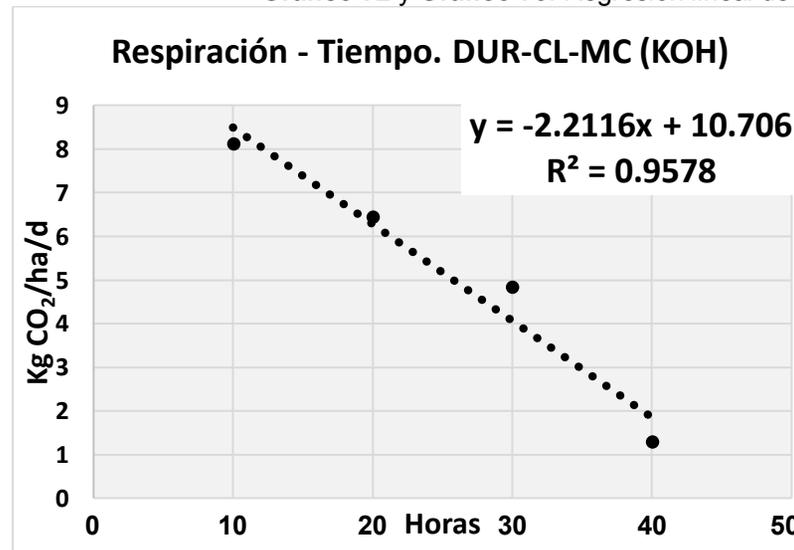


Gráfico 74 y Gráfico 75. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento KOH.

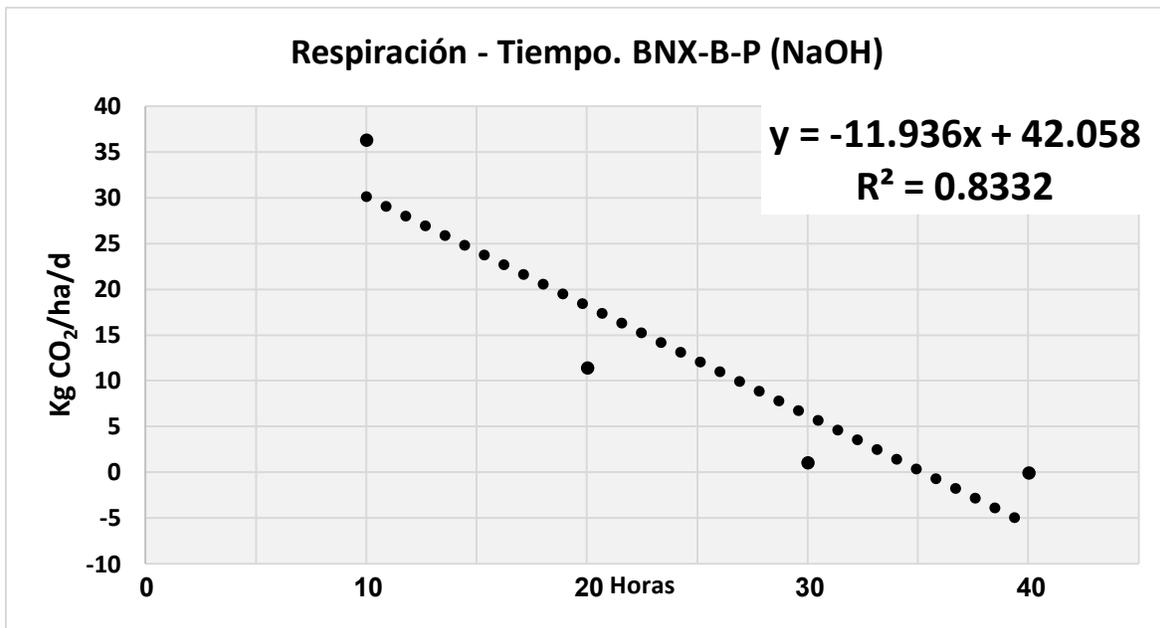


Gráfico 76. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento NaOH.

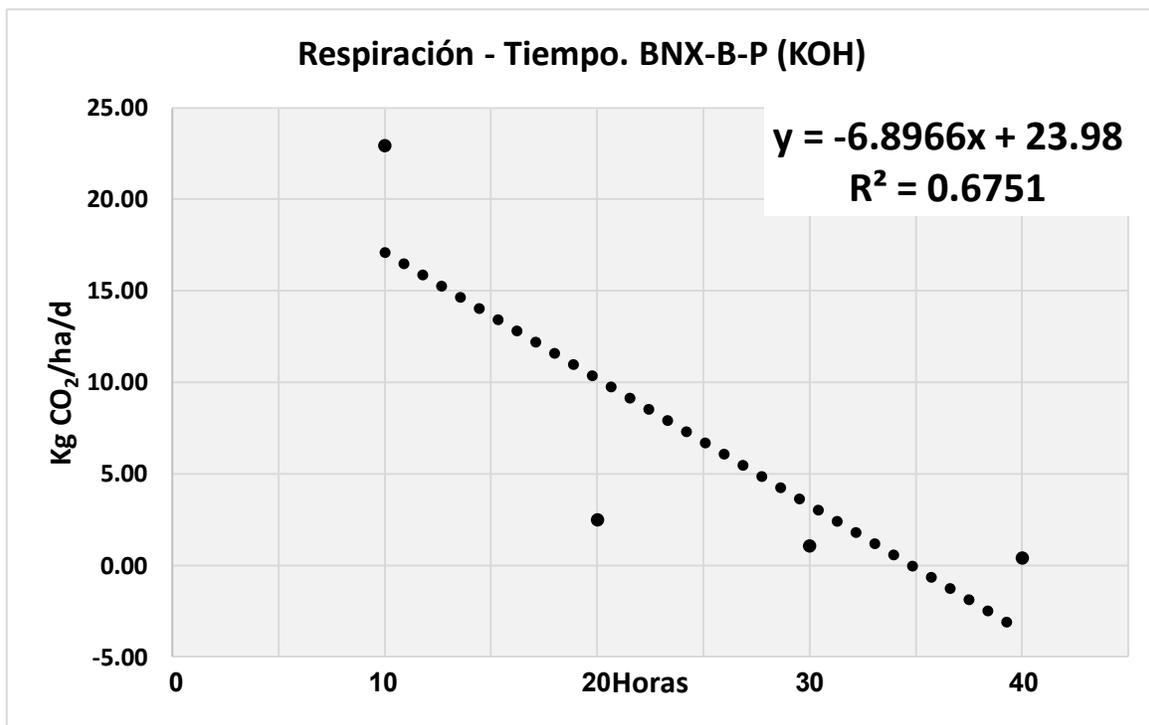


Gráfico 77. Regresión lineal de respiración edáfica contra tiempo, tratamiento KOH.

## ANEXO II: Cuadros y figuras

### a) Cuadros de resultados de los parámetros físicos y químicos de los suelos de cada una de las unidades

<b>Cuadro 23. Color de los agroecosistemas e índice de respiración edáfica total</b>						
<b>Unidad</b>	<b>Valor Seco</b>	<b>Color Seco</b>	<b>Valor Húmedo</b>	<b>Color Húmedo</b>	<b>I.R.E. TOTAL NaOH</b>	<b>I.R.E. TOTAL KOH</b>
<b>SN-CC</b>	10YR 5/2	PARDO GRISACEO	10YR 3/3	PARDO OSCURO	Moderadamente Baja	Baja
<b>SN-SC</b>	10YR 6/2	PARDO GRISACEO CLARO	10YR 3/3	PARDO OSCURO	Baja	Baja
<b>AT</b>	10YR 6/2	PARDO GRISACEO CLARO	10YR 3/2	PARDO GRISACEO MUY OSCURO	Moderadamente Baja	Baja
<b>PR</b>	10YR 6/2	PARDO GRISACEO CLARO	10YR 4/3	PARDO	Media	Moderadamente Baja
<b>RA</b>	10YR 5/2	PARDO GRISACEO	10YR 3/2	PARDO GRISACEO MUY OSCURO	Ideal	Media
<b>MA-SS</b>	10YR 7/2	GRIS CLARO	10YR 4/3	PARDO	Media	Baja
<b>MC-SS</b>	10YR 4/1	GRIS OSCURO	10YR 2/1	NEGRO	Media	Moderadamente Baja
<b>HF</b>	10YR 6/2	PARDO GRISACEO CLARO	10YR 4/2	PARDO GRISACEO OSCURO	Moderadamente Baja	Moderadamente Baja
<b>MD</b>	10YR 7/2	GRIS CLARO	10YR 5/3	PARDO	Ideal	Moderadamente Baja
<b>SI</b>	10YR 6/2	PARDO GRISACEO CLARO	10YR 4/2	PARDO GRISACEO OSCURO	Baja	Sin actividad
<b>PH</b>	10YR 7/2	GRIS CLARO	10YR 5/2	PARDO GRISACEO	Ideal	Moderadamente Baja
<b>BE</b>	10YR 4/2	PARDO GRISACEO OSCURO	10YR 3/2	PARDO GRISACEO OSCURO	Ideal	Ideal

<b>Cuadro 24. Clase textural de los agroecosistemas</b>						
Unidad	Arenas %	Limos %	Arcillas %	Textura	I.R.E. TOTAL NaOH	I.R.E. TOTAL KOH
SN-CC	65.42	17.00	17.58	Franco Arenosa	Moderadamente Baja	Baja
SN-SC	15.67	14.67	69.67	Arcillosa	Baja	Baja
AT	67.08	16.16	16.75	Franco Arenosa	Moderadamente Baja	Baja
PR	50.58	25.42	24.00	Franco Arcillo Arenosa	Media	Moderadamente Baja
RA	72.50	13.00	14.50	Franco Arenosa	Ideal	Media
MA-SS	48.79	17.50	33.71	Franca	Media	Baja
MC-SS	62.15	10.00	27.85	Franco Arcillo Arenosa	Media	Moderadamente Baja
HF	72.75	9.25	18.00	Franco Arenosa	Moderadamente Baja	Moderadamente Baja
MD	36.36	26.50	37.14	Franco Arcillosa	Ideal	Moderadamente Baja
SI	42.25	16.75	41.00	Arcillosa	Baja	Sin actividad
PH	31.00	26.25	42.75	Arcillosa	Ideal	Moderadamente Baja
BE	44.41	28.80	26.79	Franco Arcillosa	Ideal	Ideal

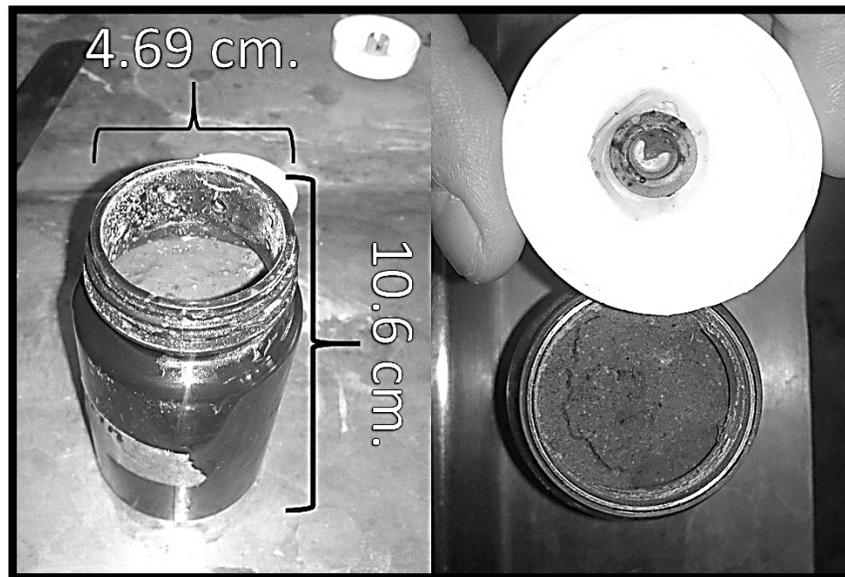
<b>Cuadro 25. Humedad de los suelos en las unidades estudiadas</b>				
Unidad	Humedad		I.R.E.t. NaOH	I.R.E.t. KOH
	Valor	Criterio		
SN-CC	14.13	BAJO	Moderadamente Baja	Baja
SN-SC	43.61	MEDIO	Baja	Baja
AT	15.78	BAJO	Moderadamente Baja	Baja
PR	31.86	MEDIO	Media	Moderadamente Baja
RA	45.00	MEDIO	Ideal	Media
MA-SS	22.74	BAJO	Media	Baja
MC-SS	19.05	BAJO	Media	Moderadamente Baja
HF	29.13	BAJO	Moderadamente Baja	Moderadamente Baja
MD	35.29	MEDIO	Ideal	Moderadamente Baja
SI	54.00	MEDIO	Baja	Sin actividad
PH	29.65	BAJO	Ideal	Moderadamente Baja
BE	62.45	ÓPTIMO	Ideal	Ideal

<b>Cuadro 26. pH e I.R.E.t. en cada sitio evaluado</b>				
Unidad	pH		I.R.E.t. NaOH	I.R.E.t. KOH
	Valor	Criterio		
SN-CC	7.27	NEUTRO	Moderadamente Baja	Baja
SN-SC	7.33	NEUTRO	Baja	Baja
AT	7.28	NEUTRO	Moderadamente Baja	Baja
PR	6.86	NEUTRO	Media	Moderadamente Baja
RA	8.12	MODERADAMENTE ALCALÍNA	Ideal	Media
MA-SS	10.33	ALCALÍNA MUY FUERTE	Media	Baja
MC-SS	8.17	MODERADAMENTE ALCALÍNA	Media	Moderadamente Baja
HF	8.48	MODERADAMENTE ALCALÍNA	Moderadamente Baja	Moderadamente Baja
MD	8.32	MODERADAMENTE ALCALÍNA	Ideal	Moderadamente Baja
SI	8.91	ALCALÍNA MUY FUERTE	Baja	Sin actividad
PH	7.60	LIGERAMENTE ALCALÍNA	Ideal	Moderadamente Baja
BE	6.97	NEUTRO	Ideal	Ideal

<b>Cuadro 27. Materia orgánica e índice de respiración edáfica en las unidades</b>				
Unidad	Materia Orgánica		I.R.E.t. NaOH	I.R.E.t. KOH
	Valor	Criterio		
SN-CC	6.01	RICO	Moderadamente Baja	Baja
SN-SC	5.18	RICO	Baja	Baja
AT	5.49	RICO	Moderadamente Baja	Baja
PR	5.08	MEDIANAMENTE RICO	Media	Moderadamente Baja
RA	4.43	MEDIANAMENTE RICO	Ideal	Media
MA-SS	1.50	MEDIANAMENTE POBRE	Media	Baja
MC-SS	11.93	RICO	Media	Moderadamente Baja
HF	5.78	RICO	Moderadamente Baja	Moderadamente Baja
MD	3.04	MEDIANAMENTE RICO	Ideal	Moderadamente Baja
SI	1.52	MEDIANAMENTE POBRE	Baja	Sin actividad
PH	1.82	MEDIANAMENTE POBRE	Ideal	Moderadamente Baja
BE	5.30	RICO	Ideal	Ideal

<b>Cuadro 28. Nitrógeno y respiración en los sitios evaluados</b>				
Unidad	Nitrógeno		I.R.E.t. NaOH	I.R.E.t. KOH
	Valor	Criterio		
SN-CC	0.136	MODERADAMENTE RICO	Moderadamente Baja	Baja
SN-SC	0.120	MEDIO	Baja	Baja
AT	0.098	MODERADAMENTE POBRE	Moderadamente Baja	Baja
PR	0.109	MEDIO	Media	Moderadamente Baja
RA	0.087	MODERADAMENTE POBRE	Ideal	Media
MA-SS	0.060	POBRE	Media	Baja
MC-SS	0.221	RICO	Media	Moderadamente Baja
HF	0.221	RICO	Moderadamente Baja	Moderadamente Baja
MD	0.059	POBRE	Ideal	Moderadamente Baja
SI	0.068	MODERADAMENTE POBRE	Baja	Sin actividad
PH	0.078	MODERADAMENTE POBRE	Ideal	Moderadamente Baja
BE	0.193	RICO	Ideal	Ideal

**b) Figuras del área de estudio**



**Figura 20.** Características del dispositivo utilizado en la evaluación de la respiración edáfica.



**Figura 21.** Ecosistema: Suelo natural con costra microbiótica.



**Figura 22.** Ecosistema: Suelo natural sin costra microbiótica.



**Figura 23.** Agroecosistema: Agricultura de temporal.



**Figura 24.** Unidad de cultivo: Parcela de riego.



**Figura 25.** Unidad de cultivo: Riego auxiliar.



**Figura 26.** Ecosistema: Mezquital abierto de suelos salinos.



**Figura 27.** Ecosistema: Mezquital cerrado de suelos salinos.



**Figura 28.** Unidad de cultivo: Huerto familiar.



**Figura 29.** Ecosistema: Mezquital en proceso de desmonte.



**Figura 30.** Unidad de agostadero: Suelos inundables.



**Figura 31.** Unidad de agostadero: Pastizal halófito.



**Figura 32.** Bosque Banxú, Fuente: Hernández, 2012.

