

# **REPORTE FINAL**

## **Muestreo de carbono en suelos dentro de ranchos de ganadería convencional y sostenible en Chihuahua, México**

Por:

**Fernando Paz, Víctor Salas y Octavio Castelán**

**30/06/2022**

## CONTENIDO

Índice de Cuadros .....	iii
Índice de Figuras .....	iv
Anexos .....	vi
1. Antecedentes y Contexto .....	8
1.1 Mercados del carbono voluntario y sus certificaciones / estándares / protocolos.....	8
1.2 Ganadería regenerativa: un análisis crítico .....	10
2. Metodologías de análisis.....	12
2.1 Selección de los ranchos ganaderos .....	12
2.2 Caracterización de los ranchos ganaderos (potreros).....	12
2.3 Delimitación de unidades de paisaje homogéneas en los potreros.....	13
2.4 Variables seleccionadas, campaña de pre-muestreo y unidad de muestreo y .....	17
2.5 Pruebas estadísticas de comparación de promedios para el caso de profundidad fija ...	25
2.6 Pruebas estadísticas de comparación de promedios para el caso de masa fija.....	26
2.7 Detección de cambios de los promedios .....	27
2.8 Indicadores de la salud del agostadero .....	28
2.9 Estimación de emisiones de la fermentación entérica del ganado .....	30
3. Selección y caracterización de los ranchos ganaderos.....	31
.....	31
3.1 Descripción de los potreros .....	32
3.2 Ranchos con Manejo Regenerativo.....	36
3.2.1 Rancho Carretas .....	36
3.2.2 Rancho El Chamizo .....	37
3.2.3 Rancho Los Robles .....	38
3.2.4 Rancho El Uno (Potrero La Bascula).....	39
3.3 Ranchos con Manejo Convencional.....	41
3.3.1 Rancho La Enramada.....	41
3.3.2 Rancho Loma Colorada .....	42
3.3.3 Rancho Cerro Colorado .....	42
3.3.4 Rancho El Uno (Potrero El Bosque).....	43

4.	Caracterización de Ranchos, Diseño Muestral y Campaña de Pre-Muestreo.....	45
4.1	Caracterización de Ranchos y Potreros .....	45
5.	Campaña de Pre-Muestreo y Levantamiento de Muestras .....	47
5.1	Mapas de unidades de paisaje homogéneas y puntos muestreados durante el pre-muestreo 47	
6.	Diseño de la Campaña de Muestreo Final .....	56
6.1	Diferencia Mínima Detectable .....	56
6.2	Determinación del número de muestras del muestreo final .....	56
7.	Fase de Muestreo Final .....	58
8.	Indicadores de Salud del Agostadero.....	66
9.	Revisión del Análisis de la Campaña de Pre-Muestreo .....	69
10.	Resultados generales para el caso de profundidad fija .....	72
11.	Resultados generales para el caso de masa fija.....	77
11.1	Análisis para el caso de masa fija.....	77
11.1.1	Resultados para el caso de masa fija.....	77
12.	Emisiones de metano por fermentación entérica .....	79
13.	Conclusiones y recomendaciones .....	81
14.	Referencias Bibliográficas .....	83

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Índices geomorfométricos generados para los ranchos de estudio .....	14
Cuadro 2. Variables consideradas en los análisis del COS.....	18
Cuadro 3. Caracterización de la reacción a carbonatos del suelo .....	24
Cuadro 4. Formato de información de las muestras pre-procesadas. ....	24
Cuadro 6. Ranchos y potreros seleccionados, con sus superficies. ....	32
Cuadro 7. Ciclos de manejo y duración de los potreros seleccionados. ....	32
Cuadro 8. Capacidades de carga y prácticas de manejo utilizadas en los potreros .....	33
Cuadro 9. Capacidades de carga por ciclo de los potreros seleccionados .....	33
Cuadro 10. Especies de plantas de la dieta animal en los potreros seleccionados.....	34
Cuadro 11. Temperatura mínima promedio mensual en los potreros seleccionados.....	35
Cuadro 12. Precipitación promedio mensual en los potreros seleccionados .....	36
Cuadro 13. Pruebas de <i>t</i> de Student para análisis de diferencias significativas de los promedios muestrales. ....	46
Cuadro 14. Número de muestras recolectadas en la fase de pre-muestreo. ....	47
Cuadro 14. Resultados de las estimaciones del número de muestras final y adicional requerido para un DMD potencial mínima. ....	57
Cuadro 15. Número de muestras recolectadas en el muestreo final. ....	58
Cuadro 16. Textura y pH de la campaña de pre-muestreo.....	69
Cuadro 17. Análisis de los requerimientos de muestras finales y adicionales para la campaña de muestreo final.....	71
Cuadro 18. Estimaciones de promedios y varianzas ponderadas por superficie de las UPH en cada potrero, caso PF. ....	73
Cuadro 19. Resultados de la prueba <i>t</i> de Student para diferencias en promedios del COS, caso PF. ....	73
Cuadro 20. Estadísticos de la textura del suelo, DAP y FGM. ....	74
Cuadro 21. Estadísticos del COS, pH, CO <sub>3</sub> y CIS. ....	75
Cuadro 22. Estimaciones de promedios y varianzas ponderadas por superficie de las UPH en cada potrero, caso MF .....	78
Cuadro 23. Resultados de la prueba <i>t</i> de Student para diferencias en promedios del COS, caso MF. ....	78
Cuadro 24. Emisiones acumuladas de metano para el periodo 2018-2022 de los potreros.....	79
Cuadro 25. Promedio anual de emisiones CH <sub>4</sub> y secuestro COS. ....	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación espacial de los siete ranchos utilizados para los sitios de muestreo.....	31
Figura 2. Ubicación espacial del potrero seleccionado “Las Yeguas” con manejo regenerativo en Rancho Carretas, Chihuahua.....	37
Figura 3. Ubicación espacial del potrero seleccionado “La Sabaneta” con manejo regenerativo en Rancho El Chamizo, Chihuahua. ....	38
Figura 4. Ubicación espacial del potrero seleccionado “Cordón de Lico” con manejo regenerativo en Rancho Los Robles, Chihuahua. ....	39
Figura 5. Ubicación espacial del potrero seleccionado “La Bascula” con manejo regenerativo en Rancho El Uno, Chihuahua.....	40
Figura 6. Ubicación espacial del potrero seleccionado “La Enramada Vieja” con manejo convencional en Rancho La Enramada, Chihuahua. ....	41
Figura 7. Ubicación espacial del potrero seleccionado “El Papalote” con manejo convencional en Rancho Loma Colorada, Chihuahua. ....	42
Figura 8. Ubicación espacial del potrero seleccionado “Cerro Colorado” con manejo convencional en Rancho Cerro Colorado, Chihuahua. ....	43
Figura 9. Ubicación espacial del potrero seleccionado “El Bosque” con manejo convencional en Rancho El Uno, Chihuahua.....	44
Figura 10. Mapas de predicción del carbono orgánico en el suelo.....	16
Figura 11. Pasos para el procesamiento de las unidades de paisaje homogéneas.....	17
Figura 12. Unidad de muestreo propuesta .....	21
Figura 13. Enumeración de los sitios de muestreo en la unidad de muestreo. ....	22
Figura 14. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho Carretas con su potrero seleccionado “Las Yeguas” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo cuatro unidades en la UPH 1, tres en la UPH 3 y tres en la UPH 4, contando con diez unidades muestrales en total. ....	48
Figura 15. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho La Enramada con su potrero seleccionado “La Enramada Vieja” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo siete en la UPH 0 y cinco muestras en la UPH 1, contando con 12 unidades muestrales en total. ....	49
Figura 16. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho El Uno con uno de sus potreros seleccionados “La Bascula” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo seis unidades en la UPH 2, cinco unidades en la UPH 3 y tres unidades en la UPH 4, contando con 14 unidades muestrales en total.....	50
Figura 17. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho El Uno con uno de sus potreros seleccionados “El Bosque” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo tres unidades en la UPH 2, tres unidades en la UPH 3 y seis unidades en la UPH 4, contando con 12 unidades muestrales en total.....	51

Figura 18. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho El Chamizo con su potrero seleccionado “La Sabaneta” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo un total de ocho unidades muestrales en la UPH 4.....	52
Figura 18. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho Loma Colorada con su potrero seleccionado “El Papalote” y las unidades de muestreo colectadas por UPH, siendo un total de seis unidades muestrales en la UPH 2.....	53
Figura 19. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho Los Robles con su potrero seleccionado “Cordón de Lico” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo un total de siete unidades muestrales en la UPH 1.....	54
Figura 20. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho Cerro Colorado con su potrero seleccionado y los puntos de muestreo recolectados por UPH, siendo un total de siete unidades muestrales en la UPH 4.....	55
Figura 21. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho Carretas con su potrero seleccionado “Las Yeguas” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo tres unidades en la UPH 1, ocho en la UPH 3 y 17 en la UPH 4, contando con 28 unidades muestrales en total.....	59
Figura 22. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho La Enramada con su potrero seleccionado “La Enramada Vieja” y las unidades de muestreo colectadas por UPH, siendo tres unidades en la UPH 0 y 14 unidades en la UPH 1, contando con 17 unidades muestrales en total. ....	60
Figura 23. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho El Uno con uno de sus potreros seleccionados “La Bascula” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo una unidad en la UPH 3 y una unidad en la UPH 4, contando con dos unidades muestrales en total. ....	61
Figura 24. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho El Uno con uno de sus potreros seleccionados “El Bosque” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo 11 unidades en la UPH 2 y 17 unidades en la UPH 3, contando con 28 unidades muestrales en total. ....	62
Figura 25. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho El Chamizo con su potrero seleccionado “La Sabaneta” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo un total de 11 unidades muestrales en la UPH 4.....	63
Figura 26. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho Los Robles con su potrero seleccionado “Cordón de Lico” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo un total de 14 unidades muestrales en la UPH 1.....	64
Figura 27. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho Cerro Colorado con su potrero seleccionado y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo un total de 14 unidades muestrales en la UPH 4.....	65

## RESUMEN EJECUTIVO

La ganadería convencional asociada a prácticas de sobrepastoreo es una de las principales causas de la degradación de los ecosistemas terrestres en México, por lo que es necesario un cambio de paradigma en las prácticas ganaderas. La ganadería regenerativa o sustentable ofrece una vía de desarrollo con potencial de mitigación de gases efecto invernadero, además de la conservación de la biodiversidad.

El presente proyecto busca evaluar las diferencias en el almacén del carbono orgánico de los suelos (COS), y otros factores, entre la ganadería convencional y la regenerativa a través de un proceso de selección de ranchos pareados (convencional y regenerativo) minimizando las diferencias en los factores que inciden en la COS. Con la consideración de que los potreros (cercados) de los ranchos son la población por evaluar, dado que representan las condiciones de manejo de los ranchos, el muestreo de la COS fue orientado a esta unidad de población.

La selección y caracterización, de los ranchos ganaderos fue basada en que los de tipo regenerativo tuvieran estas prácticas de manejo en los últimos cinco años. A la par de esta selección (cuatro ranchos) se buscaron ranchos con manejo convencional en áreas aledañas con características edáficas, geomorfológicas y uso del suelo y vegetación relativamente similares. De esta manera se obtuvieron potreros de los ranchos con características razonablemente similares para poder ser comparados.

Para caracterizar la heterogeneidad espacial de los potreros, se definieron unidades homogéneas del paisaje (UPH) con base a información del COS del suelo disponible en México, además de datos de textura del mismo, índices geomorfométricos, variables meteorológicas, usos del suelo y vegetación e índices de vegetación obtenidos de imágenes satelitales. Las UPH definidas fueron la base para el diseño de la campaña de pre-muestreo en campo.

Para el diseño muestral se planteó una primera campaña de pre-muestreo de los potreros bajo dos objetivos: selección de la unidad de muestreo y diseño de la fase final de la campaña de muestreo. Para la selección de la unidad de muestreo se planteó una superficie de 1000 m<sup>2</sup>, con nueve puntos de colecta de muestras, profundidad de 0 a 30 cm, distribuidos sobre los cuadrantes de un círculo. El muestreo alternativo consistió del uso de cinco puntos de muestreo del suelo, reduciendo el esfuerzo y tiempo de la colecta de muestras. Para esto, la campaña de pre-muestreo colectó muestras en campo para su análisis en laboratorio y la evaluación estadística de las diferencias entre los dos esquemas de unidades de muestreos. El número de unidades de muestreo realizados en la campaña de pre-muestreo estuvo entre tres y ocho, dependiendo del tamaño de las UPH. En laboratorio se realizaron determinaciones de materia orgánica, y estimaciones de carbono orgánico, textura, pH y carbonatos de los suelos. En campo se realizaron estimaciones de la densidad aparente y pedregosidad de los fragmentos gruesos (> 2mm) de los suelos. Con los datos de laboratorio y campo es posible estimar las densidades del COS en forma robusta y confiable.

Con respecto a la selección de la unidad de muestreo no se encontraron diferencias significativas entre los dos esquemas analizados, por lo que se decidió el uso de una unidad de muestreo con cinco puntos de muestreo: centro, dirección norte, este, sur y oeste.

Para determinar el número de muestras requerido para la caracterización de las UPH definidas, se realizaron análisis de la diferencia mínima detectable (DMD) de los cambios esperados en las unidades de muestreo pareadas (mismas unidades en el tiempo) para un periodo de cinco años. La DMD potencial; es decir, los cambios esperados a futuro, se definió de meta-análisis de la literatura mundial y regional, definiéndose cambios esperados mínimos de  $0.7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y máximos de  $1.1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . De acuerdo con los valores definidos de la DMD potencial, se realizaron análisis estadísticos para definir el número de muestras adicionales para caracterizar el COS de las UPH, con algunos casos de reconsideración del número de UPH por potrero, dadas las superficies de las UPH y la homogeneidad de las variaciones observadas del COS.

Con los datos de la campaña de pre-muestreo y la final, se procedió a realizar análisis estadísticos para detectar diferencias significativas entre las densidades promedio de los potreros con diferentes tipos de manejo ganadero. Para este fin se depuro la base de datos para inconsistencias encontradas en las estimaciones de la densidad aparente, producto de errores de muestreo o valores anómalos. Con la base de datos depurada, los análisis estadísticos realizados encontraron diferencias significativas en las densidades promedio de tres pares de ranchos (potreros), rancho El Uno (potreros El Bosque y La Báscula), Rancho Loma Colorada (El Papalote) y rancho El Chamizo (La Sabaneta), rancho La Enramada (La Enramada Vieja) y Rancho Carretas (Las Yeguas); y solo en un par de ranchos no se encontraron diferencias significativas, rancho Cerro Colorado (Cerro Colorado) y rancho Los Robles (Cordón de Lico). Estos resultados pueden ser debidos a múltiples factores, principalmente la textura del suelo, densidad aparente y fragmentos gruesos, por lo que deben considerarse con cautela en su interpretación generalizada, pero fundamentan muestreos adicionales (mismas unidades muestrales) a futuro para tener una mejor idea de los cambios de las densidades del COS debidas a diferentes prácticas de manejo. En el caso del rancho El Uno, la densidad promedio de COS fue mayor en el potrero El Bosque (manejo convencional) que en el potrero La Bascula (manejo regenerativo). Esto puede ser por una mala caracterización inicial de los potreros, lo cual se refleja en la condición del agostadero en los potreros

Finalmente, para realizar estimaciones de la emisión de metano debida a la fermentación entérica del ganado, se intentó utilizar el modelo GLEAM de FAO, pero debido a la escala operativa del modelo se decidió no utilizarlo. Como alternativa se realizaron estimaciones usando la metodología asociada al *tier 2* el IPCC, con factores de emisión y datos de actividad regionales y representativos de la situación de la ganadería en México. Los resultados obtenidos marcan fuertes diferencias en las emisiones de metano entre la ganadería convencional y la regenerativa, principalmente como producto del manejo ganadero regenerativo (alta intensidad y corta duración del pastoreo) en relación al manejo convencional (baja intensidad y alta duración). En todos los ranchos y potreros analizados se encontró un balance de emisiones negativo, donde las emisiones de los potreros regenerativos emiten más metano que los de manejo convencional. El balance de las comparaciones de los manejo convencional y regenerativo muestran que los potreros con

manejo holístico emiten mucho más de lo que secuestran, en términos de promedios anuales por unidad de superficie.

Los resultados obtenidos en este trabajo sostienen la hipótesis de que el manejo convencional secuestra menos COS que el regenerativo, con algunos resultados inconsistentes (mayor densidad de COS en potrero convencional con relación al regenerativo). Los resultados encontrados tienen incertidumbre no cuantificada, la cual es producto de las incertidumbres asociadas a comparar potreros con condiciones físicas, químicas y ambientales con posibles diferencias no cuantificadas. Las recomendaciones están orientadas a dar seguimiento a los resultados obtenidos para analizar cambios a futuro producto de los diferentes tipos de manejo ganadero, aunque se recomienda el manejo sostenible de los ranchos con mejores prácticas de manejo.

## 1. Antecedentes y Contexto

La ganadería en México representa una actividad importante en el sector rural (SIAP-SAGARPA, 2018) y se encuentra extendida en más de la mitad de la superficie de los ecosistemas terrestres del país, donde casi la mitad de la superficie ganadera presenta indicadores de sobrepastoreo (SEMARNAT, 2014), contribuyendo a la degradación de los ecosistemas.

En términos de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), particularmente metano ( $\text{CH}_4$ ), la fermentación entérica (eructos) del ganado genera importantes emisiones (INECC-SEMARNAT, 2018), por lo que se requiere mitigar estos gases con un manejo ganadero sustentable, sujeto a las condiciones climáticas imperantes en el país.

De las emisiones de GEI reportadas y la degradación de los ecosistemas terrestres y su impacto en la biodiversidad, se han promovido prácticas mejoradas del manejo ganadero. La ganadería regenerativa (Savory y Butterfield, 2016) es una estrategia de manejo ganadero orientada a incrementar el secuestro de  $\text{CO}_2$  (suelo y vegetación). La ganadería regenerativa está caracterizada por pastoreo de alta intensidad (carga animal total en pequeñas superficies de un rancho) y baja frecuencia (poco tiempo de pastoreo). Esta actividad somete a estrés a la vegetación permitiéndole un crecimiento más dinámico durante el descanso, así como el aprovechamiento de los nutrientes dejados por las excretas del ganado y orina, aunado al pisoteo del terreno por los animales que incrementa la infiltración del agua, hipótesis básicas en el manejo regenerativo.

El secuestro de carbono orgánico en los suelos (COS) asociado al manejo regenerativo de la ganadería ha sido promovido en los mercados voluntarios del carbono como estrategia de mitigación al cambio climático,

### *1.1 Mercados del carbono voluntario y sus certificaciones / estándares / protocolos*

La estrategia de mitigación del cambio climático en el sector agricultura, uso del suelo y forestería esta siendo enfatizado como una solución para secuestrar carbono y reducir las emisiones de gases efecto invernadero. Las soluciones climáticas naturales (Griscom *et al.*, 2017) tienen un fuerte potencial de incidir en la mitigación al cambio climático, donde el secuestro de carbono orgánico en los suelos representa el 25 % del potencial, con 40 % ligado a la protección del COS existente

y 60 % debido a la reconstrucción del COS agotado (Bossio *et al.*, 2020). No obstante, el potencial de secuestro del COS o evitar emisiones, estas expectativas deben tomarse con precaución, dado que el secuestro está limitado en tiempo y es reversible (Godde *et al.*, 2020). En el pastoreo de ganado, generalmente se emite más de lo que se secuestra (Godde *et al.*, 2020), por lo que los análisis deben considerar los balances de gases efecto invernadero.

El analizar los cambios en el COS producto de actividades de manejo tiene el reto de la detectabilidad producto de los pequeños cambios en los almacenes de COS en tiempos cortos (5 años), lo que es impedimento en la implementación de certificaciones de los mercados del carbono (Jacobs *et al.*, 2020) o su contribución a las contabilidades nacionales de emisiones (White, 2022).

La promoción de certificaciones o estándares para el COS ha sido propuesta (Jacobs *et al.*, 2020), aunque los protocolos de certificación actuales consideran diferentes enfoques de cuantificación del COS y diferentes conceptos de adicionalidad, permanencia y fugas que indica una falta de estandarización y comparabilidad que se traduce en incertidumbres que hacen riesgoso la generación de bonos o créditos del carbono (Oldfield *et al.*, 2021), por lo que se requiere nuevos estándares que consideren la dinámica del COS y su estandarización (Bispo *et al.*, 2017).

Hay diferentes certificaciones de actividades donde el COS es una parte importante (VCS, 2012c, 2020; CAR, 2020; Gold Standard, 2020; CAR, 2022). Los factores o actividades incidentes en el secuestro del COS han sido analizadas (CAR, 2011), así como las diferentes metodologías de medición y modelación del COS (CAR, 2019). Los enfoques de evaluación del COS utilizan esquemas diferentes: medir y remediar, medir y modelar, principalmente (CAR, 2019, 2020, 2022, VCS, 2020). Las cuantificaciones del COS siguen guías del IPCC (2003), tal como VCS (2012c) o Gold Standard (2020) que utiliza IPCC (2019) para estimar los factores de cambio de los almacenes del COS.

El protocolo de VCS (2012b) presenta una metodología para estimar los almacenes del COS, consistente en la realización de un pre-muestreo para caracterizar la variabilidad del COS y otros atributos para el diseño estadístico de un muestreo orientado a este fin. También considera todos los factores asociados a la determinación del COS, tales como la concentración de carbono orgánico, densidad aparente del suelo, profundidad y fragmentos gruesos del suelo (> 2 mm), para evitar sobre estimaciones. Este protocolo es la base de la metodología de este proyecto, lo cual es discutido más adelante.

El tipo de muestreo de los suelos más utilizado es el muestreo estratificado, el cual está basado en la delimitación de estratos o clases de los objetos con propiedades similares a través del análisis de los factores o atributos que contribuyen a definir sus rasgos característicos (VCS, 2012a). Delimitados los estratos, promedios y desviaciones estándar, el siguiente paso consiste en asignar el número de muestras a cada estrato (Pearson *et al.*, 2007; UNFCCC, 2010). A diferencia del muestreo aleatorio simple (un solo estrato), el muestreo estratificado requiere de menos muestras.

En el caso del proyecto, la metodología de muestreo difiere del enfoque clásico de muestreo estratificado, ya que esta orientada a analizar los cambios entre dos tipos de manejo ganadero, en un plazo de cinco años. El uso de la diferencia mínima detectable (Zar, 2010) de cambios implica

requerimientos del número de muestras que pueden diferir de los requerimientos del muestreo estratificado clásico.

Para el monitoreo de los cambios del COS se pueden utilizar los sistemas de medición / monitoreo, reporte y verificación (MRV) estandarizados (FAO, 2020; The World Bank, 2021).

En lo general, las metodologías utilizadas en el proyecto fueron diseñadas para el análisis de cambio y, dentro de las limitaciones, definir líneas base para la implementación de certificaciones del mercado voluntario del carbono.

### *1.2 Ganadería regenerativa: un análisis crítico*

La ganadería regenerativa, usada como sinónimo del manejo holístico ganadero (Gosnell *et al.*, 2019) propuesto por Allan Savory (Savory y Parsons, 1980; Savory, 1983; Savory, 1988; Savory y Butterfield, 2016), ha sido promovida en México para el manejo sustentable de los ranchos ganaderos (Aguirre y Hoth, 2008; Hoth, 2012; Grupo Ecológico Sierra Gorda, IAP, 2016). El Savory Instituto fue fundado por Savory para promoción y capacitación sobre las bases de la ganadería holística. Aunque no hay una definición regulatoria o legal del término ganadería regenerativa (Newton *et al.*, 2020), Shereefel *et al.* (2020) analizó las convergencias y divergencias entre objetivos y actividades de la ganadería regenerativo y encontró que el punto de partida en común es la conservación de los suelos.

La ganadería holística (Savory y Parsons, 1980; Savory, 1983; Savory, 1988; Savory y Butterfield, 2016) consiste en dividir un rancho ganadero en múltiples potreros cercados, donde se introduce una alta capacidad de carga animal por tiempos cortos en el periodo de crecimiento de la vegetación y después se descansa el potrero para su recuperación, rotándose los potreros. Este tipo de manejo propone un alto crecimiento de la vegetación y secuestro de carbono en el suelo, entre otras mejoras. Por esta razón se ha promovido duplicar o aún más, la capacidad de carga de los ranchos ganaderos, independientemente del estado de la condición de los ranchos.

El manejo holístico propone un sistema de planeación adaptativo donde se van realizando ajustes a las capacidades de carga, tiempos de pastoreo y descanso de acuerdo al monitoreo de indicadores del estado de los pastizales y manejo del ganado, así como de otros indicadores. El manejo holístico considera varias dimensiones del manejo ganadero: ecológica o ambiental, económica y social / personal para definir sus principios y toma de decisiones (Teague *et al.*, 2013; Teague y Kreuter, 2020; Gosnell *et al.*, 2020).

Las hipótesis en que se basa el manejo holístico son:

- Las comunidades de plantas y suelos en zonas áridas y semiáridas de sistemas de pastizales o agostaderos han evolucionado en la presencia de grandes manadas de animales reguladas por sus depredadores.
- Los pastos en estas áreas se volverán decadentes y morirán si no son pastoreados por estas grandes manadas o, en su visión moderna, por el ganado.
- El descanso del pastoreo por estas grandes manadas resultara en la degradación del pastizal.

- Grandes manadas son necesitadas para romper el material decadente de las plantas y las costras del suelo, con el pisoteo, orina, excretas y semillas en el suelo se promoverá el crecimiento de las plantas.
- Una alta intensidad de pastoreo por el ganado en estas tierras revertirá la desertificación y el cambio climático al incrementar la producción y cubierta del suelo, por lo que se almacenará más carbono.

Briske *et al.* (2008) han cuestionado el pastoreo rotativo como manejo superior al pastoreo continuo convencional, argumentando que no se encontró evidencia experimental que soportara una mejoría en la producción vegetal o productividad animal (por cabeza y superficie).

Una revisión de las principales hipótesis del manejo holístico fue realizada por Briske *et al.* (2013) como respuesta al video promocional de Savory (2013), donde no encontró soporte científico para las aseveraciones hechas; aunque la crítica de Briske y colegas ha sido cuestionada (Teague, 2014; Grissom, 2014; Cibils *et al.*, 2014), aduciendo que la visión reduccionista utilizada en la crítica no está de acuerdo con la visión holística de considerar múltiples perspectivas del manejo (Teague, 2014; Grissom, 2014; Teague *et al.*, 2013; Teague y Kreuter, 2020; Gosnell *et al.*, 2020). Briske *et al.* (2014) han señalado que la mayor contribución de la ganadería holística es la planeación adaptativa, ya que permite realizar ajustes en la toma de decisiones del pastoreo a través del monitoreo del mismo y la condición del ganado, además de indicadores económicos, sociales y personales.

En lo general, la aceptación del manejo holístico por parte de los ganaderos es positiva (Stinner *et al.*, 1997; Grissom, 2014; Sherren y Kent, 2017; Gosnell *et al.*, 2020a, b), particularmente por la perspectiva socio-ecológica usada y no por la mitigación al cambio climático (Gosnell *et al.*, 2020a). En esta perspectiva, Sherren *et al.* (2012) ha propuesto que la ganadería holística debe incentivarse con financiamiento y políticas públicas; aunque esta posición ha sido cuestionada por Briske *et al.* (2014) por no estar soportada con suficiente información y por los resultados contradictorios encontrados.

El secuestro de carbono en los suelos ha sido justificado y definido su potencial en la ganadería holística (Savory Institute, 2013). Los estudios que soportan mejoría en el suelo y secuestro de COS son escasos: McCosker (2000) señala incrementos en el fósforo (P); Teague *et al.* (2011) y Ferguson *et al.* (2013) muestran incrementos en el COS, pero con diferencias no significativas con relación al manejo convencional. Xu *et al.* (2018) y DeLonge y Basche (2018) muestran incrementos de la infiltración del agua y COS con el pastoreo.

Con relación al soporte científico de las hipótesis de la ganadería holística y su mejoría en la condición de la vegetación y ganado, los análisis no encontraron evidencia de mejoras (Skovlin, 1987; O'Regain y Turner, 1992) o resultados negativos (Hollenchek *et al.* (2000). Willms *et al.* (1990) muestra incrementos del COS mayores en áreas protegidas que en las pastoreadas. Alfaro-Arguello *et al.* (2010) han observado mejorías en la sostenibilidad de los ranchos con manejo holístico, pero no en la producción de leche o carne.

Las publicaciones de meta-análisis de comparaciones de ganadería holística versus la convencional no han encontrado diferencias en los resultados y secuestro de COS, además de falta de soporte de

las hipótesis del manejo holístico (Carter *et al.*, 2014; Nordborg, 2016; Garnett *et al.*, 2017); aunque se ha planteado que son producto de visiones reducidas del manejo holístico, que también presenta resultados positivos de meta-análisis (Gosnell *et al.*, 2020b).

En lo particular, el efecto de sequías extremas es un factor crítico en todos los sistemas de pastoreo, ganadería holística incluida (Hollenchek, 2000). Por ejemplo, Molinar *et al.* (1998) han discutido el caso de la sequía de 1993-1996 en México, donde los ganaderos holísticos tuvieron que realizar fuertes ajustes de las capacidades de carga (puestas al doble) para adaptarse a las nuevas condiciones.

Con relación a la biodiversidad, Morris (2021) encontró en un meta-análisis que los resultados fueron no conclusivos de los efectos de la ganadería holista, con resultados mejores, peores o iguales que la ganadería convencional. Además, en otro meta-análisis, Filazzola *et al.* (2020) encontró que la exclusión del pastoreo incrementa la biodiversidad, particularmente en los niveles altos de la cadena trófica. Aunque hay casos de incremento de la composición y diversidad de la vegetación producto de la ganadería holística (Molina-Guerra *et al.*, 2013), la percepción común de los ganaderos holísticos es de resultados positivos (Stinner *et al.*, 19979).

Finalmente, el manejo holístico aduce que los gases efecto invernadero como el metano y el óxido nitroso están desacoplados de sus emisiones, por lo que se obtienen balances positivos de las emisiones (Savory Institute, 2015). Esta posición no está soportada por la evidencia científica, por lo que es necesario hacer balances de emisiones netas en las evaluaciones (Garnett *et al.*, 2017).

## 2. Metodologías de análisis

En esta sección se presentan las actividades y métodos utilizados para definir las comparaciones de los contenidos de la densidad del carbono orgánico de los suelos (COS) de los ranchos (potreros) analizados en el proyecto.

### 2.1 Selección de los ranchos ganaderos

Para los análisis de la distribución del carbono orgánico de los suelos en los ranchos ganaderos se trabajó con la asociación civil Manejo de Ranchos Regenerativos A.C. para la selección de ranchos ganaderos con manejo regenerativo. Posteriormente se buscaron ranchos cercanos, con mismo suelo y vegetación y con manejo convencional para tener ranchos pareados para su comparación.

### 2.2 Caracterización de los ranchos ganaderos (potreros)

Al considerar que el manejo ganadero en los ranchos se da nivel de potreros (áreas cercadas), La unidad poblacional definida fue el potrero de cada rancho. La caracterización de los ranchos ganaderos con manejo convencional y regenerativo plantea un esquema de muestreo basado en prácticas de manejo ganadero. Esto es, en vez de considerar a cada rancho como la población total, debe considerarse a los potreros ganaderos como las unidades territoriales a caracterizar.

Para caracterizar a los ranchos ganaderos, después de su selección y obtención de la poligonal envolvente, consistió en obtener información del rancho en general y sus potreros.

El protocolo de caracterización inicial consistió en la definición de todos los potreros (separados por cercos con alambre) en cada rancho. Para esto fue necesario contar con la siguiente información en un GIS:

- Poligonal envolvente con sus coordenadas geográficas (**Anexo 1: Poligonal Ranchos y Potreros**).
- Topografía dentro de la envolvente de cada rancho.
- Imagen satelital de alta resolución.

Con la información previa se realizó una superposición de la imagen satelital en la topografía (3D) del rancho para la ubicación de rasgos geográficos a definir.

De acuerdo a consultas con el encargado de cada rancho, se delimito los cercos de los potreros, con sus nombres asociados, usando el mapa 3D, así como la ubicación de fuentes de agua y corrales de manejo y suplementación (p.ej. sales). Adicionalmente, con el uso del GPS e información del encargado del rancho, se ubicaron las vías de acceso (caminos, brechas, etc.) dentro del rancho. Al arribo al rancho se inició el proceso de ubicación de los caminos. Para cada potrero fue necesario recabar la siguiente información:

- Nombre del potrero
- Delimitación geográfica del potrero y sus rasgos
- Uso temporal del potrero (condiciones promedio de los últimos 5 años): ciclos de manejo, mes inicio, mes final, duración, capacidad de carga animal total, prácticas de manejo utilizadas.
- Capacidad de carga animal por ciclo (condiciones promedio de los últimos 5 años): número de vacas, toros, vaquillas, novillos, becerros, crías hembra y crías macho.
- Prácticas de mejoría de la productividad o de manejo holístico.

Toda la información recopilada fue puesta en una base de datos de Excel y se uso para generar la memoria descriptiva de cada rancho.

### *2.3 Delimitación de unidades de paisaje homogéneas en los potreros*

La estratificación de la tierra es requerida para poder mejorar las estimaciones de los almacenes de carbono. El objetivo de la estratificación es minimizar la variabilidad en las estimaciones de carbono dentro de una categoría (VCS, 2012). En este trabajo se determinaron unidades de paisaje homogéneas (UPH) las cuales fueron tomadas en cuenta para realizar la fase del pre-muestreo. Las variables para definir las UPH se identificaron de acuerdo con las metodologías de FAO (2019) y Guevara *et al.* (2020). Aunado a lo anterior, las covariables usadas en este trabajo fueron creadas por el Programa Mexicano del Carbono a una escala espacial más fina (1:50,000) la cual es recomendada para trabajar a nivel de potrero para el mapeo del carbono orgánico del suelo (FAO, 2019). La poligonal del rancho y el potrero asociado fue obtenida del dueño/encargado de cada rancho (**Anexo 1: Poligonal Ranchos y Potreros**)

La primera variable usada para procesar las UPH fue el vector de uso de suelo y vegetación escala 1:50,000 (PMC, 2015) (Serie 6.5), el cual fue procesado en el año 2016 para todo el país. También para identificar los cambios de uso de suelo a lo largo de los años se usaron las capas de uso de suelo y vegetación de las series 2, 2.5, 3, 4, 5 y 6. Los vectores fueron rasterizados para su posterior procesamiento. El **Anexo 2. Uso de Suelo y Vegetación** contiene la cartografía temática y los datos vectoriales de esta variable para los ranchos seleccionados

A partir de la base geomorfométrica nacional (Salas y Paz, 2017) se extrajeron seis índices geomorfométricos para cada uno de los ranchos. El Cuadro 1 presenta la descripción de los índices. El **Anexo 3. Índices Geomorfométricos** contiene los mapas morfométricos y la información rasterizada para los ranchos.

Para la construcción de métricas derivadas de índices de vegetación se usó el índice de vegetación unificado para cuantificar la biosfera terrestre, KNDVI, (Camps *et al.*, 2021) para los años 2015 a 2021 y se procesaron las siguientes métricas:

- El promedio anual de KNDVI
- El valor máximo de KNDVI en el periodo de mayo a finales de octubre en los años mencionados
- El valor promedio de KNDI en el periodo de mayo a finales de octubre en los años mencionados

**Cuadro 1. Índices geomorfométricos generados para los ranchos de estudio**

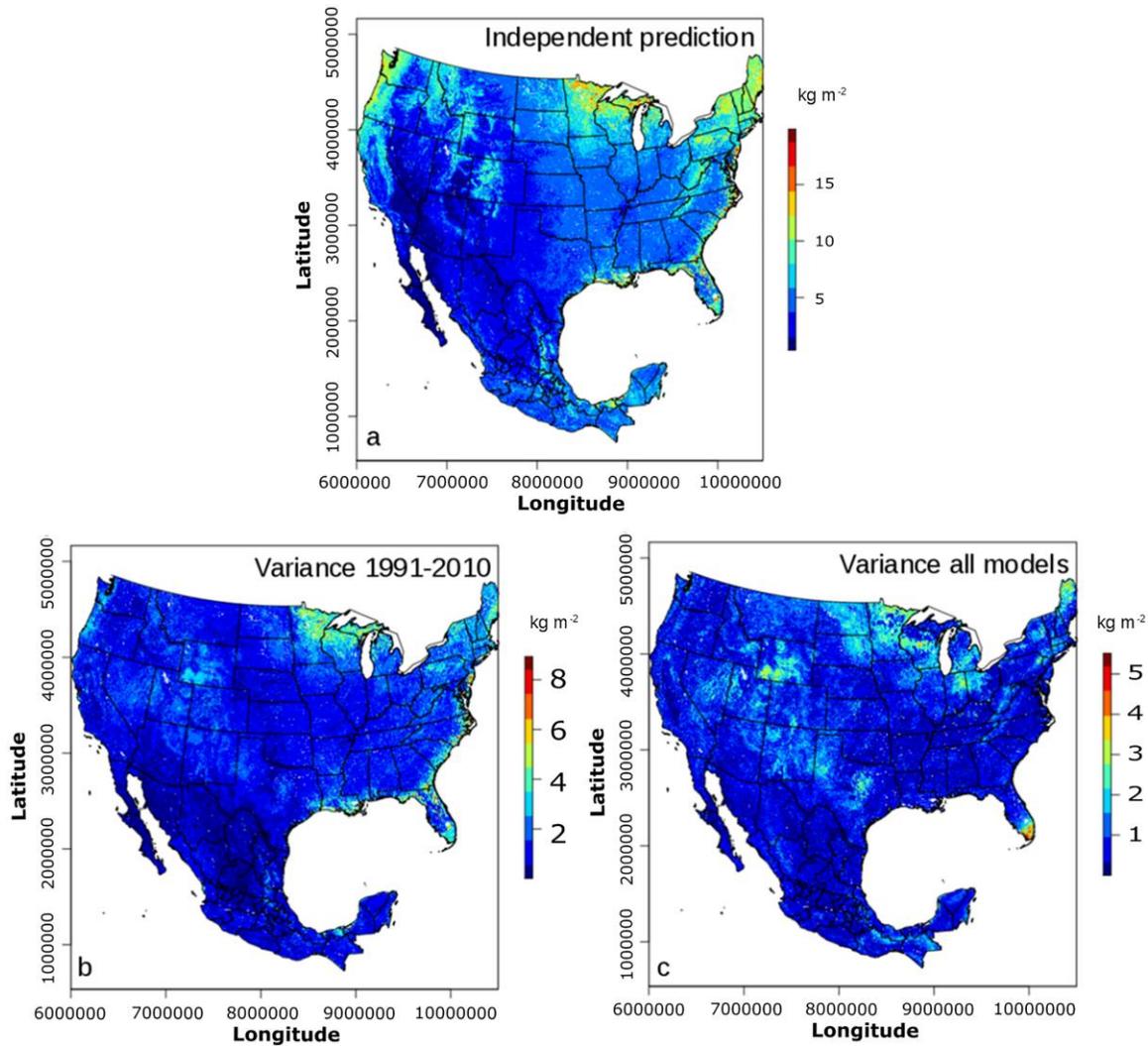
Parámetro geomorfométrico	Descripción
Convexidad	Utiliza la segunda derivada de un valor de elevación, el algoritmo produce valores altos en áreas convexas y valores bajos en áreas cóncavas.
Índice topográfico de la pendiente (ITP)	Compara el valor de un píxel del modelo digital de elevación, con respecto al valor medio de sus vecinos. Los valores positivos corresponden a píxeles con mayor altitud con respecto al área de referencia. Por su parte, valores negativos corresponden a píxeles con menor altitud respecto al área de referencia.
Altura-Pendiente	Mide la cota altitudinal con respecto a la pendiente del terreno.
Posición media de la pendiente (PMP)	Asigna un valor de cero a píxeles que se encuentran a media ladera y el valor de uno a píxeles cercanos a valles y puntos altos del relieve.
Índice de rugosidad del terreno	Mide la heterogeneidad topográfica mediante el cálculo de la desviación estándar de un píxel con respecto a sus ocho píxeles vecinos.
Índice de textura del terreno	Calcula el número de valles y cumbres dentro de un espacio topográfico.

Para el procesamiento de estos índices se usó el satélite Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2a; es decir, con valores de reflectancia de la superficie terrestre.

Los datos de clima para los ranchos fueron obtenidos de la base climática nacional procesada por el Programa Mexicano del Carbono (Salas y Paz, 2018) y la malla TerraClimate (Abazotglu *et al.*, 2018) de la cuales se realizó un cálculo promedio para los años 2015 a 2021 para los ranchos analizados (**Anexo 4. Variables Climáticas**), las variables analizadas fueron:

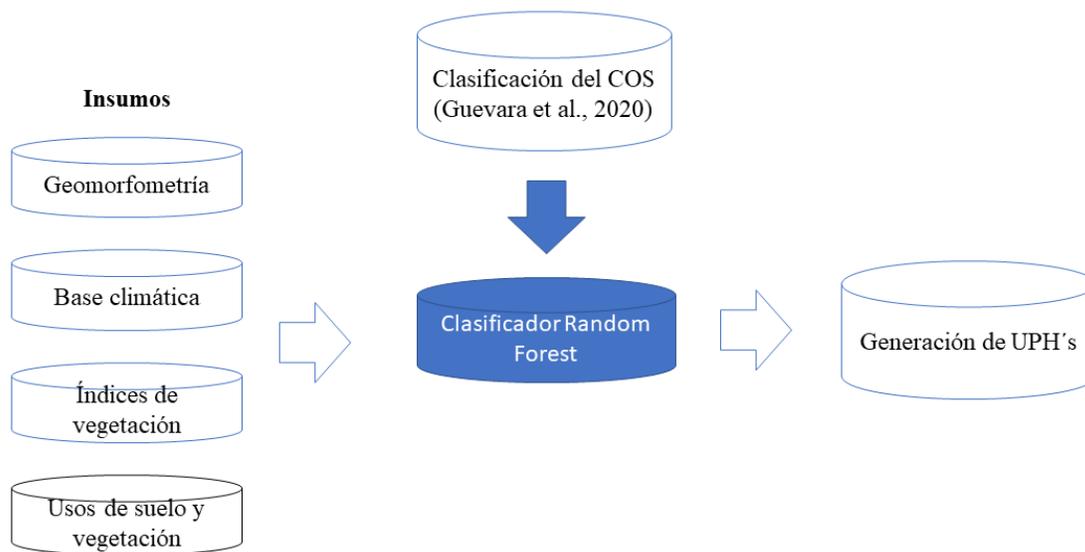
- Temperatura máxima anual (°C)
- Temperatura mínima anual (°C)
- \*• Suma de la evapotranspiración potencial (Penman-Monteith) (mm)
- Suma de la humedad del suelo (mm)

Para definir la estratificación, se consideró al mapa norteamericano de almacenes de carbono en el suelo (COS) (Guevara *et al.*, 2020) como variable dependiente. Este mapa contiene la base de datos de carbono en el suelo ( $\text{kg m}^{-2}$ ) proporcionados por el INEGI para los años 1991 al 2010 (**Anexo 5. Bases de Carbono en el Suelo**), para todo el país (Figura 10). Aunado a lo anterior, se adjunta el **Anexo 6. Base de Datos de Suelo PMC** (Paz y Velázquez, 2018), el cual contiene coordenadas y datos de carbono, además de otros datos complementarios, analizados en Paz *et al.* (2016). La ubicación espacial de cada rancho permitió obtener 5 clases de esta variable para poder aplicar técnicas de *machine learning* (Guevara *et al.*, 2020) y definir las UPHs.



**Figura 1. Mapas de predicción del carbono orgánico en el suelo (Guevara *et al.*, 2020)**

La estratificación de las UPHs se realizó con el uso del modelo Random Forest (Breiman, 2001; Biau y Scornet, 2016), dentro de la plataforma Google Earth Engine. La clasificación del COS mostrado en el apartado anterior fungió como variable dependiente en el proceso y las variables auxiliares descritas se usaron como variables independientes. La Figura 2 presenta en forma esquemática la creación de las UPHs de los ranchos elegidos.



**Figura 2. Pasos para el procesamiento de las unidades de paisaje homogéneas**

#### 2.4 Variables seleccionadas, campaña de pre-muestreo y unidad de muestreo y

La campaña de pre-muestreo está orientada a tener una primera evaluación de métricas de incertidumbre para la planeación de la campaña final complementaria de muestreo orientado a la diferencia mínima detectable (DMD) en los cambios de los almacenes de carbono orgánico de los suelos en los ranchos ganaderos.

La selección de las variables de medición y monitoreo debe estar orientada a los objetivos de la consultoría, la cual estipula que la densidad de carbono orgánico del suelo (COS) es la variable clave a medir y monitorear.

Aunque se han establecido criterios de selección de variables en el proyecto (Cottler, 2020), los indicadores propuestos están orientados a evaluar la calidad o salud de los suelos, donde la materia orgánica del suelo (MOS) es una variable a evaluar. La MOS está relacionada con el COS

Con relación a la variable primaria COS, su cálculo puede ser formulado como (Poeplau *et al.*, 2017; Paz *et al.*, 2019):

$$COS = CO_{ff}DAP(1 - FG_m)P \quad (1)$$

donde  $COS$  está en Mg C/ha,  $CO_{ff}$  es la concentración de carbono orgánico e la fracción fina ( $\leq 2$  mm) del suelo (%),  $DAP$  es la densidad aparente del suelo ( $g/cm^3$ ),  $FG_m$  es la proporción de fragmentos gruesos ( $> 2$  mm) del suelo total en términos de masa (gravimétrico) y  $P$  es la profundidad usada del suelo (cm).

Una alternativa a la relación (1) fue usar el concepto de FSS (*fine soil stock*) (Poeplau *et al.*, 2017):

$$FSS = \left( \frac{masa_{ff}}{volumen_{muestra}} \right) P \quad (2)$$

donde  $masa_{ff}$  es la masa (g) de la fracción fina y  $volumen_{muestra}$  es el volumen de la barrena de extracción hasta la profundidad  $P$  (cm), por lo que el COS (Mg C/ha) puede ser estimado de:

$$FSS = CO_{ff} FSS \quad (3)$$

donde  $CO_{ff}$  está en %.

De acuerdo con las relaciones (1) a (3), el protocolo a nivel de campo y pre-procesamiento fue:

- Determinar el volumen de la barrena (cm<sup>3</sup>)
- Determinar la masa total del suelo seco (g)
- Determinar la fracción fina del suelo seco (masa fracción fina/masa total) y su masa (g).

En el Cuadro 2 se muestran las variables utilizadas en las campañas de muestreo, asociadas a la estimación del COS y la interpretación de resultados.

**Cuadro 2. Variables consideradas en los análisis del COS**

Variable	Uso	Justificación
Densidad aparente	Estimación de COS	Define al COS y permite interpretar el efecto (pisoteo del ganado) del manejo
Fragmentos gruesos	Estimación de COS	Define al COS y permite interpretar el tipo de suelo y disponibilidad de carbono.
Concentración de carbono orgánico	Estimación de COS	Define al COS y permite interpretar limitaciones de nutrientes.
Textura del suelo	Interpretación de resultados	Define restricciones en el almacenamiento del COS y disponibilidad de nutrientes
pH	Interpretación de resultados	Define restricciones en el almacenamiento del COS y disponibilidad de nutrientes
Carbonatos	Interpretación de resultados	Define restricciones en el almacenamiento del COS y disponibilidad de nutrientes

El protocolo a implementar a nivel de laboratorio fue la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Las determinaciones a nivel laboratorio fueron:

- pH usando una relación 1:2 H<sub>2</sub>O.
- Textura por el método de Bouyocos
- Concentración del CO orgánico usando un auto-analizador o el método de Walkey y Black, que son métodos recomendados (FAO, 2019). Si se usa el auto-analizador es necesario la destrucción de todos los carbonatos del suelo (carbono inorgánico). En el caso de Walkey y Black no es necesario destruir los carbonatos dado que no interfieren con el método.
- Concentración de carbonatos. Es una estimación indirecta del carbono inorgánico.
- Carbono orgánico particulado (fracción  $\geq 50 \mu\text{m}$ ).

El método de Walkey y Black realiza una estimación de la MOS, por lo que estimar COS debe realizarse el cálculo:

$$COS = \frac{MOS}{1.724} \quad (4)$$

El factor de conversión 1.724 ha sido validado para el caso de los suelos de México (Padilla *et al.*, 2012).

En el caso de carbono orgánico particulado (COP) su determinación ha sido propuesta para estimar cambios rápidos en el COS (FAO, 2020). No obstante, si la textura no es adecuada o las concentraciones de COS son bajas, esta determinación no es muy útil.

Una estimación indirecta de la concentración del carbono inorgánico de los suelos (CIS) es a través del porcentaje de carbonatos ( $CO_3$ ), en %:

$$CIS = 0.12CO_3 \quad (5)$$

El laboratorio seleccionado fue el Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados (COLPOS). Este laboratorio tiene 44 años de establecido, primeramente, como Laboratorio de Fertilidad de Suelos y hace 11 años, incursionó en la química ambiental, particularmente de C en suelos, aguas y plantas, así como la química verde, es decir, en el uso de instrumentación cada vez menos contaminante y eficiente. La función del Laboratorio es la de realizar análisis químicos de suelos para diagnosticar la fertilidad de los suelos y, como complemento de los mismos, análisis de planta, aguas de riego, soluciones nutritivas, abonos y fertilizantes. Con el fin de entregar resultados confiables, desde sus inicios este laboratorio tiene implementado un sistema de gestión de calidad que le ha permitido participar activamente en programas de comparación de muestras a nivel internacional (Wageningen, a lo largo de 20 años) y en 2003, en la implementación del Programa de Intercomparación de muestras a nivel nacional, actualmente llamado ISP (Campus Tabasco del COLPOS). El ISP trabaja al amparo de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, en el cual participan cerca de 30 laboratorios, algunos de ellos en camino de la acreditación ante la EMA (Entidad Mexicana de Acreditación). El objetivo del ISP es normalizar las técnicas de análisis de suelos y plantas con fines de realizar diagnóstico con base en la trazabilidad. El laboratorio sigue la Norma Mexicana (NOM-021-RECNAT-2000), que hoy día está en proceso de actualización, cuyos métodos son los usados internacionalmente. Desde 2016, participa en las redes de Laboratorios a nivel nacional (REDLAB), los LATSOLAN (Latinoamérica), GLOSOLAN (nivel mundial), e INFA (Red para normalizar los análisis de fertilizantes y enmiendas), todos ellos al amparo de la FAO. Ha recibido reconocimientos en la participación de estas redes.

Las tareas del Laboratorio están suscritas al quehacer institucional en tres rubros docencia, investigación y vinculación. Dentro del último rubro es que el Laboratorio ofrece el servicio de análisis químicos a usuarios internos y externos. Los primeros son principalmente análisis químicos destinados a satisfacer las necesidades de los estudiantes que realizan sus investigaciones de postgrado, y los segundos, a instituciones de investigación oficiales nacionales e internacionales; además colabora con productores independientes y sus asociaciones, con empresarios del agro y productores de fertilizantes que soliciten los servicios. La amplia

experiencia que ha acumulado a lo largo de los años no es compatible con los requisitos que requiere una acreditación formal por la función principal de investigación y docencia del laboratorio. La actividad de servicio es secundaria pero los controles de calidad al analizar muestras de ese sector son tan exhaustivos como los empleados en investigación y docencia. El Laboratorio cuenta con la evidencia documental para que el usuario pueda confiar en sus resultados (manual de calidad, procedimientos, certificaciones personal y calibración de equipos).

Cada reporte de análisis que el laboratorio emite está avalado por el análisis paralelo de muestras de referencia internas de calidad, así como de muestras de calidad consensuadas, blancos, repeticiones, lo cual significa que el 30% del costo del análisis se atribuye al control de calidad mencionado.

El Laboratorio cuenta con el apoyo del Dr. Jorge D. Etchevers Barra (quien recientemente ha dejado el cargo de Jefe del Laboratorio de Fertilidad), las Dra. Rosa Ma. López Romero y la Dra. Juliana Padilla Cuevas, de quienes se puede consultar los currículos respectivos en la página del Colegio de Postgraduados.

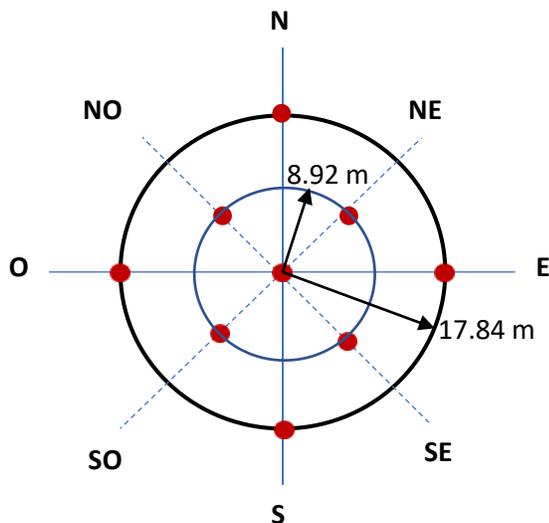
Seleccionado el laboratorio se presentó el problema que el Colegio de Postgraduados entró en huelga y no se pudo tener acceso al Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental, por lo que las determinaciones de COS no pudieron ser realizadas con un auto-analizador, por lo cual se seleccionó el método de Walkey y Black para las estimaciones de la MOS. El Laboratorio pudo operar en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Chapingo de su laboratorio de suelos, donde se realizaron todas las determinaciones, con los mismos procedimientos de control de calidad y aseguranza de calidad.

La campaña de pre-muestreo fue diseñada como complementaria a la campaña final de muestreo, por lo que se seguirá el mismo protocolo de muestreo. Se ubicaron de 3 a 8 unidades de muestreo en cada UPH, el valor mínimo para UPH pequeñas y el máximo para UPH grandes. La ubicación se realizó para el cubrimiento espacial representativo de la UPH, en función de las geoformas y tipos de vegetación, sujeto a la restricción de accesibilidad por caminos o brechas transitables.

La unidad de muestreo, círculo de 1000 m<sup>2</sup>, se definió por el diseño experimental mostrado en la Figura 3, donde se obtuvo una muestra compuesta de los nueve puntos de muestreo siguiendo los protocolos para reducir la variabilidad espacial (FAO, 2019).

El protocolo para el levantamiento de muestras de la campaña de pre-muestreo para cada unidad de paisaje homogénea (UPH) delimitada en el potrero definido en cada rancho, fue el siguiente:

- Excluir sitios de muestreo en parches con excretas de animales, caminos o veredas usadas por los animales, pasos de entradas o salidas de los animales, áreas muy cercanas a puntos de tomas de agua, corrales de manejo y sus cercanías.
- Ubicar de 3 a 8 sitios de muestreo en cada UPH, el valor mínimo para UPH pequeñas y el máximo para UPH grandes. La ubicación debe ser realizada para el cubrimiento espacial representativo de la UPH, en función de las geoformas y tipos de vegetación, sujeto a la restricción de accesibilidad por caminos o brechas transitables.

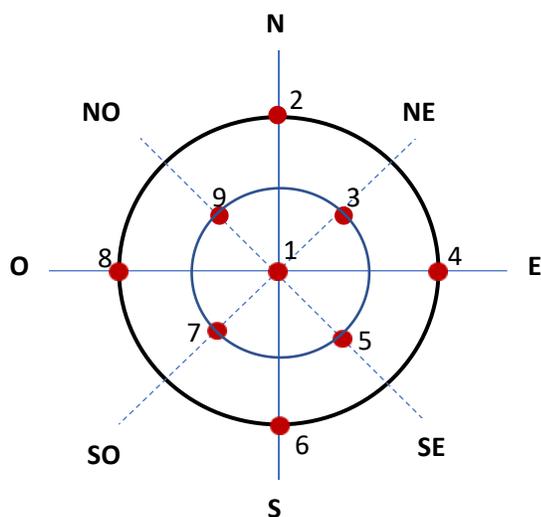


**Figura 3. Unidad de muestreo propuesta**

- Localizados los sitios de muestreo, ubicarlos (diámetros del área de muestreo) usando correcciones por pendiente.
- Definir la línea N-S con uso del GPS o brújula (corregir declinación) y después la línea E-O, poniendo marcas en los extremos del área de medición. Colocar después la línea NE-SO y NO-SE, marcando los sitios de colectas de muestras.
- En el centro del área de muestreo enterrar varilla (o clavo) metálica a poca profundidad (10-20 cm) y tomar las coordenadas geográficas con el uso del GPS. Los sitios de muestreo son permanentes por lo que con un detector de metales es posible ubicar el punto central posteriormente.
- Limpiar la superficie de los puntos de toma de muestras de suelo.
- Tomar muestras de suelo en los puntos marcados usando una barrena de 5 cm de diámetro. Hincar la barrena con mazo y pedazo de madera en el tope, evitando perturbar el suelo. Determinada la profundidad a hincar de la barrena (30 cm), cavar con una pala alrededor del barreno para poder removerlo, evitando pérdidas de suelo en el tope de la barrena.
- Vaciar el suelo contenido en la barrena en una bolsa de plástico (tomar medición del peso de las bolsas antes del pesado o usar los datos del fabricante), para obtener una muestra compuesta. La bolsa debe ser lo suficientemente grande para que quepan las 9 muestras de suelo (alrededor de 5-7 kg de suelo total).
- Etiquetar la bolsa: rancho, potrero, UPH, no. de muestreo.
- En caso de muestras húmedas, dejar abiertas las bolsas y poner hoja con los datos del etiquetado dentro de una bolsita y sellarla.

Para reducir la variabilidad espacial del diseño muestral, se planteó un área de muestreo de 1000 m<sup>2</sup>, con nueve puntos de muestreo repartidos sobre el círculo que cubre el área de muestreo (Figura

4). Una primera campaña de campo fue diseñada para analizar las diferencias entre la toma de las muestras en todos los sitios (9 muestras) o solo tomar 5 sitios de muestreo (eliminar los puntos NE, SE, SO, NO, Figura 4). Para esto se diseñó una campaña de muestreo inicial para el establecimiento de 10 unidades de muestreo en los ocho potreros de los ranchos ganaderos de Chihuahua. Las unidades de muestreo fueron localizadas al azar, dentro de las limitaciones de accesos. Se levantó una unidad muestral por potrero analizado y en el caso del rancho Los Robles, potrero Cordón de Lico y rancho El Uno, potrero La Bascula se realizaron dos unidades de muestreo, dada la variabilidad espacial de las unidades muestrales observada. En todos los casos la profundidad seleccionada fue de 0 a 30 cm (IPCC, 2003, 2006; FAO, 2019). La Figura 4 muestra la enumeración de los sitios de muestreo en la unidad muestral.



**Figura 4. Enumeración de los sitios de muestreo en la unidad de muestreo.**

El protocolo de muestreo para muestras individuales (MI) fue el siguiente:

- Se usó el protocolo de toma de muestras en cada uno de los puntos marcados del caso previo de muestras compuestas.
- Cada muestra colectada, de las nueve, fue puesta en una bolsa y etiquetada: rancho, potrero, UPH, no. de muestreo, punto de muestreo.
- En caso de muestras húmedas, se dejaron abiertas las bolsas (para su secado) y se colocó un etiquetado dentro de la bolsa.

Los protocolos discutidos definen las actividades mínimas a realizar en el sitio de recolección de las muestras obtenidas, antes del envío de submuestras a los análisis de laboratorio.

Los suelos no deben ser almacenados húmedos, ya que afecta las determinaciones del carbono orgánico de los suelos (COS). Si no es posible el secado inmediatamente después de recibir las muestras, éstas deben ser almacenadas en cuartos oscuros a una temperatura de 4° C para reducir la actividad microbiana, por un periodo no mayor de 28 días.

El protocolo del pre-procesamiento de las muestras de suelos en el sitio central de colecta consta de las siguientes actividades (muestreo compuesto):

- Pesar todas las bolsas de muestras compuestas del suelo recibidas con una balanza de precisión de 5 g o menor. Al peso debe descontarse el peso de la bolsa (datos del fabricante o proveniente de pesadas de las bolsas).
- Las muestras compuestas recibidas de campo deben ser secadas en un horno solar o con focos incandescentes fabricado para eso o simplemente colocadas sobre hule negro para su secado al sol. Debe conservarse la totalidad del suelo recibido.
- Con las muestras del suelo relativamente secas y colocadas sobre el hule negro, utilizar un mazo con cubierta de goma o material similar para romper los agregados del suelo mayores a 2 mm, tratando de no aplicar demasiada fuerza para romper las partículas minerales del suelo.
- Terminado el proceso previo, usar una malla de tamiz de 2 mm (2,000 micras) para tamizar la muestra total, después de su agitación manual moderada. Pesar (precisión 1 g) lo retenido en la malla de 2 mm y lo que paso por la malla. Repetir el procedimiento hasta acabar el proceso del tamizado de toda la muestra compuesta. Sumar lo que paso la malla de 2 mm y lo retenido. Estos datos son críticos para la determinación de la densidad aparente.
- Las raíces y otros constituyentes orgánicos > 2 mm deben ser removidos del suelo. Pesar las remociones realizadas.
- Con el material disgregado, sólo para lo que pasó la malla de 2 mm, homogeneizar (cuarteos) la muestra compuesta.
- Colectar submuestra de alrededor de 600 g (pesarla, precisión 1 g) del suelo homogeneizado.
- Colectar una muestra representativa de la submuestra de 10-20 g para determinar el contenido de humedad con base a masa (ASTM D4959-16 o Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000).
- El material que pasó la malla de 2 mm debe ser analizado por su contenido de carbonatos al adicionar gotas de HCl (ácido clorhídrico) al 10 % y anotar la reacción del carbonato de la matriz del suelo de acuerdo al Cuadro 3.
- Colocar en bolsa de plástico etiquetada (misma etiqueta que la de campo) para envío a laboratorio para determinación de textura, pH y carbono orgánico más porcentaje de carbonatos.
- Colocar en bolsa de plástico etiquetada (misma etiqueta que la de campo) para envío a laboratorio para determinación de textura, pH y carbono orgánico.
- La información de los muestreos de campo, pre-procesados, deberá guardarse en una base de datos de acuerdo al formato del Cuadro 4.

**Cuadro 3. Caracterización de la reacción a carbonatos del suelo**

Código	% carbonatos	Descriptor	Descripción de la reacción
N	0	No calcáreo	No detectable visiblemente, ni efervescencia audible
SL	≈ 0 - 2	Ligeramente calcáreo	Se escucha la efervescencia, pero no es visible
MO	≈ 2 -10	Moderadamente calcáreo	Efervescencia visible
ST	≈ 10 -25	Fuertemente calcáreo	Efervescencia fuertemente visible. Las burbujas forman poca espuma
EX	≈ > 25	Extremadamente calcáreo	Reacción extremadamente fuerte. Se forma la espuma espesa rápidamente

**Cuadro 4. Formato de información de las muestras pre-procesadas.**

ID muestra suelo	Peso total inicial (g)	Peso bolsa (g)	Peso fracción fina (< 2 mm)	Peso fracción gruesa (> 2mm)	Peso de raíces (> 2 mm) y material orgánico (g)	Humedad Suelo (%)	Código de la reacción de carbonatos

Para el caso de los muestreos individuales (nueve en total), el proceso es el siguiente:

- Pesar todas las bolsas de muestras del suelo recibidas con una balanza de precisión de 1 g o menor. Al peso debe descontarse el peso de la bolsa (datos del fabricante o proveniente de pesadas de las bolsas).
- Las muestras individuales recibidas de campo deben ser secadas en un horno solar o con focos incandescentes fabricado para eso o simplemente colocadas sobre hule negro para su secado al sol. Debe conservarse la totalidad del suelo recibido.
- Con las muestras del suelo relativamente secas y colocadas sobre el hule negro, utilizar un mazo con cubierta de goma o material similar para romper los agregados del suelo mayores a 2 mm, tratando de no aplicar demasiada fuerza para romper las partículas minerales del suelo.
- Terminado el proceso previo, usar una malla de tamiz de 2 mm (2,000 micras) para pasar la muestra total, después de su agitación manual moderada. Pesar (precisión 1 g) lo retenido en la malla de 2 mm y lo que pasó por la malla. Repetir el procedimiento hasta acabar el proceso del tamizado. Sumar lo que paso la malla de 2 mm y lo retenido. Estos datos son críticos para la determinación de la densidad aparente.

- Las raíces y otros constituyentes orgánicos > 2 mm deben ser removidos del suelo. Pesar las remociones realizadas.
- Colectar el total que paso la malla de 2 mm.
- Colectar una muestra representativa de la muestra de 10-20 g para determinar el contenido de humedad con base a masa (ASTM D4959-16 o Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000).
- El material que pasó la malla de 2 mm debe ser analizado por su contenido de carbonatos al adicionar gotas de HCl (ácido clorhídrico) al 10 % y anotar la reacción del carbonato de la matriz del suelo de acuerdo al Cuadro 3.
- Colocar en bolsa de plástico etiquetada (misma etiqueta que la de campo) para envió a laboratorio para determinación de textura, pH y carbono orgánico.
- Utilizar el formato de datos del Cuadro 4 para la recopilación de información del pre-procesamiento,

### 2.5 Pruebas estadísticas de comparación de promedios para el caso de profundidad fija

Las pruebas estadísticas para analizar diferencias en los promedios del COS parten de mantener la profundidad del muestreo como fija (30 cm), por lo que los efectos de los cambios de la densidad aparente no son considerados.

La prueba  $t$  para dos promedios (1 y 2) con hipótesis de doble cola (Zar, 2010) requiere estimar la sumatoria de cuadrados:

$$SS_1 = VAR_1(n_1 - 1) \quad (6)$$

$$SS_2 = VAR_2(n_2 - 1) \quad (7)$$

donde VAR es la varianza de las muestras analizadas y  $n$  es el número de muestras. Los grados de libertad de las muestras están dados por:  $\nu = n-1$ . Los grados de libertad totales están dados por:

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 \quad (8)$$

Los cálculos de la  $t$  de análisis son realizados de acuerdo con:

$$S_P^2 = \frac{SS_1 + SS_2}{\nu_1 + \nu_2} \quad (9)$$

$$S_{P_1 - P_2} = \sqrt{\frac{S_P^2}{n_1} + \frac{S_P^2}{n_2}} \quad (10)$$

$$t = \frac{P_1 - P_2}{S_{P_1 - P_2}} \quad (11)$$

donde  $P$  es el promedio y  $S$  es la varianza de las muestras. La prueba se realiza de acuerdo con:

$$\text{si } |t| > t_{0.05(2),v}, \text{ la diferencia es significativa} \quad (12)$$

Para la realización de la prueba de diferencias en los promedios asociados a las prácticas de manejo (convencional y regenerativo) de los potreros fue necesario considerar el caso de potreros con más de una UPH. Para esto fue necesario utilizar valores ponderados por superficie ( $A$ , en ha) de las UPH en cada potrero:

$$P_{potrero} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{A_{UPH_i}}{A_{potrero}} \right) P_{UPH_i} \quad (13)$$

$$VAR_{potrero} = \left( \frac{n}{n-1} \right) \sum_{i=1}^n \left( \frac{A_{UPH_i}}{A_{potrero}} \right) VAR_{UPH_i} \quad (14)$$

donde  $P$  es el promedio,  $VAR$  es la varianza,  $n$  es el número de UPH en el potrero.

Para la situación de múltiples muestras por  $UPH_i$ , es necesario considerar la división en  $UPH_{i,j}$ :

$$A_{UPH_{i,j}} = \frac{A_{UPH_i}}{n_i} \quad (15)$$

de tal manera que  $A_{UPH_{i,j}}$  substituye a  $A_{UPH_i}$  en las relaciones (13) y (14).

## 2.6 Pruebas estadísticas de comparación de promedios para el caso de masa fija

La densidad aparente (DAP) puede experimentar cambios en el tiempo en respuesta al clima y/o manejo, entre los que se encuentra el pisoteo animal (Willat y Pullar, 1984; Zhao *et al.*, 2007), factores biofísicos (Blanco-Canqui *et al.*, 2009) y/o factores químicos (Périer y Ouimet, 2008). Al no considerar los cambios en la DAP al estimar los cambios temporales del COS, las estimaciones de cambios en los almacenes del COS pueden no ser precisos.

Para analizar los cambios en el COS en el tiempo, es necesario realizar ajuste por las variaciones del DAP. Para esto, el concepto de masa equivalente o masa fija del suelo puede utilizarse (Ellert y Bettany, 1995; Ellert *et al.*, 2007).

La estimación del almacén de COS para el caso de masa fija consiste de los siguientes cálculos:

$$Msuelo = (DAP)(P)100 \quad (16)$$

$$Mex = Msuelo - Mref \quad (17)$$

$$COSmf = COSpf - (Mex)(CO)/1000 \quad (18)$$

donde DAP está en g/cm<sup>3</sup>, P es la profundidad del suelo en cm, M<sub>ref</sub> es el valor de M<sub>suelo</sub> para el caso del suelo con menor DAP, CO es la concentración (mg C g<sup>-1</sup> suelo seco = 10x%) y COS<sub>pf</sub> es el COS para el caso de profundidad fija:

$$COS_{pf} = (DAP)(CO)(L)0.1 \quad (19)$$

Finalmente, es necesario realizar una corrección por fragmentos gruesos (FG<sub>m</sub>):

$$COS_{pf, fg} = (COS_{mf})(1 - FG_m) \quad (20)$$

La selección de M<sub>ref</sub> se realiza para el DAP menor de las muestras de los dos potreros a comparar en manejo (convencional y regenerativo).

El uso de masa fija permite comparar suelos con diferentes masas en un mismo volumen y compensar las diferencias.

### 2.7 Detección de cambios de los promedios

Considerando el objetivo del proyecto de análisis de cambios producto del manejo ganadero en un muestreo posterior (alrededor de 5 años), el enfoque de muestreo debe estar orientado a detectar cambios en los almacenes de carbono (hipótesis nula es igual a no cambios), por lo que el diseño muestral debe ser orientado a detectar la diferencia mínima detectable (DMD) en sitios pareados (mismas unidades experimentales) con un tratamiento (Zar, 2010):

$$\delta \geq \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right) (t_{\alpha(2),v} + t_{\beta(1),v}) \quad (16)$$

donde  $\delta$  es la DMD,  $s$  es la desviación estándar de las diferencias de la variable analizada,  $n$  es el número de muestras (replicados),  $v = n - 1$ , son los grados de libertad de la distribución  $t$  relevante,  $t_{\alpha(2)}$  el valor crítico, doble cola, de la distribución  $t$  a un nivel de significancia  $\alpha$  (error tipo I) y  $t_{\beta(1)}$  es el cuartil, una sola cola, de la distribución  $t$  correspondiente a una probabilidad  $\beta$  de error tipo II. El número de muestras puede determinarse de:

$$n \geq \left(\frac{s}{\delta}\right)^2 (t_{\alpha(2),v} + t_{\beta(1),v})^2 \quad (14)$$

El nivel  $\alpha$  es la probabilidad de cometer un error tipo I (la hipótesis nula es cierta, pero es incorrectamente rechazada por la prueba) y  $\beta$  es una probabilidad que está asociada al error tipo II (rechazo de la hipótesis nula de no cambio cuando en realidad un cambio ha ocurrido). Es práctica común utilizar  $\alpha = 0.05$  y  $\beta = 0.2$ , aunque esta regla ha sido cuestionada por Di Stefano (2003), por lo que es necesario realizar un análisis racional para determinar  $\alpha$  y  $\beta$  al considerar los costos relativos de los errores tipo I y II. En nuestro caso no se cuenta con información para tal análisis, por lo que se usaron los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  comúnmente considerados en las aplicaciones.

El enfoque de muestreo propuesto está orientado a la detección de diferencias mínimas detectables de los cambios de los almacenes de carbono, por lo que el número de muestras es función de la variabilidad espacial presente. La detección de cambios en el carbono orgánico de los suelos (COS) y de diferencias entre los tratamientos es importante para entender las alteraciones en el secuestro de carbono (Homann *et al.*, 2001; Post *et al.*, 2001). Así mismo, la incidencia de la variabilidad

espacial en la DMD es enfatizada por Conant y Paustian (2002b), por lo que requiere de su evaluación.

El uso de modelos para analizar cambios en los almacenes del COS ha sido utilizado para predecir los cambios a futuro después de la primera medición (Conen *et al.*, 2003; Smith, 2004). Los modelos de simple parametrización como el RothC (Coleman y Jenkinson, 1996) pueden utilizarse para este objetivo. No obstante, los resultados obtenidos con el uso del modelo RothC en México muestran altas incertidumbres en sus estimaciones producto de su parametrización y condiciones del estado estacionario del suelo (González *et al.*, 2022), por lo que esta opción para determinar la DMD potencial (para comparar cambios en un periodo de 5 años) no fue utilizada.

De la revisión de la literatura mundial de meta-análisis de cambios entre pastizales y matorrales bajo condiciones de manejo mejorado o de la degradación de éstos, los rangos de variación anual van de 0.1 a 3.0 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Conant *et al.*, 2001; Tessema *et al.*, 2019), con valores promedio de alrededor de 0.4 – 0.7 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Conant *et al.*, 2001; Conant y Paustian, 2002a; Schuman *et al.*, 2002; Lal, 2003; Ogle *et al.*, 2004; Smith *et al.*, 2008; Lal, 2009, Petri *et al.*, 2010; Ghosh y Mahanta, 2014; Henderson *et al.*, 2015; Conant *et al.*, 2017; Tessema *et al.*, 2019); aunque hay límites superiores (Lal, 2001, 2004; Soussana *et al.*, 2007; Díaz *et al.*, 2016) que muestran un valor promedio de alrededor de 1.1 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

De acuerdo a la revisión realizada el promedio para DMD considerado está entre 0.7 y 1.1 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, que para un periodo de 5 años los límites inferior y superior son 3.5 y 5.5 Mg C ha<sup>-1</sup>.

En el caso de la ganadería regenerativa (holística), Briske *et al.* (2013) han estimado que las promesas de secuestro de carbono suponen una tasa de secuestro potencial de 2.5 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, lo cual es considerado fuera de los límites de mediciones y estimaciones realizadas (Nordborg, 2016); aunque Itzkan (2014) ha estimado picos (máximos) de secuestro de carbono orgánico en los suelos de 1.0 a 2.4 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

Con relación al carbono inorgánico de los suelos (CIS), las estimaciones oscilan entre 1.5 y 15 kg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Lal, 2003, 2009), por lo que puede despreciarse esta contribución.

## 2.8 Indicadores de la salud del agostadero

La evaluación de la sostenibilidad de los ranchos ganaderos ha sido propuesta en forma múltiples dimensiones, que van más allá de la parte ambiental y del bienestar animal (Aguirre-Calderón, 2019), lo que limita su aplicación al caso de la evaluación del secuestro de carbono orgánico del suelo.

El panel de expertos de la Sociedad de Manejo de Pastizales propuso que el estado del ecosistema ganadero puede ser evaluado determinando el potencial que un sitio ecológico tiene para conservar recursos del suelo y una serie de indicadores de procesos ecológicos y estabilidad del suelo. La propuesta determinó 17 indicadores para evaluar tres atributos del ecosistema (suelo y estabilidad del sitio, función hidrológica e integración biótica) (Pyke *et al.*, 2002; Pellant *et al.*, 2020). Estos indicadores incluyen: 1) riachuelos o canalillos, 2) patrones de escurrimiento, 3) pedestales y terracetas, 4) suelo desnudo, 5) cárcavas, 6) erosión eólica, 7) movimiento de mantillo, 8)

resistencia del suelo a la erosión, 9) degradación o pérdida de la superficie del suelo, 10) composición vegetal, 11) compactación del suelo, 12) grupos funcionales, 13) mortalidad vegetal, 14) cantidad de mantillo, 15) producción anual, 16) plantas invasivas y 17) capacidad de reproducción.

Cada indicador es evaluado en la siguiente escala nominal: extrema, extrema a moderada, moderada, ligera a moderada y ninguna a ligera. En este proyecto, se excluyeron los indicadores 12, 16 y 17 por falta de información precisa del lugar en que se levantó la muestra. El Cuadro 5 presenta el formato para la integración de los indicadores de salud del agostadero con respecto a los atributos de estabilidad del suelo (S), función hidrológica (W) e integridad biológica (B). Cada indicador puede estar asociado a uno o más atributos

**Cuadro 5. Formato para evaluar los indicadores de salud del agostadero integrando los atributos de estabilidad del suelo (S), función hidrológica (W) e integridad biológica (B).**

Atributo	Indicador	Descripción del sitio				
		Extrema	Moderada a extrema	Moderada	Ligera a moderada	Ninguna a Ligera
S,W	1. Canalillos					
S,W	2. Patrones de escurrimiento					
S,W	3. Pedestales y terracetas					
S,W	4. Suelo desnudo					
S,W	5. Cárcavas					
S	6. Erosión eólica					
W	7. Movimiento del mantillo					
S,B,W	8. Resistencia del suelo a la erosión					
S,B,W	9. Pérdida de superficie del suelo					
W	10. Composición vegetal					
S,B,W	11. Compactación del suelo					
B	13. Mortalidad de plantas					
B,W	14. Cantidad de Mantillo					

## 2.9 Estimación de emisiones de la fermentación entérica del ganado

En los términos de referencia del proyecto se incluye la aplicación del Modelo GLEAM (modelo de evaluación ambiental de la ganadería mundial), el cual está documentado en FAO (2010), con una versión interactiva de aplicación usando una App (FAO, 2021).

El modelo GLEAM usa un sistema de información geográfico para el uso de datos a escala mundial, los cuales están distribuidos en una malla de dimensión mínima de 10 km x 10 km (10,000 ha), lo cual lo hace impráctico para aplicarlo a los potreros de los ranchos de Chihuahua, razón por lo que no se hizo ningún intento de aplicarlo al proyecto, además que utiliza factores de emisión por defecto y no representativos de la escala nacional o regional.

Para el cálculo de la emisión diaria y anual de emisiones de metano ( $\text{CH}_4$ ) por fermentación entérica de los bovinos de los ranchos en el estado de Chihuahua se empleó la metodología *Tier 2* del IPCC (2006), la cual considera tres factores principales involucrados en el proceso biológico de producción de metano entérico en bovinos: a) el factor animal, el cual se representa por las necesidades (consumo) de energía bruta (GE) en MJ/d; b) el factor dieta, el cual se describe a través de la digestibilidad de la misma, ya que la digestibilidad determina la cantidad de energía que es empleada por el animal y la que se pierde como  $\text{CH}_4$ ; y c) el factor medio ambiente, el cual emplea las temperaturas promedio de los meses invernales para estimar el efecto de la temperatura ambiental sobre las necesidades energéticas de mantenimiento de los animales.

El factor de conversión de la energía consumida a  $\text{CH}_4$  ( $Y_m$ ), el cual se emplea para calcular el factor de emisión (FE) de  $\text{CH}_4$ , se obtuvo a través de mediciones *in vivo* llevados a cabo en México en cámaras de respiración de circuito abierto (Castelán *et al.*, 2018, 2019). Por esta razón, se emplearon FE específicos para las diferentes categorías de animales que se estudiaron como son vacas, sementales, novillos, becerros; es decir cada categoría de animal tuvo un FE en función de su peso vivo promedio, productividad y sexo.

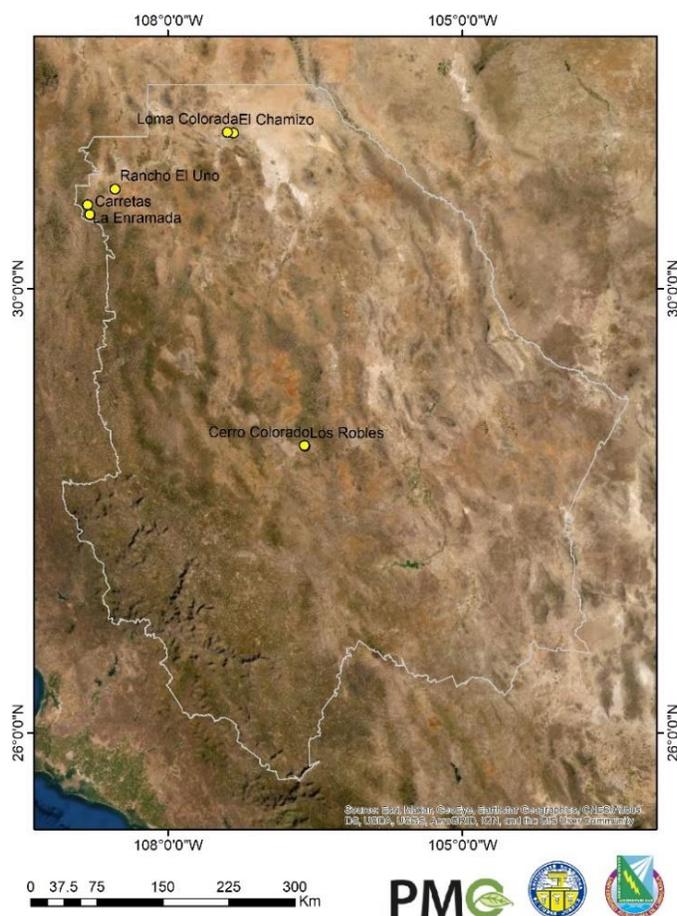
El factor de conversión a metano conocido como  $Y_m$  es el porcentaje de la energía bruta alimentaria consumida que es convertida a metano. El método *Tier 2* del IPCC (2006) sugiere emplear un valor  $Y_m$  por defecto de 6.5% para todos los tipos de bovino, con excepción de los novillos en engorda, que reciben una dieta con > 90% de concentrados, en cuyo caso el valor sugerido es de 3%. Sin embargo, en el caso de este proyecto se utilizaron valores de  $Y_m$  específicos para la región de clima seco de México, el cual fue determinado a través de experimentos en las cámaras de respiración (Castelán *et al.*, 2018, 2019). Los valores  $Y_m$  así determinados se aplicaron al cálculo de los FE correspondiente a cada una de las categorías de ganado consideradas en este estudio.

El cálculo de las emisiones es más preciso al obtener FE localmente determinados y no FE por defecto, lo cual incrementa la incertidumbre de los inventarios. Está bien establecido que el uso de la metodología *Tier 2* es un avance significativo en comparación del método *Tier 1* que emplea FE por defecto.

Finalmente, la emisión de CH<sub>4</sub> por potrero se obtuvo al multiplicar el FE por el número de animales que pastaron en un potrero en un período específico de tiempo. En el caso de los bisontes se empleó también un factor de emisión de CH<sub>4</sub> determinado también en las cámaras de respiración (Kelliher y Clark, 2010).

### 3. Selección y caracterización de los ranchos ganaderos

Se eligieron ocho ranchos de los cuales cuatro tienen al menos cinco años con manejo regenerativo y los otros cuatro tienen manejo convencional. Cada rancho regenerativo se encuentra pareado con un rancho convencional. La Figura 5, presenta la ubicación espacial de los ranchos. Los ranchos regenerativos Carretas, El Chamizo, Los Robles y el Potrero La Bascula (Rancho el Uno), tienen a su par de manejo convencional a los ranchos: La Enramada, Loma Colorada, Cerro Colorado y el Potrero El Bosque (Rancho el Uno), respectivamente.



**Figura 5. Ubicación espacial de los siete ranchos utilizados para los sitios de muestreo**

### 3.1 Descripción de los potreros

Los ranchos y potreros seleccionados están mostrados en el Cuadro 6, donde se muestran sus superficies.

**Cuadro 6. Ranchos y potreros seleccionados, con sus superficies.**

Par Ranchos	Nombre del Rancho	Nombre del Potrero	Manejo	Área Rancho (ha)	Área potrero (ha)
1	Los Robles	Cordón de Lico	Regenerativo	608.61	26.24
	Cerro Colorado	Cerro Colorado	Convencional	469.10	26.12
2	El Uno	La Bascula	Regenerativo	18676.95	1699.62
	El Uno	El Bosque	Convencional		1905.33
3	Carretas	Las Yeguas	Regenerativo	5962.46	194.30
	La Enramada	La Enramada Vieja	Convencional	7465.84	390.29
4	El Chamizo	La Sabaneta	Regenerativo	7143.47	959.82
	Loma Colorada	El Papalote	Convencional	7685.76	508.44

Los ciclos de manejo ganadero en cada uno de los potreros de los ranchos están mostrados en el Cuadro 7, así como los tiempos de manejo.

Las capacidades de carga y prácticas de manejo utilizadas están mostradas en el Cuadro 8 para los potreros seleccionados

Las capacidades de carga por ciclo de los últimos cinco años de los potreros seleccionados esta mostrada en el Cuadro 9

En el Cuadro 10 se muestra la composición de especies de plantas de la dieta animal de los potreros seleccionados.

**Cuadro 7. Ciclos de manejo y duración de los potreros seleccionados.**

NOMBRE POTRERO	CICLOS DE MANEJO					DURACION
	2022	2021	2020	2019	2018	
Cordón de Lico	Descanso	Julio-Julio	Enero- Enero	Descanso	Julio-Julio	1 semana
Cerro Colorado	Todo el año					Todo el año
La Bascula	Marzo-Julio	Descanso	Descanso	Enero - Dic	Enero - Dic	1 mes
El Bosque	Descanso	Descanso	Descanso	Todo el año		Todo el año
Las Yeguas	Descanso	Marzo - Abril	Descanso	Marzo - Abril	Marzo - Abril	1 mes
La Enramada Vieja	Octubre -Julio					9 meses
La Sabaneta						
El Papalote	Todo el año					Todo el año

**Cuadro 8. Capacidades de carga y prácticas de manejo utilizadas en los potreros**

NOMBRE POTRERO	CAPACIDAD DE CARGA TOTAL	PRACTICAS DE MANEJO UTILIZADAS
Cordón de Lico	600 ua	Manejo regenerativo con descansos largos de 18 meses
Cerro Colorado	250 ua	Manejo convencional
La Bascula	600 ua	Manejo rotacional selectivo con descansos de 18 meses
El Bosque	600 ua	Manejo rotacional selectivo con descansos de 18 meses
Las Yeguas	42 ua	1er Periodo (2015-2020): Pastoreo intensivo no selectivo con descanso de 12 meses. 2do Periodo (2021-2022): Pastoreo intensivo no selectivo con descanso de 18 meses
La Enramada Vieja		Pastoreo continuo con diferimiento de veranos
La Sabaneta		Manejo regenerativo de rancho, pastoreo intensivo no selectivo aplicando descansos de 2 años
El Papalote		Manejo convencional

**Cuadro 9. Capacidades de carga por ciclo de los potreros seleccionados**

NOMBRE POTRERO	CAPACIDAD DE CARGA ANIMAL POR CICLO (Aprox. últimos 5 años)						
	VACAS	TOROS	VAQUILLAS	NOVILLOS	BECERROS	CRIAS HEMBRA	CRIAS MACHO
Cordón de Lico	300	15	40	150-200		100	100
Cerro Colorado	150	4	50	40			
La Bascula	210	Bisontes (300): 50% Machos, 50% Hembras					
El Bosque	110	6	22				
Las Yeguas	1er Periodo (2015-2020): 42 ua. 2do Periodo (2021-2022): 29 ua						
La Enramada Vieja	200-300				200-300		
La Sabaneta	420 (en el año 2018), 210 (actualidad)	7					
El Papalote	100						

**Cuadro 10. Especies de plantas de la dieta animal en los potreros seleccionados**

PAR RANCHOS	MANEJO	RANCHO	POTRERO	Especies dieta animal	
				Nombre Común	Nombre Científico
1	REGENERATIVO	LOS ROBLES	CORDÓN DE LICO	Nopal	<i>Opuntia ficus-indica</i>
				Popotillo	<i>Bothriochloa barbinodis</i>
				Palmilla (sacahuistle)	<i>Nolina texana</i>
				Zacate navajita azul	<i>Bouteloua gracilis</i>
				Encino colorado	<i>Quercus emoryi</i>
	CONVENCIONAL	CERRO COLORADO	CERRO COLORADO	Nopal	<i>Opuntia ficus-indica</i>
				Popotillo	<i>Bothriochloa barbinodis</i>
				Palmilla (sacahuistle)	<i>Nolina texana</i>
				Zacate navajita azul	<i>Bouteloua gracilis</i>
				Encino colorado	<i>Quercus emoryi</i>
2	REGENERATIVO	EL UNO	LA BASCULA	Popotillo	<i>Bothriochloa barbinodis</i>
				Zacate navajita azul	<i>Bouteloua gracilis</i>
				Zacate guía	<i>Panicum obtusum</i>
				Aristida purpurea	<i>Aristida purpurea</i>
	CONVENCIONAL	EL UNO	EL BOSQUE	Popotillo	<i>Bothriochloa barbinodis</i>
				Zacate navajita azul	<i>Bouteloua gracilis</i>
				Zacate guía	<i>Panicum obtusum</i>
				Mezquite	<i>prosopis glandulosa</i>
				Aristida purpurea	<i>Aristida purpurea</i>
3	REGENERATIVO	CARRETAS	LAS YEGUAS	Zacate navajita azul	<i>Bouteloua gracilis</i>
				Zacate banderita	<i>Bouteloua cortipendula</i>
				Popotillo plateado	<i>Bothriochloa barbinodis</i>
				Zacate guía	<i>Panicum obtusum</i>
				Pata de gallo	<i>Chloris verticillata</i>
				Palmilla (sacahuistle)	<i>Nolina texana</i>
				Encino colorado	<i>Quercus emoryi</i>
				Encino blanco	<i>Quercus grisea</i>
	CONVENCIONAL	LA ENRAMADA	LA ENRAMADA VIEJA	Navajita azul	<i>Bouteloua gracilis</i>
				Banderilla	<i>Bouteloua cortipendula</i>
				Popotillo plateado	<i>Bothriochloa barbinodis</i>
				Zacate guía	<i>Panicum obtusum</i>
				Pata de gallo	<i>Chloris verticillata</i>
				Palmilla	<i>Nolina texana</i>
				Encino colorado	<i>Quercus emoryi</i>
				Encino blanco	<i>Quercus grisea</i>
				Mezquite	<i>prosopis glandulosa</i>
4	REGENERATIVO	EL CHAMIZO		Zacate tobozo	<i>Hilaria mutica</i>

CONVENCIONAL	LOMA COLORADA	LA SABANETA	Zacatón alcalino	<i>Sporobolus airoides</i>
			Zacate guía	<i>Panicum obtusum</i>
			Zacate banderita	<i>Bouteloua cortipendula</i>
			Mezquite	<i>prosopis glandulosa</i>
			Chamizo ´	<i>Atriplex canescens</i>
			Saladillo	<i>Atriplex semibaccata</i>
			Zacate temprano	<i>Setaria macrostachya</i>
	EL PAPALOTE	Zacate toposo	<i>Hilaria mutica</i>	
		Zacatón alcalino	<i>Sporobolus airoides</i>	
		Zacate guía	<i>Panicum obtusum</i>	
		Zacate banderita	<i>Bouteloua cortipendula</i>	
		Mezquite	<i>prosopis glandulosa</i>	
		Chamizo	<i>Atriplex canescens</i>	
		Saladillo	<i>Atriplex semibaccata</i>	
Zacate temprano	<i>Setaria macrostachya</i>			

Finalmente, en el Cuadro 11 se muestra los promedios de la temperatura mínima del aire a nivel mensual, que es una determinante de las emisiones de metano de la fermentación entérica del ganado en los potreros seleccionados. Adicionalmente se muestra precipitación promedio mensual en los potreros seleccionados (Cuadro 12).

**Cuadro 11. Temperatura mínima promedio mensual en los potreros seleccionados.**

Rancho	Potrero	Tmin (°C) - promedios											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Los Robles	Cordón de Lico	0.68	1.34	4.09	7.65	10.30	15.17	15.48	14.89	12.84	8.67	3.12	0.05
Cerro Colorado	Cerro Colorado	0.68	1.34	4.1	7.65	10.3	15.17	15.48	14.89	12.84	8.67	3.12	0.05
El Uno	La Bascula	0.19	1.59	4.69	7.57	9.89	15.93	16.60	16.19	13.29	8.92	3.86	0.33
El Uno	El Bosque	0.27	1.62	4.76	7.66	9.91	15.95	16.77	16.28	13.33	8.94	3.83	0.35
Carretas	Las Yeguas	0.37	1.21	4.18	7.26	9.60	15.53	16.28	15.98	13.40	9.07	3.97	0.49
La Enramada	La Enramada Vieja	0.06	1.50	4.45	7.65	10.05	16.02	16.69	16.26	13.63	9.29	4.36	0.78
El Chamizo	La Sabaneta	0.87	1.68	5.8	9.22	12.46	18.43	20.11	19.21	15.63	10.28	3.36	0.38
Loma Colorada	El Papalote	-0.7	1.68	5.8	9.04	12.2	18.21	19.8	18.93	15.36	10.21	3.45	0.29

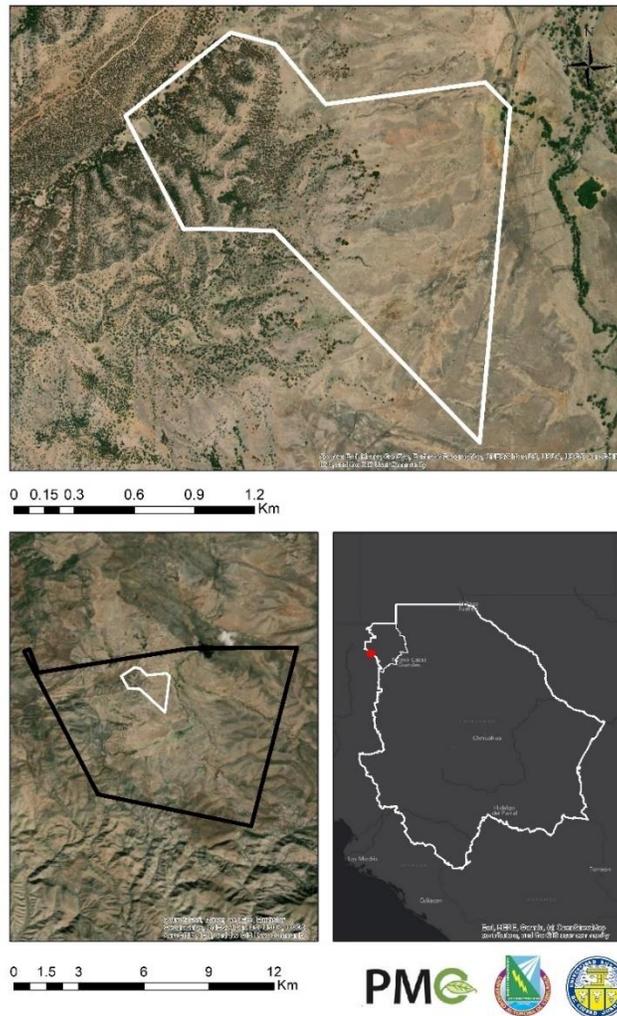
**Cuadro 12. Precipitación promedio mensual en los potreros seleccionados**

Rancho	Potrero	Precipitación (mm) - promedios											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Los Robles	Cordón de Lico	8.1	4.2	6.6	4.8	7.0	37.4	117.1	105.8	108.9	22.6	15.5	9.3
Cerro Colorado	Cerro Colorado	8.1	4.2	6.6	4.8	7.0	37.4	117.1	105.8	108.9	22.6	15.5	9.3
El Uno	La Bascula	19.4	11.5	17.0	2.9	2.4	17.0	91.3	66.5	68.5	25.5	23.4	19.9
El Uno	El Bosque	19.6	12.3	18.3	3.3	2.3	17.0	92.3	67.0	69.9	25.2	24.8	19.7
Carretas	Las Yeguas	32.60	17.8	21.6	5.2	3.0	22.5	128.6	91.0	67.3	31.2	31.5	35.3
La Enramada	La Enramada Vieja	29.8	16.2	21.4	5.1	2.3	21.7	122.1	85.2	67.9	28.7	31.7	31.3
El Chamizo	La Sabaneta	7.4	6.5	7.3	1.5	2.9	10.8	52.5	42.2	63.5	23.8	10.3	11.6
Loma Colorada	El Papalote	7.5	6.4	6.2	1.6	2.9	10.4	54.9	42.6	67.7	23.6	10.5	11.1

### 3.2 Ranchos con Manejo Regenerativo

#### 3.2.1 Rancho Carretas

El rancho Carretas se encuentra ubicado en el municipio de Janos, Chihuahua, en una ecorregión dominada por topofomas de pie de monte y planicies, la vegetación dominante es pastizal con matorral xerofito y la presencia de bosques de encino-pino en las partes altas del predio. Su tipo de clima es árido-templado, con temperaturas entre 12° a 18° C. El rancho tiene una superficie de 5963 ha y se eligió al potrero Las Yeguas para hacer el análisis comparativo con una superficie de 194.3 ha (Figura 6). Las prácticas de manejo se dividen en dos periodos. El primero de 2015 a 2020 se utilizó un manejo intensivo no selectivo con descanso de 12 meses y el segundo de 2021 a 2022 se utilizó un manejo intensivo no selectivo con descanso de 18 meses. El periodo de pastoreo dentro de este potrero es de un mes.

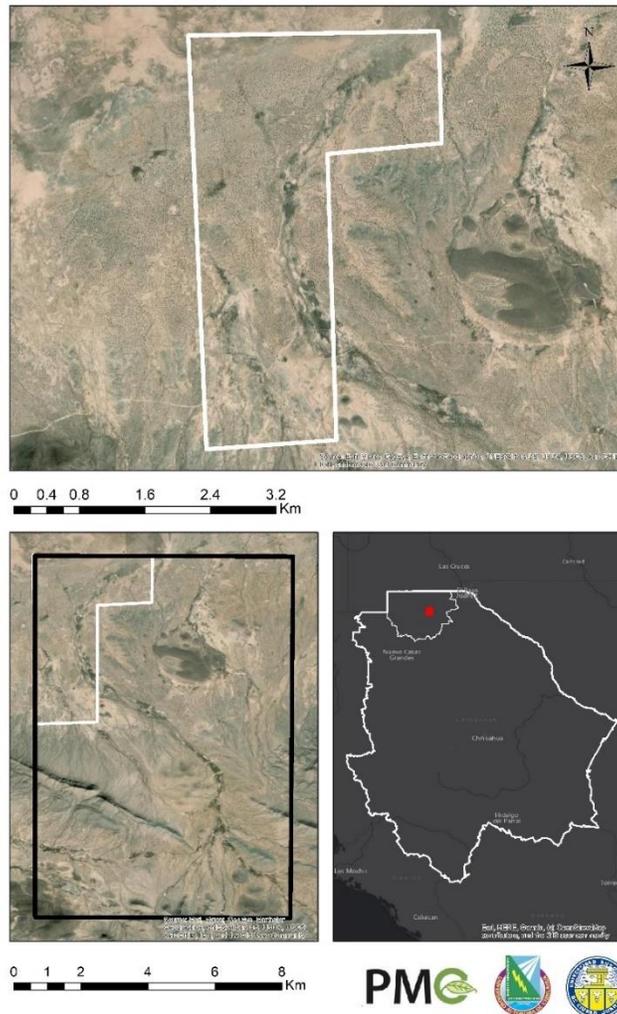


**Figura 6. Ubicación espacial del potrero seleccionado “Las Yeguas” con manejo regenerativo en Rancho Carretas, Chihuahua.**

El potrero Las Yeguas tiene una capacidad de carga de 42 U.A. (Unidades Animal), distribuidos de la siguiente forma: en el periodo 2015 a 2020 se utilizaron 3.6 ha por unidad animal y para 2021 a 2022 5.7 ha por unidad animal.

### 3.2.2 Rancho El Chamizo

El rancho El Chamizo se encuentra ubicado en el municipio de ascensión, Chihuahua, es una ecorregión de dominada por topofomas de planicies del desierto Chihuahuenses con vegetación xerófila microfila-halófito. Su tipo de clima es muy árido, templado con temperatura entre 12° a 35°. El rancho tiene una superficie de 7143 ha y se eligió al potrero La Sabaneta para hacer el análisis comparativo con una superficie de 973.2 ha (Figura 7).

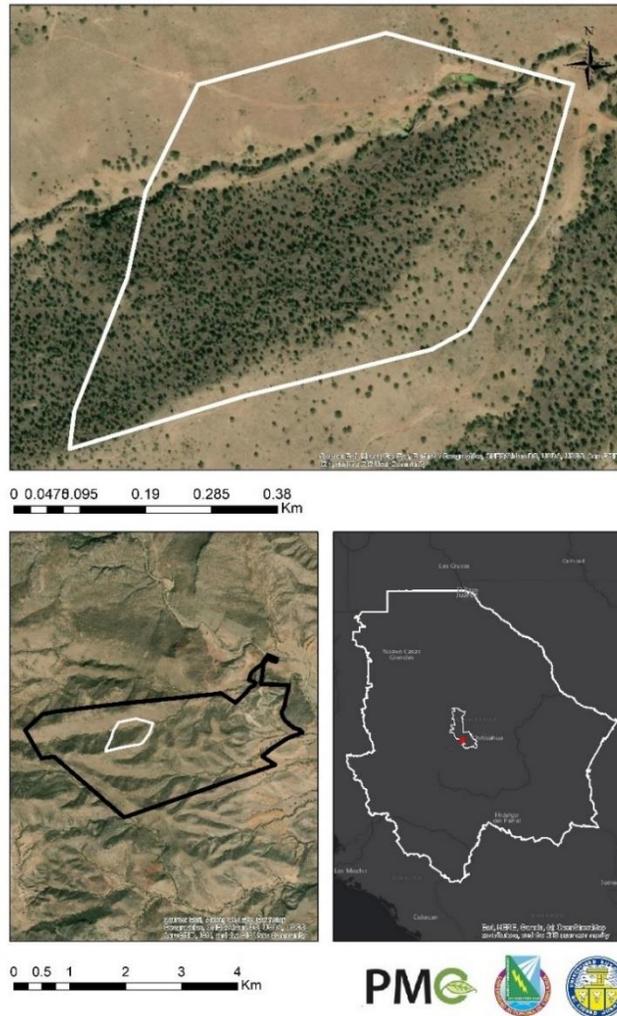


**Figura 7. Ubicación espacial del potrero seleccionado “La Sabaneta” con manejo regenerativo en Rancho El Chamizo, Chihuahua.**

La práctica de manejo es pastoreo intensivo no selectivo con descansos de dos años. Se introdujo el ganado en septiembre de 2018, se dejó descansar 2019 y 2020, en septiembre de 2021 se volvió a introducir el ganado y hasta la fecha está en periodo de descanso. El potrero La Sabaneta tiene un pastoreo de 420 vacas y siete toros.

### 3.2.3 Rancho Los Robles

El rancho Los Robles se encuentra ubicado en el municipio de Riva Palacio, Chihuahua, en una ecorregión dominada por topofomas de pie de monte y planicies, la vegetación dominante es pastizal con matorral xerofito y la presencia de bosques de encino-pino. Su tipo de clima es semiárido-templado, con temperaturas entre 12° a 18°C. El rancho tiene una superficie de 608.6 ha y se eligió el potrero Cerdón de Lico para hacer la comparación con una superficie de 26.24 ha (Figura 8).

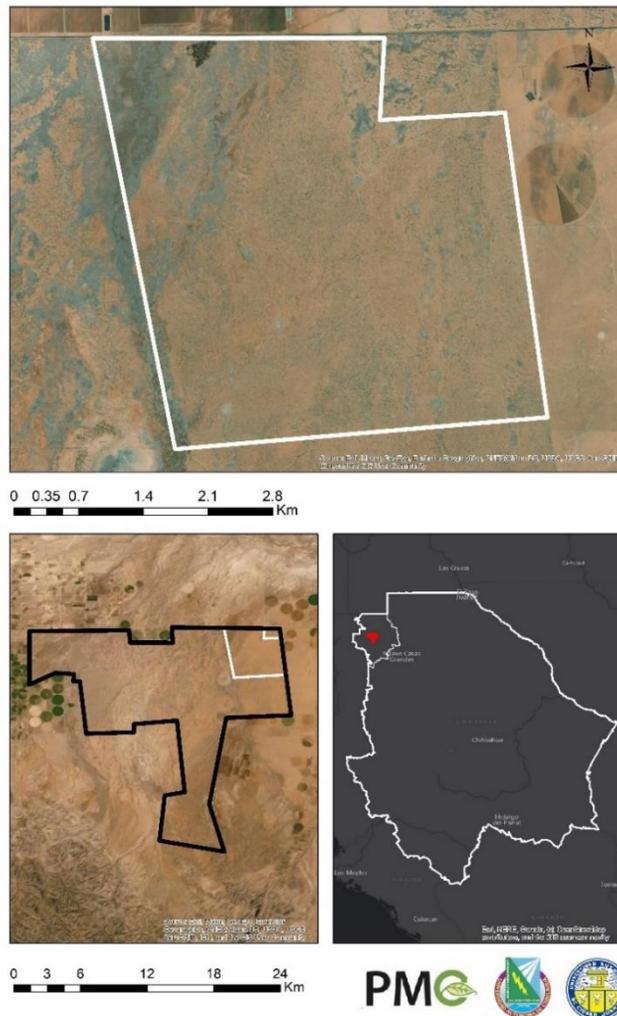


**Figura 8. Ubicación espacial del potrero seleccionado “Cordón de Lico” con manejo regenerativo en Rancho Los Robles, Chihuahua.**

Las prácticas de manejo son regenerativas con descansos largos de 18 meses. La duración del pastoreo es de un mes. La secuencia de pastoreo es la siguiente: pastoreo en julio de 2018, se descansó en 2019, pastoreo en enero de 2020 y se volvió a pastorear en julio de 2021. El potrero Cordón de Lico tiene una carga de 600 unidades animales, con la presencia de 300 vacas, 15 toros, 40 vaquillas, 200 becerros de los cuales 100 crías son hembras y 100 crías machos.

#### 3.2.4 Rancho El Uno (Potrero La Bascula)

La elección del Potrero La Bascula en el esquema de manejo regenerativo, se dio con base al Plan de Manejo Integral del Rancho El Uno, por el hecho que de acuerdo al manejo holístico este potrero tenía una calificación de siete (máxima calificación 10), siendo uno de los potreros mejor evaluados. Su tipo de clima es semiárido-templado con temperatura que oscilan entre 12° a 30° C. El potrero tiene una extensión de 1699.6 ha (Figura 9).



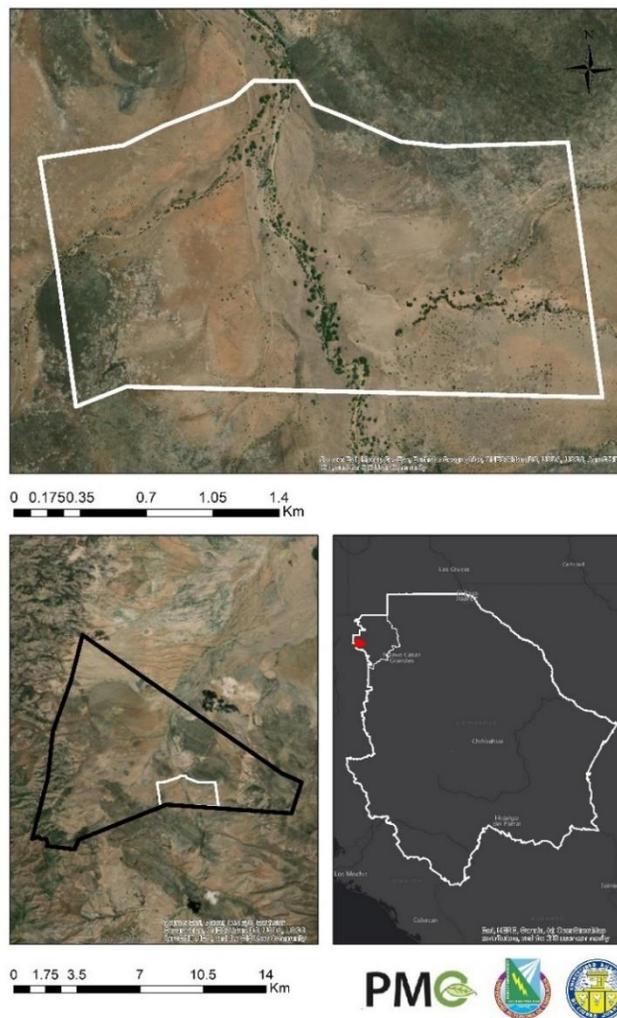
**Figura 9. Ubicación espacial del potrero seleccionado “La Bascula” con manejo regenerativo en Rancho El Uno, Chihuahua.**

Su tipo de manejo es pastoreo selectivo con descansos de 18 meses. La duración de pastoreo contempla una semana y la secuencia de pastoreo es: pastoreo en junio-julio de 2018, pastoreo en enero-febrero de 2019, descanso en 2020 y 2021, pastoreo marzo de 2021. Su tipo de manejo es pastoreo selectivo con descansos de 18 meses. La duración de pastoreo contempla una semana y la secuencia de pastoreo es: pastoreo en junio-julio de 2018, pastoreo en enero-febrero de 2019, descanso en 2020 y 2021, pastoreo marzo de 2021. El potrero cuenta con una capacidad de 600 U.A. en 2018 el potrero fue rentado e introdujeron 210 vacas y de 2019 a la fecha lo pastorean 300 bisontes, de los cuales el 150 son machos y 150 hembras.

### 3.3 Ranchos con Manejo Convencional

#### 3.3.1 Rancho La Enramada

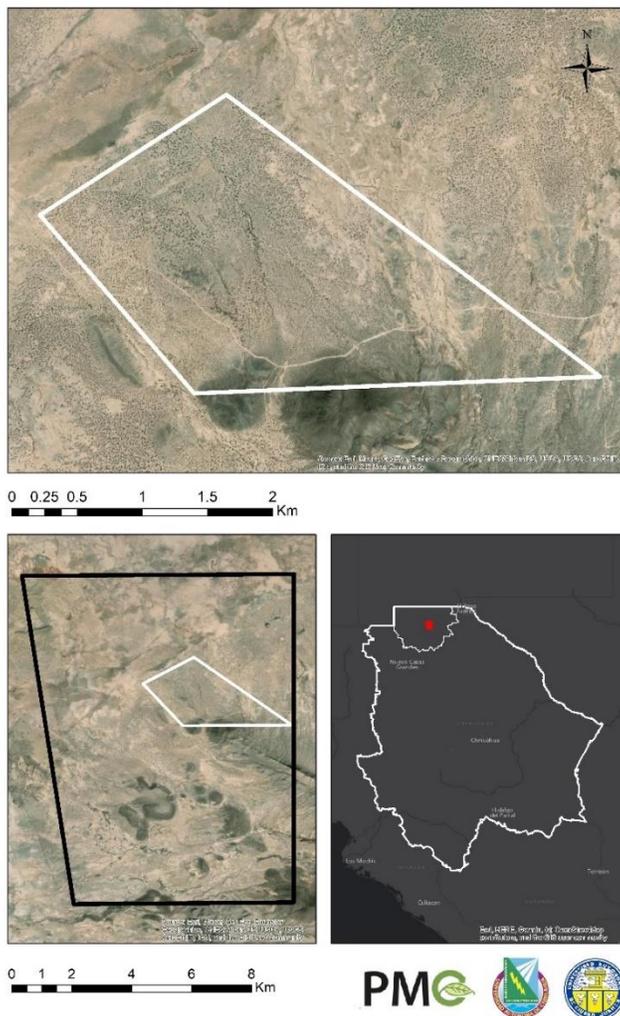
El rancho La Enramada se encuentra ubicado en el municipio de Janos, Chihuahua, en una ecorregión dominada por toposformas de pie de monte y planicies, la vegetación dominante es pastizal con matorral xerofito y la presencia de bosques de encino-pino en las partes altas del predio. Su tipo de clima es árido-templado, con temperaturas entre 12° a 18° C. El rancho tiene una superficie de 7485.8 ha y se eligió al potrero La Enramada Vieja para hacer el análisis comparativo con una superficie de 390.4 ha (Figura 10). Las prácticas de manejo utilizada es pastoreo continuo con descansos en verano. La duración del pastoreo es de nueve meses. El potrero La Enramada Vieja cuenta con 300 vacas con 300 crías.



**Figura 10. Ubicación espacial del potrero seleccionado “La Enramada Vieja” con manejo convencional en Rancho La Enramada, Chihuahua.**

### 3.3.2 Rancho Loma Colorada

El rancho Loma Colorada se encuentra ubicado en el municipio de Ascensión, Chihuahua: es una ecorregión de dominada por tofoformas de planicies del desierto Chihuahuenses con vegetación xerófila microfila-halófito. Su tipo de clima es muy árido, templado con temperatura entre 12° a 35°. El rancho tiene una superficie de 7685.7 ha y se eligió al potrero El Papalote para hacer el análisis comparativo con una superficie de 508.4 ha (Figura 11). La práctica de manejo es pastoreo intensivo selectivo sin descanso. El potrero tiene un pastoreo de 100 vacas.

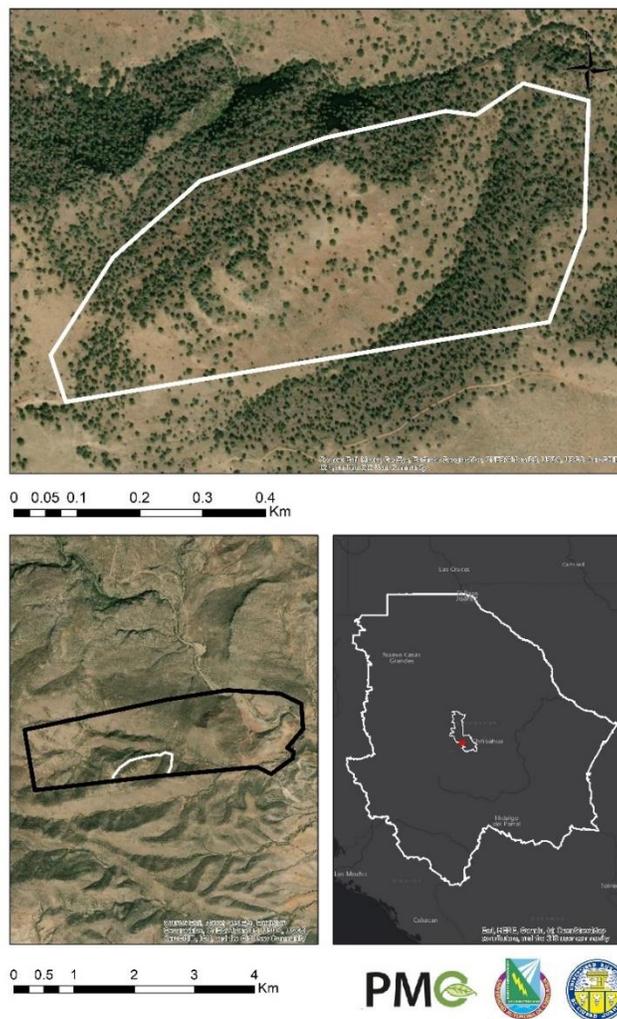


**Figura 11. Ubicación espacial del potrero seleccionado “El Papalote” con manejo convencional en Rancho Loma Colorada, Chihuahua.**

### 3.3.3 Rancho Cerro Colorado

El rancho Cerro Colorado se encuentra ubicado en el municipio de Riva Palacio, Chihuahua, en una ecorregión dominada por tofoformas de pie de monte y planicies, la vegetación dominante es pastizal con matorral xerofito y la presencia de bosques de encino-pino. Su tipo de clima es

semiárido-templado, con temperaturas entre 12° a 18°C. El rancho tiene una superficie de 469.1 ha y se eligió el potrero Cerro Colorado para hacer la comparación con una superficie de 26.1 ha (Figura 12). La práctica de manejo es pastoreo intensivo selectivo sin descanso. El potrero tiene un pastoreo de 100 vacas, 4 toros, 50 vaquillas y 40 becerros

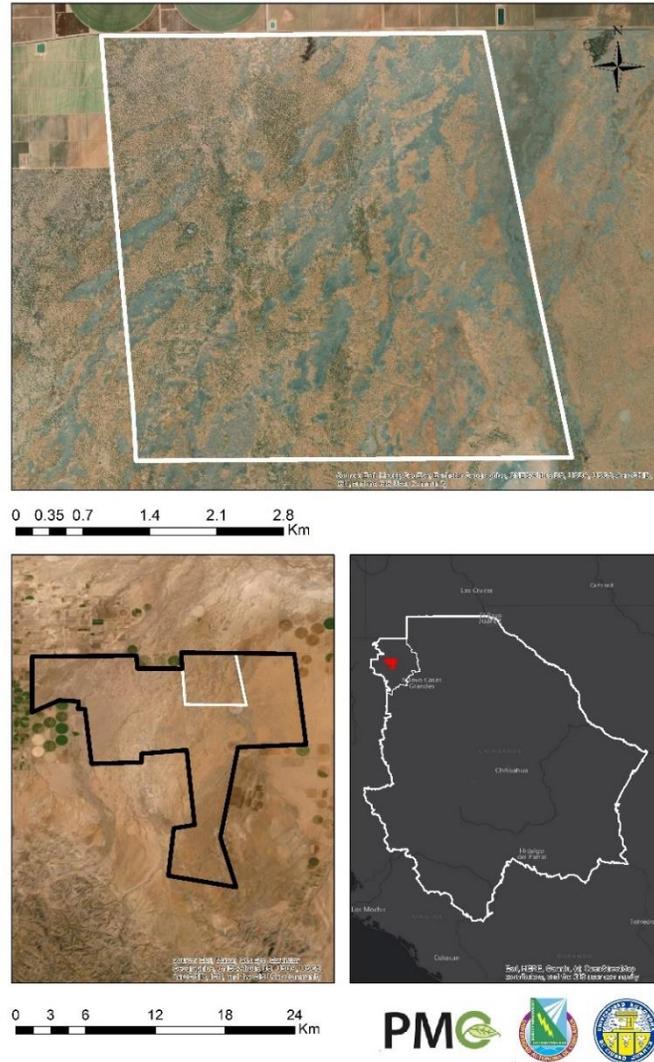


**Figura 12. Ubicación espacial del potrero seleccionado “Cerro Colorado” con manejo convencional en Rancho Cerro Colorado, Chihuahua.**

### 3.3.4 Rancho El Uno (Potrero El Bosque)

La elección del Potrero El Bosque en el esquema de manejo convencional, se dio con base al Plan de Manejo Integral del Rancho El Uno, por el hecho que de acuerdo con el manejo holístico este potrero tenía una calificación de cuatro (máxima calificación 10 y mínima calificación de 0), siendo uno de los potreros peor evaluados. Su tipo de clima es semiárido-templado con temperatura que oscilan entre 12° a 30° C. El potrero tiene una extensión de 1905.3 ha (Figura 13). Su tipo de manejo es pastoreo selectivo con descansos de 24 meses. La duración de pastoreo es de todo el año y la secuencia de pastoreo es: pastoreo en 2018 y 2019, con descanso en 2020 a 2022. El

potrero cuenta con una capacidad de 600 U.A., en 2018 el potrero fue rentado e introdujeron 110 vacas, 6 toros y 22 becerros.



**Figura 13. Ubicación espacial del potrero seleccionado “El Bosque” con manejo convencional en Rancho El Uno, Chihuahua.**

## 4. Caracterización de Ranchos, Diseño Muestral y Campaña de Pre-Muestreo

### 4.1 Caracterización de Ranchos y Potreros

La campaña inicial de pre-muestreo buscó caracterizar la variabilidad espacial de COS a nivel de unidades muestrales.

En el **Anexo 7:MI pre-muestreo campo** se muestran los datos de campo y pre-procesamiento de las muestras individuales (MI) de cada unidad de muestreo analizada.

Para analizar si hay diferencias significativas entre los promedios del COS para 5 y 9 muestras de los sitios de cada unidad de muestreo se realizó una prueba usando la distribución  $t$  de Student (**Anexo 8:MI análisis pre-muestreo PF**), para el caso de dejar la profundidad (longitud de muestreo) fija (PF).

Los resultados de las pruebas de significancia de diferencias de promedios para la campaña de pre-muestreo inicial están mostrados en el Cuadro 13.

Los resultados del Cuadro 13 muestran que no hay diferencias significativas entre los promedios de usar 5 o 9 puntos de muestreo (Figura 4) de las unidades de muestreo, por lo que en lo siguiente todas las estimaciones están referidas a la configuración final (muestras Centro, N, E, S, O) de las unidades de muestreo.

**Cuadro 13. Pruebas de *t* de Student para análisis de diferencias significativas de los promedios muestrales.**

Rancho	Promedio COS 5	Var. COS 5	n	Promedio COS 9	Var. COS 9	n	v	SS <sub>5</sub>	SS <sub>9</sub>	S <sub>p</sub> <sup>2</sup>	S <sub>p5-p9</sub>	t	t	t <sub>0.05(2),v</sub>	Prueba	Resultado Promedios
Cerro Colorado	45.83	671.22	5	46.33	376.24	9	12	2684.87	3009.88	474.56	12.15	-0.041	0.041	2.179	t  < t <sub>0.05(2),v</sub>	No diferencia significativa
Los Robles	35.27	34.63	5	38.78	94.03	9	12	138.51	752.26	74.23	4.81	-0.732	0.732	2.179	t  < t <sub>0.05(2),v</sub>	No diferencia significativa
Los Robles	42.96	292.75	5	49.85	294.85	9	12	1171.00	2358.82	294.15	9.57	-0.720	0.720	2.179	t  < t <sub>0.05(2),v</sub>	No diferencia significativa
El Uno	15.61	20.43	5	16.08	13.43	9	12	81.73	107.48	15.77	2.21	-0.214	0.214	2.179	t  < t <sub>0.05(2),v</sub>	No diferencia significativa
El Uno	8.17	8.93	5	7.06	6.37	9	12	35.73	50.93	7.22	1.50	0.744	0.744	2.179	t  < t <sub>0.05(2),v</sub>	No diferencia significativa
El Uno	8.60	8.38	5	8.93	8.68	9	12	33.51	69.40	8.58	1.63	-0.203	0.203	2.179	t  < t <sub>0.05(2),v</sub>	No diferencia significativa
Loma Colorada	2.60	4.84	5	1.76	3.77	9	12	19.35	30.19	4.13	1.13	0.743	0.743	2.179	t  < t <sub>0.05(2),v</sub>	No diferencia significativa
El Chamizo	19.17	10.01	5	17.79	15.92	9	12	40.05	127.37	13.95	2.08	0.662	0.662	2.179	t  < t <sub>0.05(2),v</sub>	No diferencia significativa
La Enramada	26.95	64.14	5	26.37	56.31	9	12	256.54	450.50	58.92	4.28	0.137	0.137	2.179	t  < t <sub>0.05(2),v</sub>	No diferencia significativa
Carretas	28.25	32.55	5	30.21	17.92	9	12	130.20	143.32	22.79	2.66	-0.737	0.737	2.179	t  < t <sub>0.05(2),v</sub>	No diferencia significativa

## 5. Campaña de Pre-Muestreo y Levantamiento de Muestras

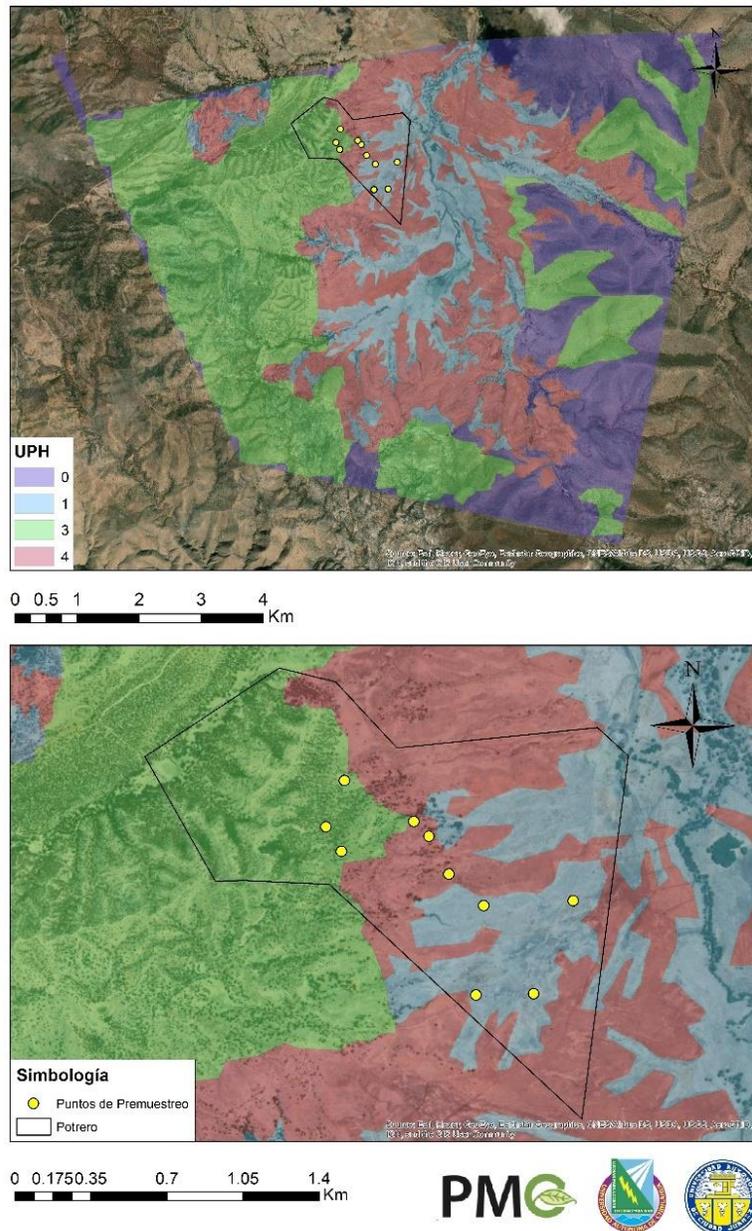
El Cuadro 14 presenta el resumen del número de muestras recolectadas en la fase de pre-muestreo en cada potrero de los ranchos muestreados.

**Cuadro 14. Número de muestras recolectadas en la fase de pre-muestreo.**

Rancho	Potrero	Superficie del Potrero (ha)	Manejo	UPH Muestreadas	No. de Unidades de Muestreo
Carretas	Las Yeguas	194.3	Regenerativo	1,3,4	10
La Enramada	Enramada Vieja	390.2	Convencional	0,1	12
El Chamizo	La Sabaneta	973.2	Regenerativo	4	8
Loma Colorada	El Papalote	508.4	Convencional	2	6
El Uno	La Bascula	1699.2	Regenerativo	2,3,4	14
El Uno	El Bosque	1905.3	Convencional	2,3,4	12
Los Robles	Cordón de Lico	26.2	Regenerativo	1	7
Cerro Colorado	Cerro Colorado	26.1	Convencional	4	7

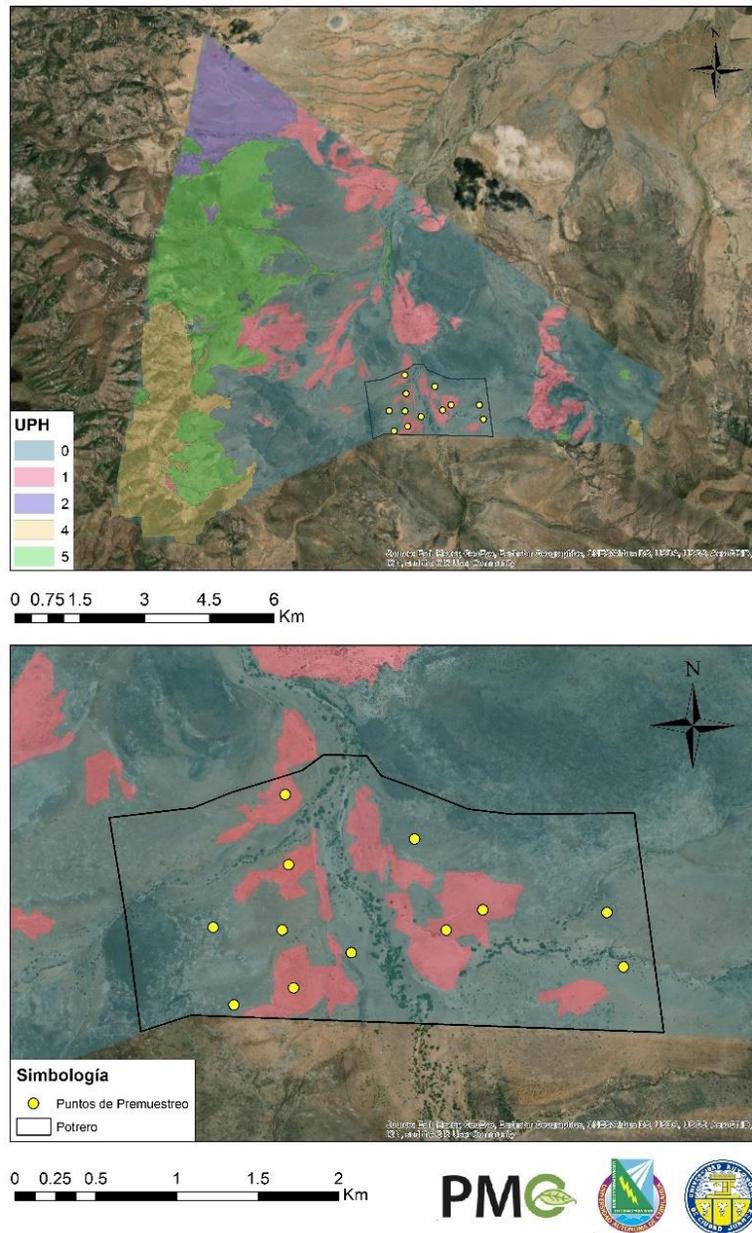
### 5.1 Mapas de unidades de paisaje homogéneas y puntos muestreados durante el pre-muestreo

La Figura 14 presenta las unidades de paisaje homogéneas del rancho Carretas y de su respectivo potrero Las Yeguas, también la ubicación geográfica de las nueve unidades muestrales analizadas.



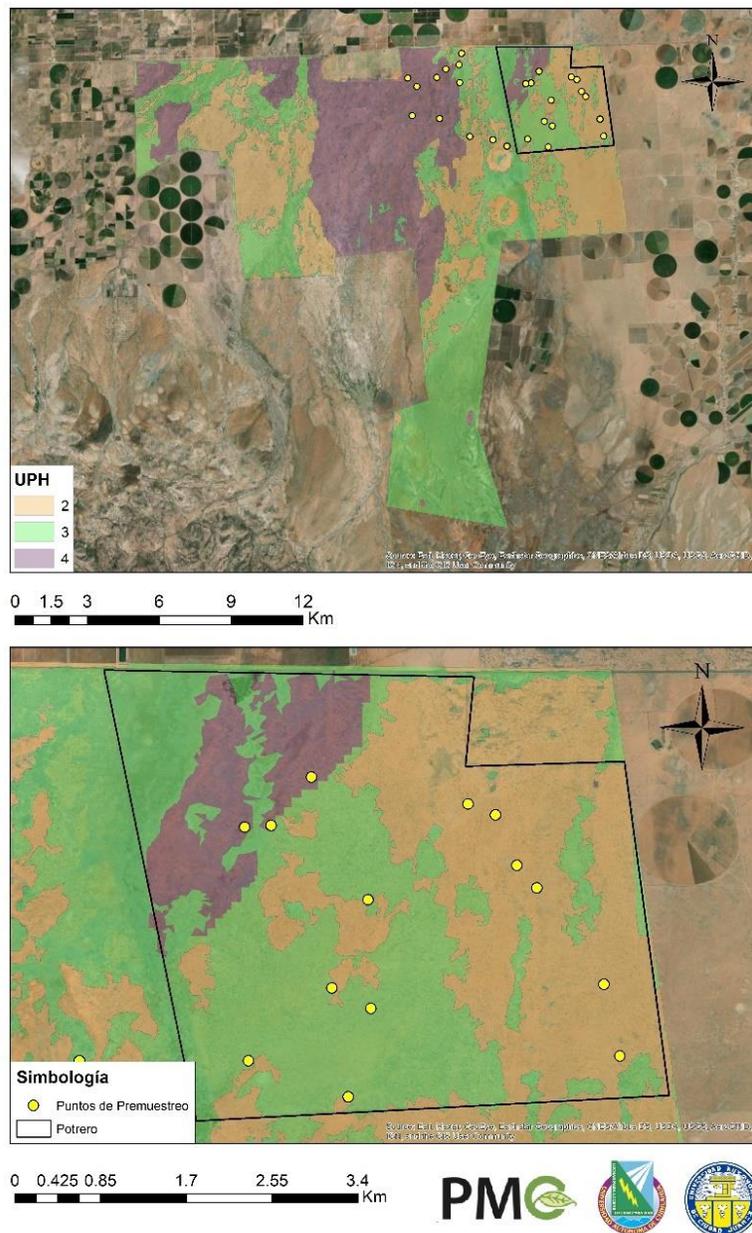
**Figura 14. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho Carretas con su potrero seleccionado “Las Yeguas” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo cuatro unidades en la UPH 1, tres en la UPH 3 y tres en la UPH 4, contando con diez unidades muestrales en total.**

La Figura 15 presenta las unidades de paisaje homogéneas del rancho La Enramada y su respectivo potrero La Enramada Vieja, también la ubicación geográfica de 12 unidades muestrales analizadas.



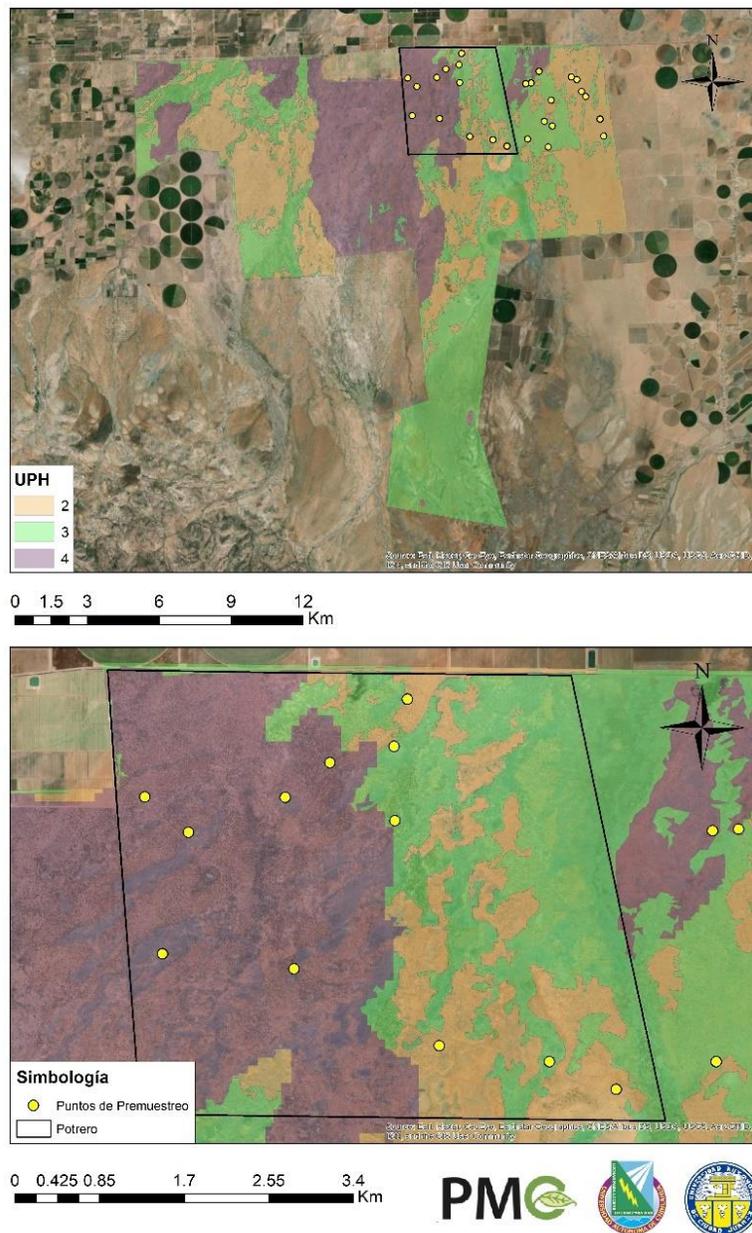
**Figura 15. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho La Enramada con su potrero seleccionado “La Enramada Vieja” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo siete en la UPH 0 y cinco muestras en la UPH 1, contando con 12 unidades muestrales en total.**

La Figura 16 presenta las unidades de paisaje homogéneas del rancho el Uno y su respectivo potrero La Bascula, también la ubicación geográfica de 14 unidades muestrales analizadas.



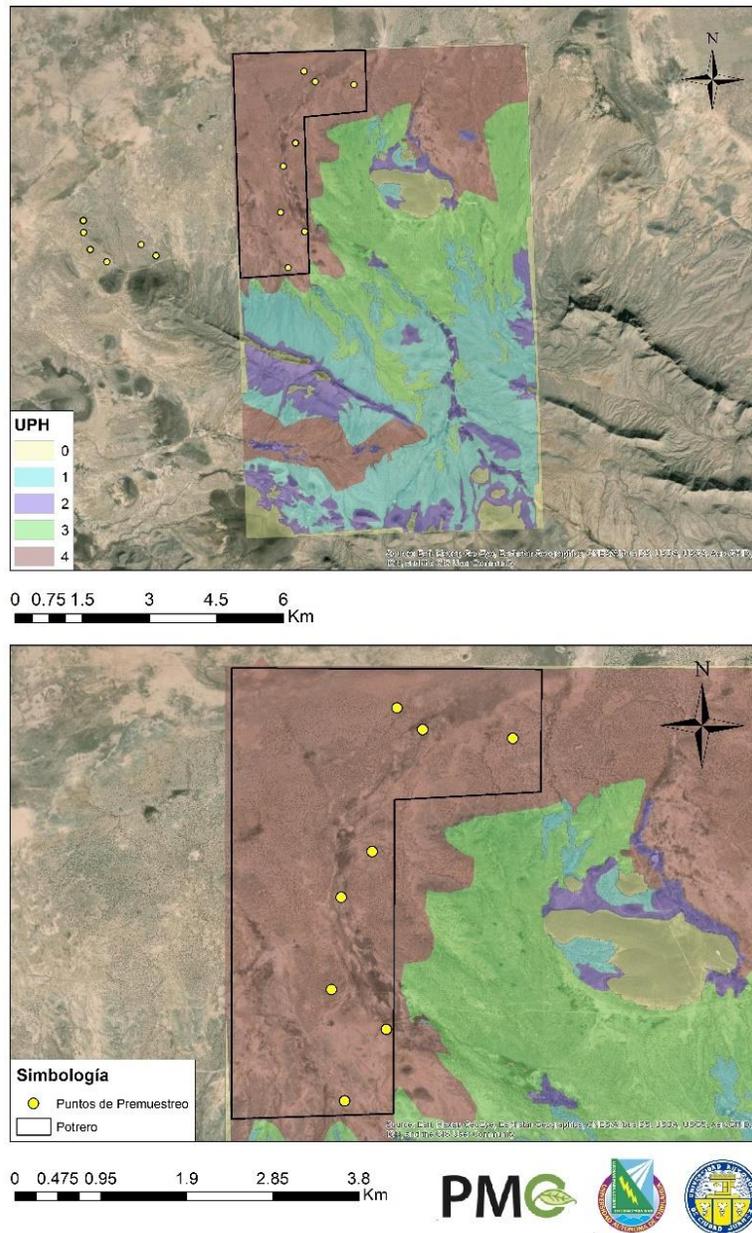
**Figura 16. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho El Uno con uno de sus potreros seleccionados “La Bascula” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo seis unidades en la UPH 2, cinco unidades en la UPH 3 y tres unidades en la UPH 4, contando con 14 unidades muestrales en total.**

La Figura 17 presenta las unidades de paisaje homogéneas del rancho el Uno y su respectivo potrero El Bosque, también la ubicación geográfica de 12 unidades muestrales analizadas.



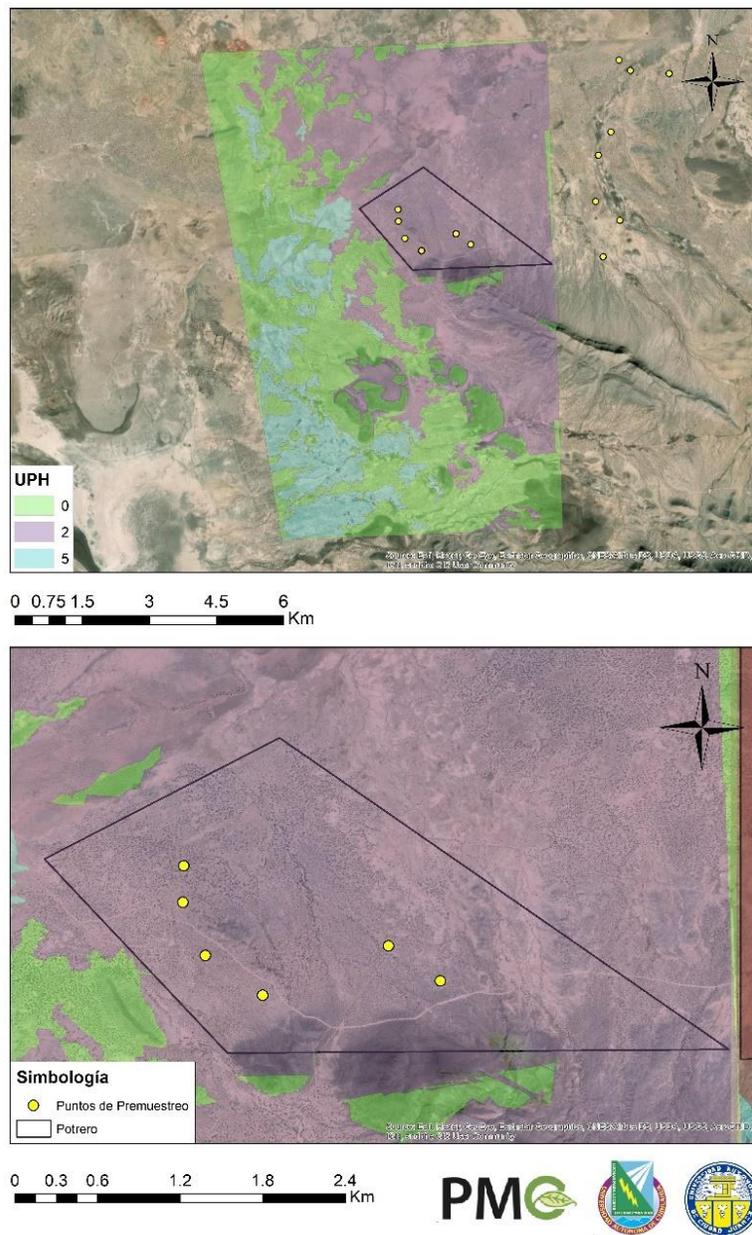
**Figura 17. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho El Uno con uno de sus potreros seleccionados “El Bosque” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo tres unidades en la UPH 2, tres unidades en la UPH 3 y seis unidades en la UPH 4, contando con 12 unidades muestrales en total.**

La Figura 18 presenta las unidades de paisaje homogéneas del rancho el Chamizo y su respectivo potrero La Sabaneta, también la ubicación geográfica de ocho unidades muestrales analizadas.



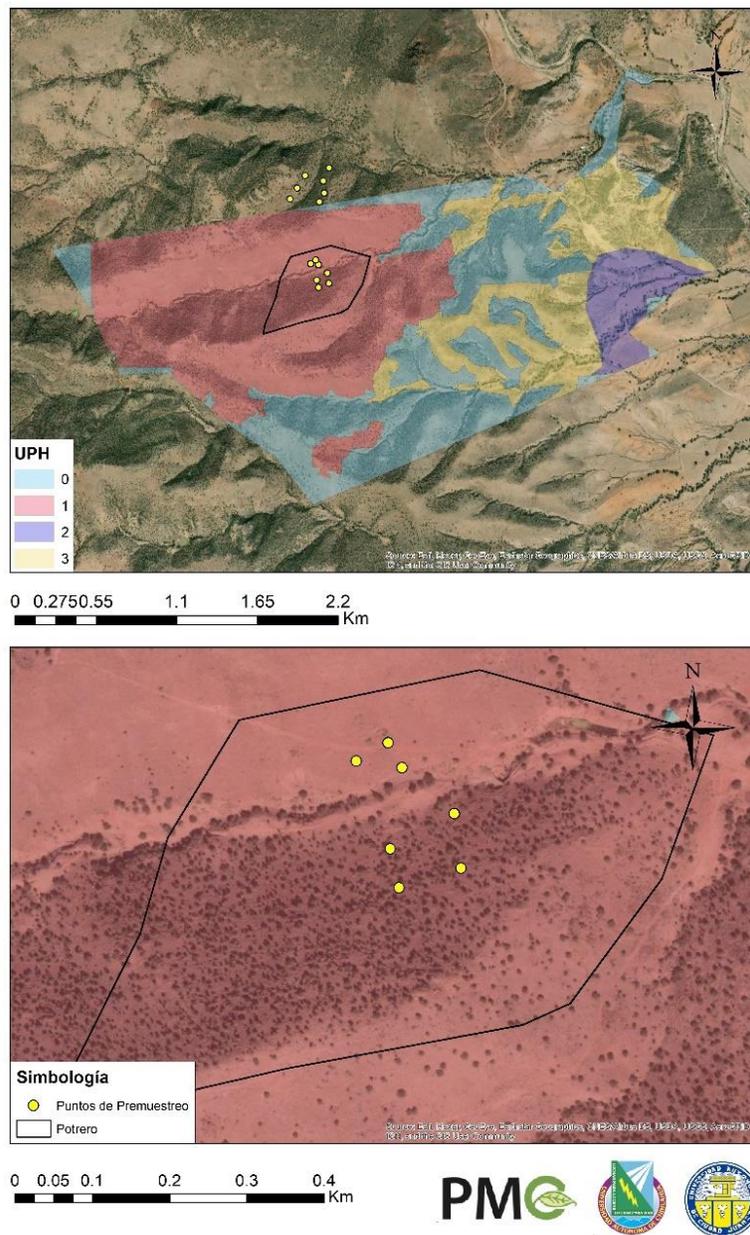
**Figura 18. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho El Chamizo con su potrero seleccionado “La Sabaneta” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo un total de ocho unidades muestrales en la UPH 4.**

La Figura 19 presenta las unidades de paisaje homogéneas del rancho Loma Colorada y su respectivo potrero El Papalote, también la ubicación geográfica de siete unidades muestrales analizadas.



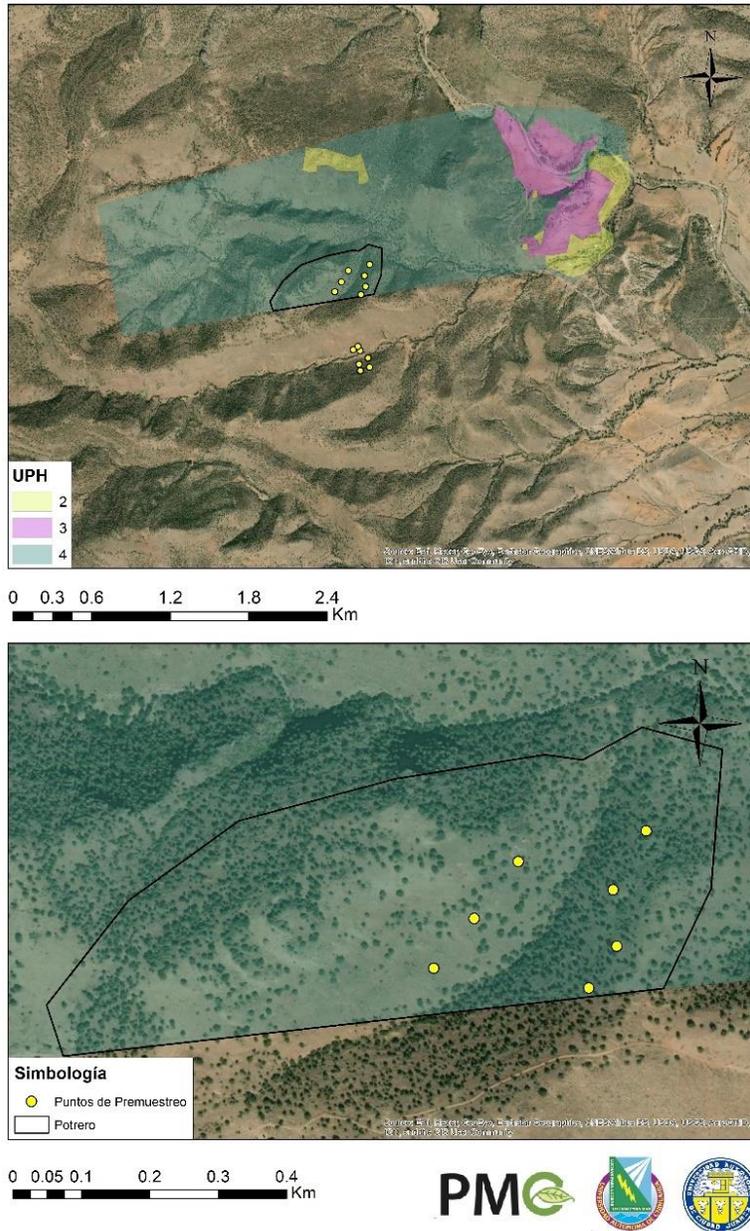
**Figura 19. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho Loma Colorada con su potrero seleccionado “El Papalote” y las unidades de muestreo colectadas por UPH, siendo un total de seis unidades muestrales en la UPH 2.**

La Figura 20 presenta las unidades de paisaje homogéneas del rancho Los Robles y su respectivo potrero Cerdón de Lico, también la ubicación geográfica de siete unidades muestrales analizadas.



**Figura 20. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho Los Robles con su potrero seleccionado “Cordón de Lico” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo un total de siete unidades muestrales en la UPH 1.**

La Figura 21 presenta las unidades de paisaje homogéneas del rancho Cerro Colorado y su respectivo potrero Cerro Colorado, también la ubicación geográfica de seis unidades muestrales analizadas.



**Figura 21. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho Cerro Colorado con su potrero seleccionado y los puntos de muestreo recolectados por UPH, siendo un total de siete unidades muestrales en la UPH 4.**

## 6. Diseño de la Campaña de Muestreo Final

### 6.1 Diferencia Mínima Detectable

El diseño muestral para el proceso de caracterización y verificación de los cambios de los almacenes de carbono fue crítico para determinar los cambios asociados a los almacenes y definir sus costos.

### 6.2 Determinación del número de muestras del muestreo final

En el **Anexo 9: MC pre-muestreo campo** se encuentra la información de campo y pre-procesamiento de las muestras compuestas (MC) de la campaña de pre-muestreo.

Con el uso de la DMD calculada y la potencial, el **Anexo 10: Análisis pre-muestreo** muestra el número de muestras requeridas en el muestreo final, usando un DMD potencial mínimo. En el caso de valores de DMD del muestreo, se utilizó un valor máximo de 20, dado que el número de muestras requerido es muy alto.

En lo general, de acuerdo con el Cuadro 14, los requerimientos del número de muestras están satisfechos, con excepción de las UPH con número máximo de 20 muestras.

**Cuadro 14. Resultados de las estimaciones del número de muestras final y adicional requerido para un DMD potencial mínima.**

UPH	RANCHO	POTRERO	Superficie (ha)	Promedio COS	Desv. Est. COS	t alfa	t beta	DMD original	n inicial	t alfa	t beta	DMD muestreo	n final	DMD potencial mínimo	n Adicional
4	CERRO COLORADO	CERRO COLORADO	26.1	28.19	8.97	2.571	0.920	12.790	6	2.093	0.861	5.928	20	3.5	14
1	LOS ROBLES	CORDON DE LICO	26.2	29.92	7.42	2.571	0.920	10.576	6	2.093	0.861	4.902	20	3.5	14
4	EL UNO	EL BOSQUE	931.6	6.90	0.99	2.776	0.941	1.651	5	2.776	0.941	1.651	5	3.5	0
3	EL UNO	EL BOSQUE	602.6	9.76	5.93	4.303	1.061	18.351	3	2.093	0.861	3.914	20	3.5	17
2	EL UNO	EL BOSQUE	371.1	7.96	3.49	4.303	1.061	10.794	3	2.160	0.870	2.823	14	3.5	11
2	EL UNO	LA BASCULA	681.9	5.44	0.58	2.776	0.941	0.961	5	2.776	0.941	0.961	5	3.5	0
4	EL UNO	LA BASCULA	213.1	5.58	0.91	4.303	1.061	2.833	3	3.182	0.978	1.903	4	3.5	1
3	EL UNO	LA BASCULA	804.6	7.10	1.32	3.182	0.978	2.739	4	2.776	0.941	2.189	5	3.5	1
2	LOMA COLORADA	LOMA COLORADA	508.4	1.66	0.85	2.776	0.941	1.409	5	2.776	0.941	1.409	5	3.5	0
4	EL CHAMIZO	EL CHAMIZO	959.8	6.02	3.94	2.447	0.906	4.996	7	2.110	0.863	2.763	18	3.5	11
0	LA ENRAMADA	LA ENRAMADA VIEJA	317.2	12.37	2.58	2.571	0.920	3.675	6	2.306	0.889	2.746	9	3.5	3
1	LA ENRAMADA	LA ENRAMADA VIEJA	73.0	13.83	4.87	2.776	0.941	8.091	5	2.093	0.861	3.215	20	3.5	15
3	CARRETAS	LAS YEGUAS	61.5	13.01	3.11	4.303	1.061	9.623	3	2.228	0.879	2.911	11	3.5	8
4	CARRETAS	LAS YEGUAS	74.0	9.05	6.81	4.303	1.061	21.076	3	2.093	0.861	4.495	20	3.5	17
1	CARRETAS	LAS YEGUAS	58.8	16.96	2.06	4.303	1.061	6.378	3	2.571	0.920	2.935	6	3.5	3

## 7. Fase de Muestreo Final

Para llevar un orden en la recolección de las muestras finales, se preestableció un identificador para cada rancho, UPH y muestra recolectada:

Ejemplo:

C1241

**C:** Muestra compuesta

**1:** Número de muestra

**2:** Número de potrero (en caso de haber tomado en dos o más potreros por rancho)

**4:** Número de Rancho

**1:** Número de UPH

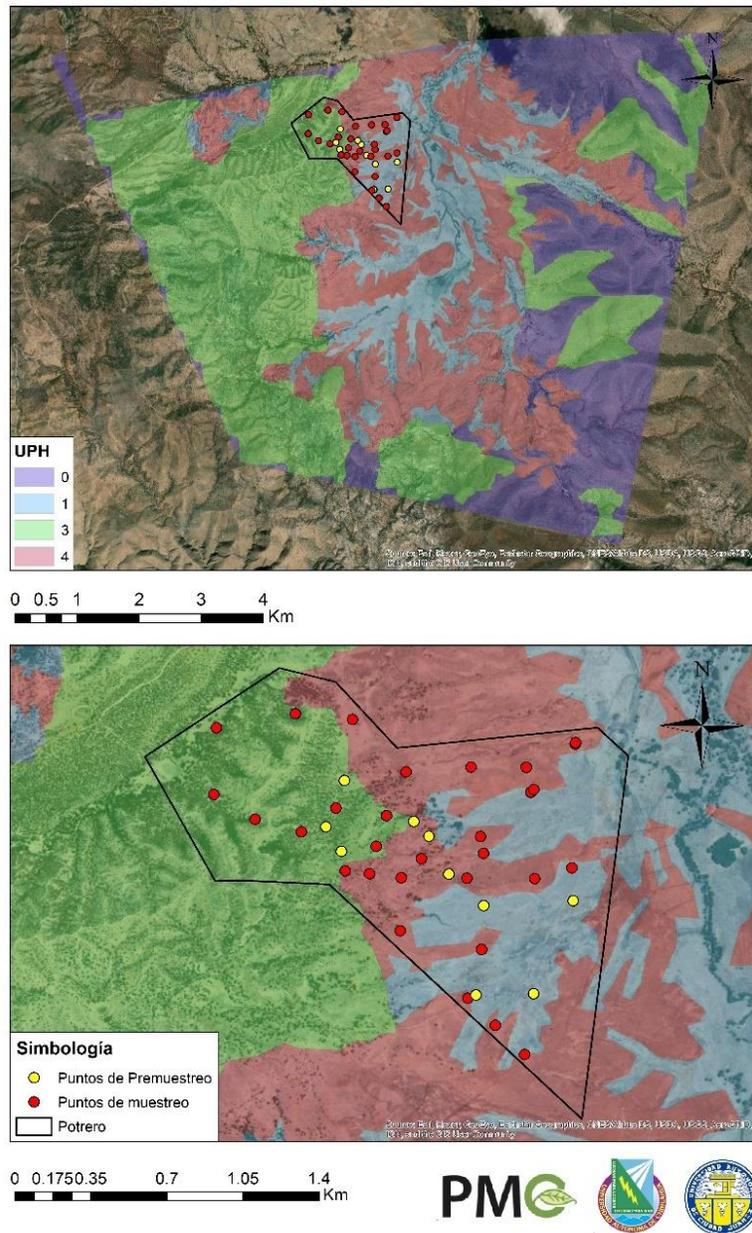
El número de ranchos fue identificado de la siguiente manera: 1) Los Robles, 2) El Uno, 3) Carretas, 4) La Enramada, 5) El Chamizo, 6) Loma Colorada y 7) Cerro Colorado

La cantidad de muestras recolectadas fueron 115, el Cuadro 15 presenta el resumen del muestreo para cada rancho, potrero y UPH, de acuerdo con los resultados de la sección anterior.

**Cuadro 15. Número de muestras recolectadas en el muestreo final.**

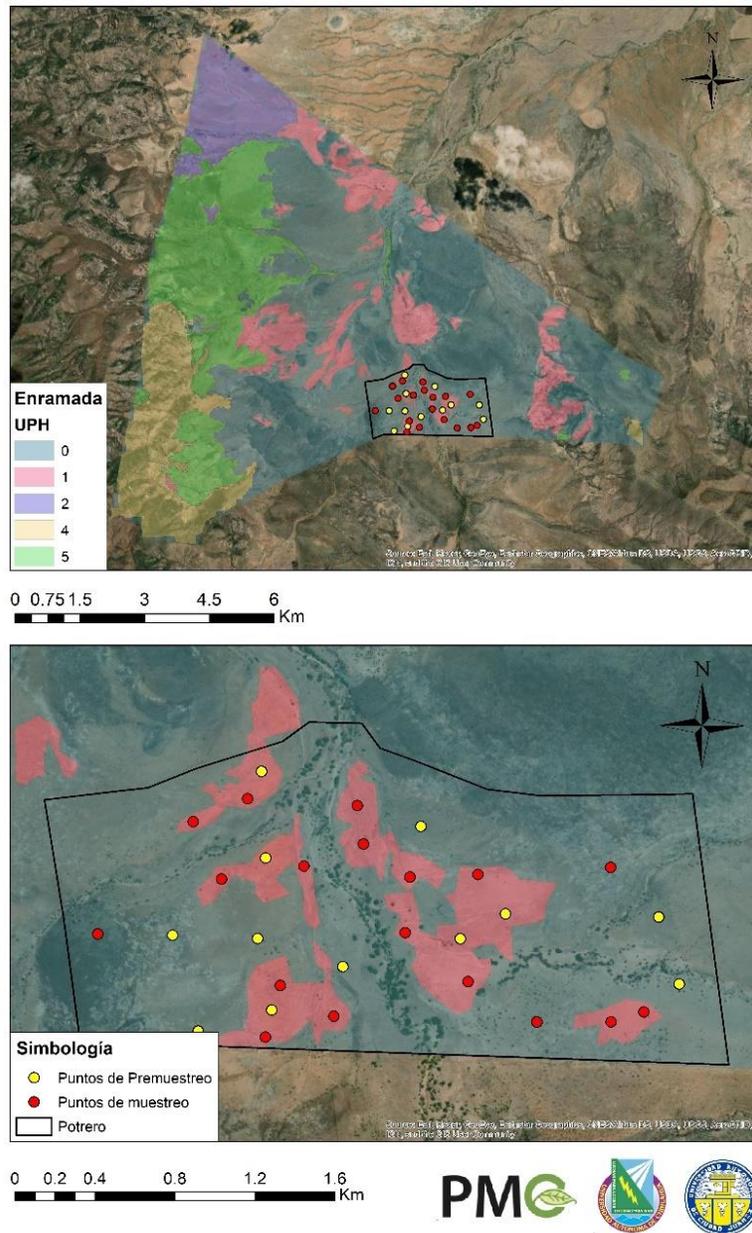
Rancho	Potrero	Superficie del Potrero (ha)	Manejo	UPH Muestreadas	No. de Unidades Muestrales
Carretas	Las Yeguas	194.3	Regenerativo	1,3,4	28
La Enramada	Enramada Vieja	390.2	Convencional	0,1	18
El Chamizo	La Sabaneta	973.2	Regenerativo	4	11
Loma Colorada	El Papalote	508.4	Convencional		0
El Uno	La Bascula	1699.2	Regenerativo	3,4	2
El Uno	El Bosque	1905.3	Convencional	2,3	28
Los Robles	cordón de Lico	26.2	Regenerativo	1	14
Cerro Colorado	Cerro Colorado	26.1	Convencional	4	14

La Figura 22 presenta las unidades de paisaje homogéneas del rancho Carretas y de su respectivo potrero Las Yeguas, también la ubicación geográfica de las 28 unidades muestrales analizadas.



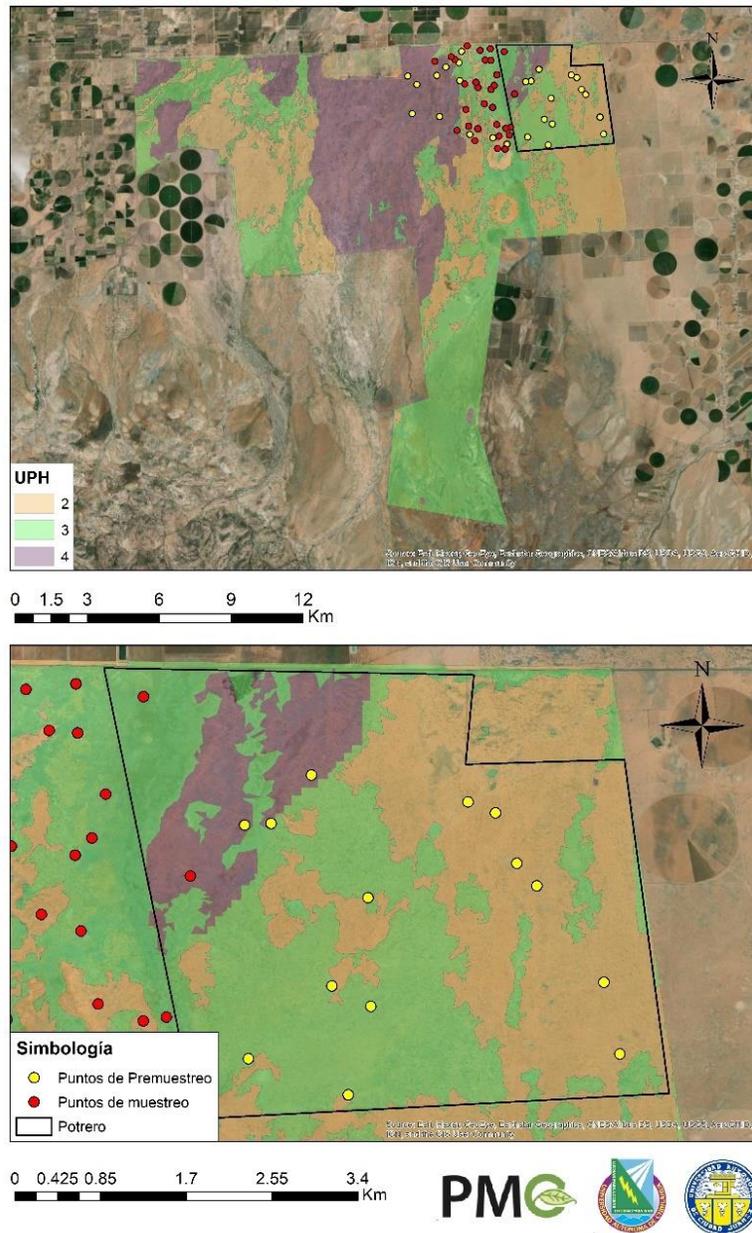
**Figura 22. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho Carretas con su potrero seleccionado “Las Yeguas” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo tres unidades en la UPH 1, ocho en la UPH 3 y 17 en la UPH 4, contando con 28 unidades muestrales en total.**

La Figura 23 presenta las unidades de paisaje homogéneas del rancho La Enramada y su respectivo potrero La Enramada Vieja, también la ubicación geográfica de 11 unidades muestrales analizadas.



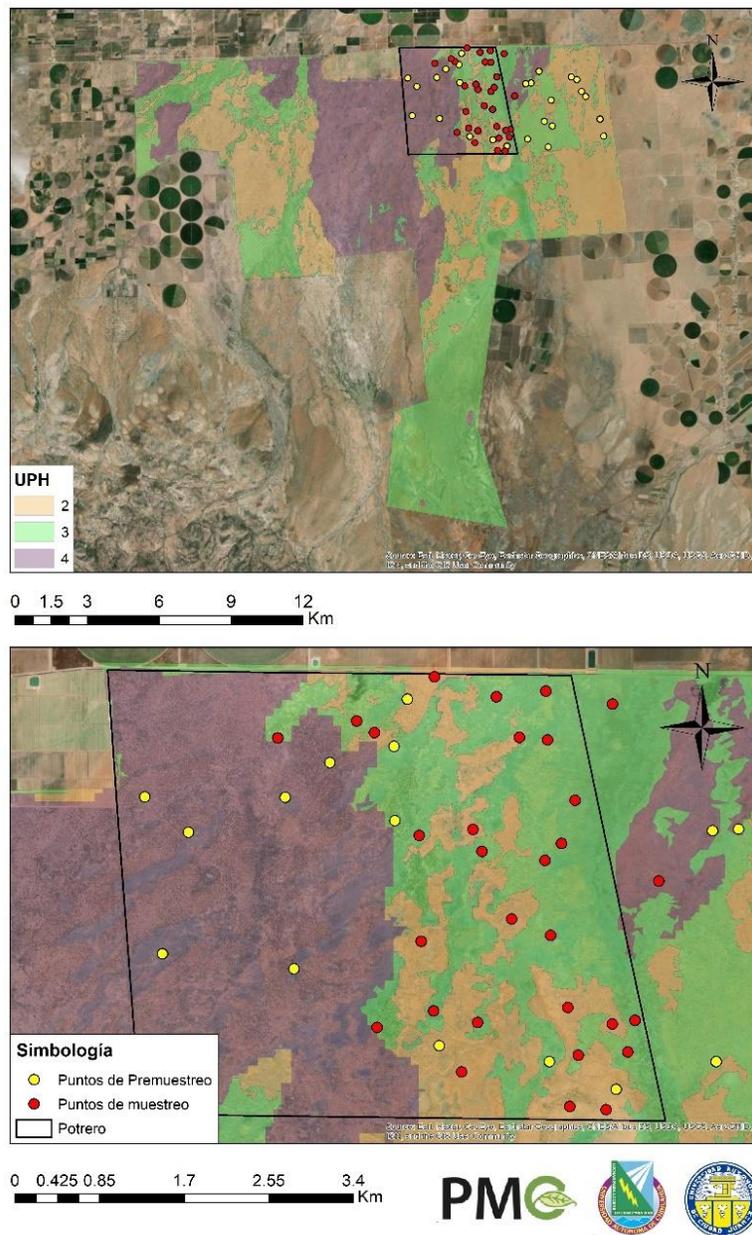
**Figura 23. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho La Enramada con su potrero seleccionado “La Enramada Vieja” y las unidades de muestreo colectadas por UPH, siendo tres unidades en la UPH 0 y 14 unidades en la UPH 1, contando con 17 unidades muestrales en total.**

La Figura 24 presenta las unidades de paisaje homogéneas del rancho el Uno y su respectivo potrero La Bascula, también la ubicación geográfica de dos unidades muestrales analizadas.



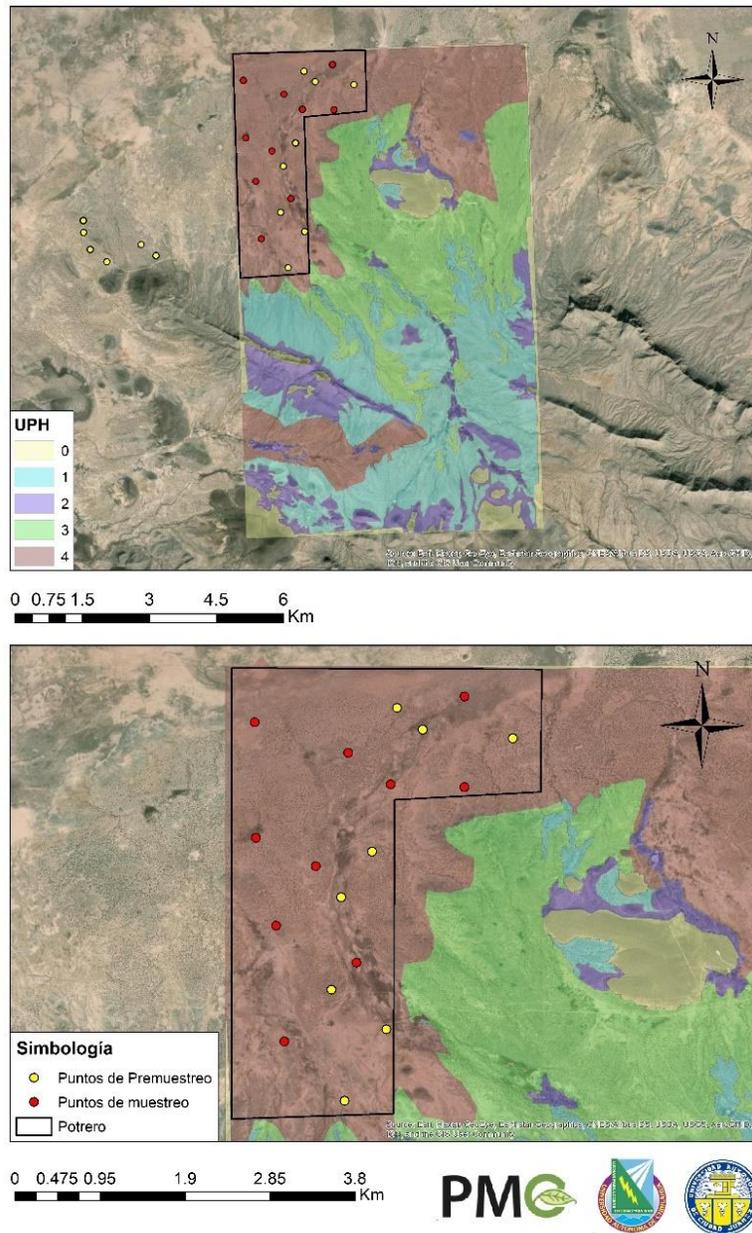
**Figura 24. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho El Uno con uno de sus potreros seleccionados “La Bascula” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo una unidad en la UPH 3 y una unidad en la UPH 4, contando con dos unidades muestrales en total.**

La Figura 25 presenta las unidades de paisaje homogéneas del rancho el Uno y su respectivo potrero El Bosque, también la ubicación geográfica de 28 unidades muestrales analizadas.



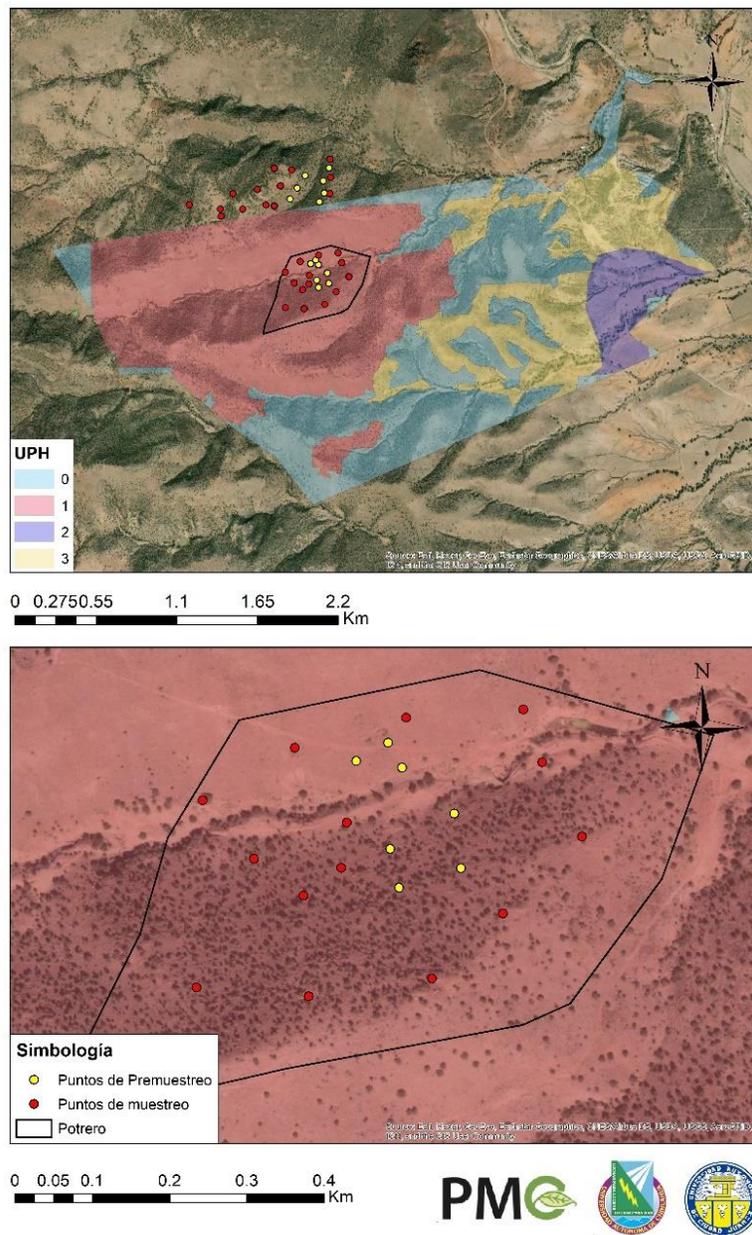
**Figura 25. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho El Uno con uno de sus potreros seleccionados “El Bosque” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo 11 unidades en la UPH 2 y 17 unidades en la UPH 3, contando con 28 unidades muestrales en total.**

La Figura 26 presenta las unidades de paisaje homogéneas del rancho el Chamizo y su respectivo potrero La Sabaneta, también la ubicación geográfica de 11 unidades muestrales analizadas.



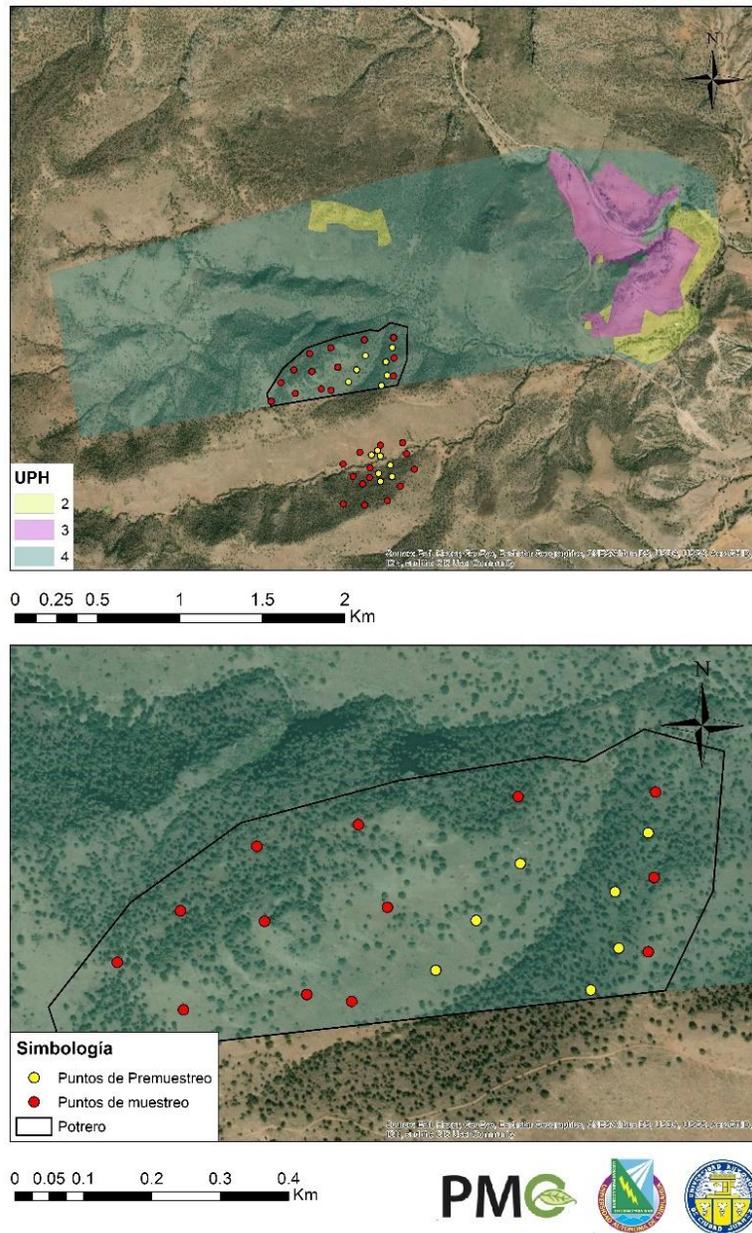
**Figura 26. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho El Chamizo con su potrero seleccionado “La Sabaneta” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo un total de 11 unidades muestrales en la UPH 4.**

La Figura 27 presenta las unidades de paisaje homogéneas del rancho Los Robles y su respectivo potrero Cordón de Lico, también la ubicación geográfica de 14 unidades muestrales analizadas.



**Figura 27. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho Los Robles con su potrero seleccionado “Cordón de Lico” y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo un total de 14 unidades muestrales en la UPH 1.**

La Figura 28 presenta las unidades de paisaje homogéneas del rancho Cerro Colorado y su respectivo potrero Cerro Colorado, también la ubicación geográfica de 14 unidades muestrales analizadas.



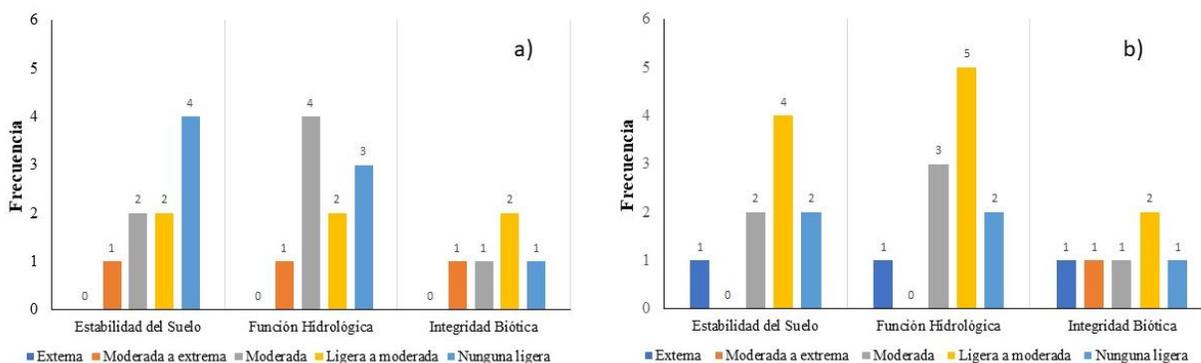
**Figura 28. Unidades de Paisaje Homogéneas. Rancho Cerro Colorado con su potrero seleccionado y las unidades muestrales colectadas por UPH, siendo un total de 14 unidades muestrales en la UPH 4.**

## 8. Indicadores de Salud del Agostadero

El **Anexo 11. Indicadores de salud del agostadero** presenta a nivel de sitio los resultados individuales del estado de salud del agostadero, en él se puede observar el rancho, UPH, número de muestra (relacionado con el muestreo de carbono) y los índices de salud del pastizal. A partir de las muestras individuales recabadas mediante la información del Cuadro 5, se procedió a seleccionar la moda del número de muestras por potrero. Por ejemplo, en el potrero Las Yeguas se recabaron 25 muestras del índice de salud del agostadero y en el indicador “Canalillos” 16 de 25 muestras tienen una descripción de daño de ninguna a ligera, por lo tanto, se consideró a esta descripción como el valor representativo del potrero para hacer comparaciones

Aunado a lo anterior, los indicadores se agruparon de acuerdo con su atributo (ver Cuadro 5): estabilidad del suelo (S) (indicadores 1-6, 8, 9 y 11); función hidrológica (W) (indicador 1-5, 7-11 y 14); integración biológica (B) (indicador 9-10 y 11-14).

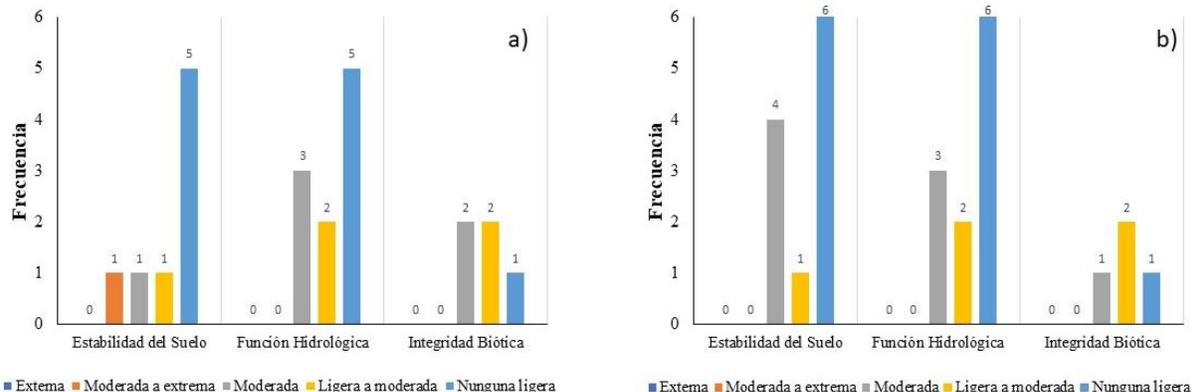
La Figura 29 muestra la frecuencia de indicadores por atributos, con respecto a la descripción de los potreros Cordón de Lico y Cerro Colorado. En el atributo de estabilidad del suelo, el primer potrero mostró menor presencia de canalillos y cárcavas; sin embargo, ambos potreros presentaron una compactación del suelo de moderada a extrema. Con respecto, al atributo de función hidrológica, Cordón de Lico presentó mayor conectividad hidrológica; es decir los parches de suelo desnudo tienen asociado un patrón de escurrimiento mayor que el área de Cerro Colorado. Por último, en integridad biótica, ambos potreros poseen patrones similares: mortalidad de plantas de ligera a nula; sin embargo, Cerro Colorado mostró una compactación del suelo extrema.



**Figura 29. Resumen de los indicadores de salud del agostadero por atributo en los potreros Cordón de Lico (a) y Cerro Colorado (b).**

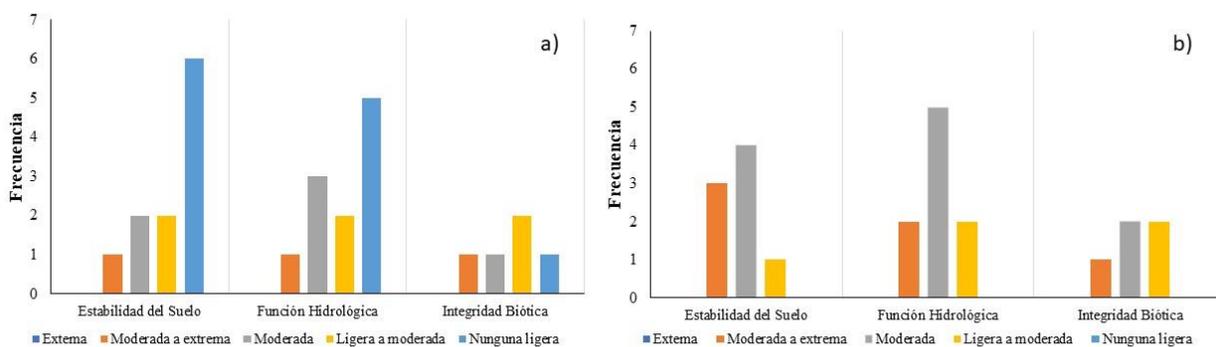
La Figura 30 muestra la frecuencia de indicadores por atributos, con respecto a la descripción de los potreros La Bascula y El Bosque, en el rancho el Uno. En el atributo de estabilidad del suelo, ambos potreros no presentaron evidencia de canalillos o cárcavas (nula a ligera); sin embargo, el potrero El Bosque ya tiene indicios de una reducción de la densidad de plantas y se observó una moderada pérdida de suelo o degradación en comparación del potrero La Bascula. En lo que refiere al atributo de función hidrológica, los resultados en ambos predios son similares: presentan baja conectividad hidrológica en los patrones de flujo y una moderada compactación de suelo. En

integridad biótica, el potrero La Bascula presento mayor frecuencia en lo que respecta a la mortalidad de vegetación.



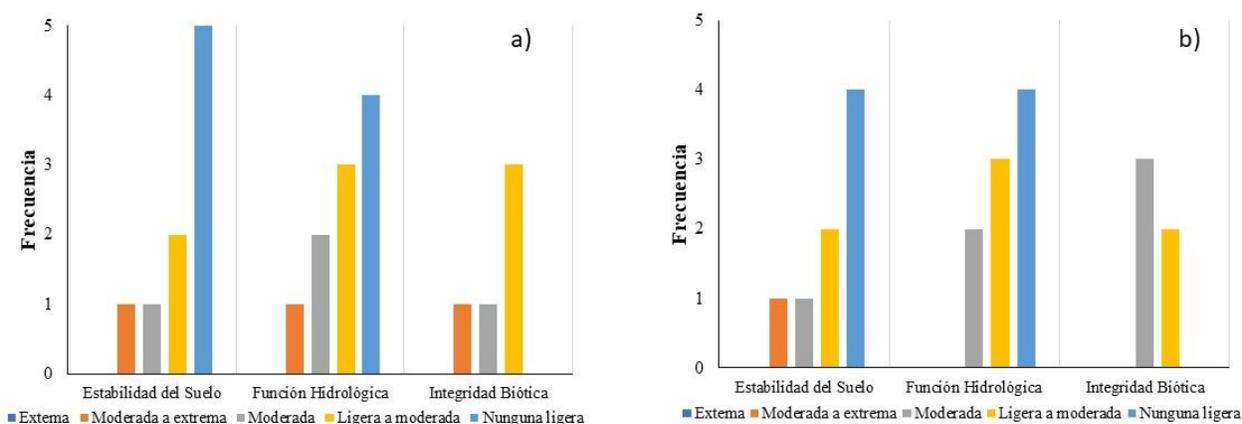
**Figura 30. Resumen de los indicadores de salud del agostadero por atributo en los potreros La Bascula (a) y El Bosque (b).**

La Figura 31 muestra la frecuencia de indicadores por atributos, con respecto a la descripción de los potreros La Sabaneta y El Papalote. Esta comparación fue la que más evidencia mostró en la degradación de un potrero, El Papalote posee mayor degradación. En la estabilidad del suelo El Papalote tiene una descripción de moderada a extrema en lo referente a la presencia de canalillos y cárcavas, a comparación del potrero La Sabaneta que presento una descripción de ligera a moderada. El patrón de escurrimiento fue mayor en El Papalote que en La Sabaneta, por presentar una moderada a extrema compactación del suelo (función hidrológica), densidad alta de parches sin vegetación y baja composición botánica (integridad biótica).



**Figura 31. Resumen de los indicadores de salud del agostadero por atributo en los potreros La Sabaneta (a) y El Papalote (b).**

La Figura 32 muestra la frecuencia de indicadores por atributos, con respecto a la descripción de los potreros Las Yeguas y Enramada Vieja. En lo que respecta a atributos relacionados a la estabilidad del suelo y función hidrológica, ambos potreros presentan atributos similares de acuerdo con la descripción del sitio. En general, presentan poca evidencia (ninguna a ligera) de formación de canalillos y cárcavas, existe una ligera conectividad hídrica en los patrones de flujo. Las áreas de suelo desnudo son mínimas, aunque presentan evidencia de compactación del suelo (moderada a extrema). En el atributo de integridad biótica, la diferencia entre sitios radica en que el potrero La Enramada Vieja, presenta una mayor predisposición a la erosión del suelo y la presencia de vegetación muerta, atribuida al pastoreo continuo.



**Figura 32. Resumen de los indicadores de salud del agostadero por atributo en los potreros Las Yeguas (a) y La Enramada Vieja (b).**

El **Anexo 12. Memoria fotográfica por potrero** muestra fotografías de la superficie de los diferentes potreros, para la comparación de las condiciones actuales.

## 9. Revisión del Análisis de la Campaña de Pre-Muestreo

Terminada la campaña de muestreo final de las UPH de los potreros de los ranchos ganaderos de Chihuahua se procedió a analizar los datos de muestreo generados en las unidades de muestreo.

Para la campaña de pre-muestreo se realizaron determinación del pH y textura de los suelos, para analizar la factibilidad de analizar el carbono orgánico particulado (COP) en las muestras de suelo. El Cuadro 16 muestra los resultados obtenidos para el caso de la textura y pH (**Anexo 13: Análisis\_Pre-Muestreo-PF**). En este cuadro se incluyen los datos de las unidades muestrales MI (muestras individuales), procesadas a nivel de promedios del COS a través de la consideración de los cinco puntos de muestreo definidos.

**Cuadro 16. Textura y pH de la campaña de pre-muestreo.**

No. Muestra	UPH	Rancho	Potrero	Manejo	Longitud	Latitud	Superficie (ha)	pH 1:2.5 H <sub>2</sub> O	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura
1	4	Cerro Colorado	Cerro Colorado	Convencional	-106.61598510	28.60218420	26.12	7.81	39.84	30.00	30.16	Franco arcillosa
2	4	Cerro Colorado	Cerro Colorado	Convencional	-106.61545280	28.60238300		7.68	42.00	28.00	30.00	Franco arcillosa
3	4	Cerro Colorado	Cerro Colorado	Convencional	-106.61487446	28.60338942		8.05	35.84	30.00	34.16	Franco arcillosa
4	4	Cerro Colorado	Cerro Colorado	Convencional	-106.61319420	28.60399180		7.04	41.84	30.00	28.16	Franco arcillosa
5	4	Cerro Colorado	Cerro Colorado	Convencional	-106.61362780	28.60321680		7.14	41.84	30.00	28.16	Franco arcillosa
6	4	Cerro Colorado	Cerro Colorado	Convencional	-106.61358060	28.60247410		7.19	43.84	30.00	26.16	Franco arcillosa
100	4	Cerro Colorado	Cerro Colorado	Convencional	-106.61394930	28.60192380						
1	1	Los Robles	Cordon de Lico	Regenerativo	-106.61358261	28.59754922	26.24	6.99	51.68	22.36	25.96	Franco arcillo arenosa
2	1	Los Robles	Cordon de Lico	Regenerativo	-106.61432761	28.59713738		7.40	54.00	26.00	20.00	Franco arcillo arenosa
3	1	Los Robles	Cordon de Lico	Regenerativo	-106.61422585	28.59668520		7.39	53.68	24.36	21.96	Franco arcillo arenosa
4	1	Los Robles	Cordon de Lico	Regenerativo	-106.61419016	28.59808343		7.80	40.24	29.80	29.96	Franco arcillosa
5	1	Los Robles	Cordon de Lico	Regenerativo	-106.61472432	28.59816151		7.33	42.24	27.44	30.32	Franco arcillosa
100	1	Los Robles	Cordon de Lico	Regenerativo	-106.61350582	28.59691240						
101	1	Los Robles	Cordon de Lico	Regenerativo	-106.61435358	28.59837489						
1	4	El Uno	El Bosque	Convencional	-108.50458000	30.87736000	931.59	6.46	60.24	13.44	26.32	Franco arcillo arenosa
2	4	El Uno	El Bosque	Convencional	-108.51647245	30.87871720		6.30	66.00	12.00	22.00	Franco arcillo arenosa
3	4	El Uno	El Bosque	Convencional	-108.51411440	30.88971800		7.30	64.24	9.44	26.32	Franco arcillo arenosa
4	4	El Uno	El Bosque	Convencional	-108.51805830	30.89239310		6.11	56.24	13.44	30.32	Franco arcillo arenosa
5	4	El Uno	El Bosque	Convencional	-108.50132750	30.89600640		6.37	72.24	7.44	20.32	Franco arcillo arenosa
100	4	El Uno	El Bosque	Convencional	-108.50536629	30.89288444						
1	3	El Uno	El Bosque	Convencional	-108.49554110	30.89750150	602.61	6.66	52.00	12.00	36.00	Franco arcillo arenosa
2	3	El Uno	El Bosque	Convencional	-108.49546730	30.89077870		6.13	52.76	16.72	30.52	Franco arcillo arenosa
3	3	El Uno	El Bosque	Convencional	-108.48151270	30.86897640		6.85	62.76	14.72	22.52	Franco arcillo arenosa
1	2	El Uno	El Bosque	Convencional	-108.49434380	30.90176000	371.13	8.58	34.76	14.72	50.52	Arcillosa
2	2	El Uno	El Bosque	Convencional	-108.49146750	30.87040760		7.08	70.76	6.72	22.52	Franco arcillo arenosa
3	2	El Uno	El Bosque	Convencional	-108.47546364	30.86646168		8.06	52.76	6.72	40.52	Arcillo arenosa
1	2	El Uno	La Bascula	Regenerativo	-108.43282760	30.86940331	681.92	6.90	62.76	14.72	22.52	Franco arcillo arenosa
2	2	El Uno	La Bascula	Regenerativo	-108.43471290	30.87580508		6.95	66.76	12.72	20.52	Franco arcillo arenosa
3	2	El Uno	La Bascula	Regenerativo	-108.44069640	30.88441682		7.72	56.76	14.72	28.52	Franco arcillo arenosa
4	2	El Uno	La Bascula	Regenerativo	-108.44437762	30.89094240		7.30	69.12	12.00	18.88	Franco arenosa
5	2	El Uno	La Bascula	Regenerativo	-108.44684022	30.89193805		7.65	59.12	14.00	26.88	Franco arcillo arenosa
100	2	El Uno	La Bascula	Regenerativo	-108.44248050	30.88643790						
1	4	El Uno	La Bascula	Regenerativo	-108.46080566	30.89432260	213.10	7.35	49.12	14.00	36.88	Franco arcillo arenosa
2	4	El Uno	La Bascula	Regenerativo	-108.46440724	30.89000579		6.61	57.12	16.00	26.88	Franco arcillo arenosa
3	4	El Uno	La Bascula	Regenerativo	-108.46577216	30.88936339		7.65	33.12	18.00	48.88	Arcillosa
1	3	El Uno	La Bascula	Regenerativo	-108.45576520	30.88336500	804.60	8.07	73.48	8.36	16.16	Franco arenosa
2	3	El Uno	La Bascula	Regenerativo	-108.45899307	30.87547629		7.85	73.48	6.36	20.16	Franco arenosa
3	3	El Uno	La Bascula	Regenerativo	-108.46642900	30.86897030		8.09	53.48	10.36	36.16	Franco arenosa
4	3	El Uno	La Bascula	Regenerativo	-108.45752130	30.86575426		7.29	71.48	10.36	18.16	Franco arenosa
100	3	El Uno	La Bascula	Regenerativo	-108.45551210	30.87365290						
1	2	Loma Colorada	El Papatote	Convencional	-107.36028250	31.36072460	508.44	9.45	73.48	10.36	16.16	Franco arenosa
2	2	Loma Colorada	El Papatote	Convencional	-107.36367290	31.36301420		9.45	73.48	10.36	16.16	Franco arenosa
3	2	Loma Colorada	El Papatote	Convencional	-107.37189550	31.35978690		9.32	79.12	2.72	18.16	Franco arenosa
4	2	Loma Colorada	El Papatote	Convencional	-107.37564700	31.36237640		9.21	85.12	0.72	14.16	Areno francosa
5	2	Loma Colorada	El Papatote	Convencional	-107.37709870	31.36587140		9.15	83.84	4.00	12.16	Areno francosa
100	2	Loma Colorada	El Papatote	Convencional	-107.37703990	31.36826020						
1	4	El Chamizo	La Sabaneta	Regenerativo	-107.32658910	31.38248030	959.82	9.92	77.84	6.00	16.16	Franco arenosa
2	4	El Chamizo	La Sabaneta	Regenerativo	-107.32151510	31.39472430		9.23	69.84	8.00	22.16	Franco arcillo arenosa
3	4	El Chamizo	La Sabaneta	Regenerativo	-107.32406470	31.39690610		9.43	83.84	4.00	12.16	Areno francosa
4	4	El Chamizo	La Sabaneta	Regenerativo	-107.31245120	31.39384600		9.36	81.84	8.00	10.16	Areno francosa
5	4	El Chamizo	La Sabaneta	Regenerativo	-107.32967780	31.37787390		9.01	45.84	24.00	30.16	Franco arcillo arenosa
6	4	El Chamizo	La Sabaneta	Regenerativo	-107.32935030	31.35740390		9.42	85.84	2.00	12.16	Areno francosa
7	4	El Chamizo	La Sabaneta	Regenerativo	-107.32515970	31.36458470		8.82	37.84	20.00	42.16	Arcillosa
100	4	El Chamizo	La Sabaneta	Regenerativo	-107.33065250	31.36858220						
1	0	La Enramada	La Enramada Vieja	Convencional	-108.77566310	30.71788300	317.24	7.08	67.12	13.44	19.44	Franco arenosa
2	0	La Enramada	La Enramada Vieja	Convencional	-108.77474660	30.71486120		7.64	67.12	13.44	19.44	Franco arenosa
3	0	La Enramada	La Enramada Vieja	Convencional	-108.79637410	30.71247570		6.92	52.56	18.00	29.44	Franco arcillo arenoso
4	0	La Enramada	La Enramada Vieja	Convencional	-108.79752390	30.71705890		7.62	30.56	16.00	53.44	Arcillosa
5	0	La Enramada	La Enramada Vieja	Convencional	-108.79369700	30.71691660		7.87	54.56	18.00	27.44	Franco arcillo arenoso
6	0	La Enramada	La Enramada Vieja	Convencional	-108.78986380	30.71565030		8.05	55.00	25.00	20.00	Franco arenosa
100	0	La Enramada	La Enramada Vieja	Convencional	-108.78635580	30.72196090						
1	1	La Enramada	La Enramada Vieja	Convencional	-108.78255180	30.71802960	73.05	7.66	52.56	18.00	29.44	Franco arcillo arenoso
2	1	La Enramada	La Enramada Vieja	Convencional	-108.78458660	30.71690550		7.73	60.56	20.00	19.44	Franco arenosa
3	1	La Enramada	La Enramada Vieja	Convencional	-108.79352000	30.72443540		7.18	62.56	18.00	19.44	Franco arenosa
4	1	La Enramada	La Enramada Vieja	Convencional	-108.79333380	30.72053900		6.94	58.56	16.00	25.44	Franco arcillo arenoso
5	1	La Enramada	La Enramada Vieja	Convencional	-108.79306380	30.71369780		7.13	63.00	15.00	22.00	Franco arcillo arenoso
1	3	Carretas	Las Yeguas	Regenerativo	-108.81177560	30.64653971	61.53	7.35	57.84	10.00	32.16	Franco arcillo arenosa
2	3	Carretas	Las Yeguas	Regenerativo	-108.81241736	30.64755313		7.44	63.84	18.00	20.16	Franco arcillo arenosa
3	3	Carretas	Las Yeguas	Regenerativo	-108.81164536	30.64947968		6.84	59.12	13.44	29.44	Franco arcillo arenoso
1	4	Carretas	Las Yeguas	Regenerativo	-108.80731320	30.64559740	74.02	8.24	61.12	13.44	25.44	Franco arcillo arenoso
2	4	Carretas	Las Yeguas	Regenerativo	-108.80814976	30.64716428		7.23	63.12	17.44	19.44	Franco arenosa
3	4	Carretas	Las Yeguas	Regenerativo	-108.80876623	30.64777921		8.53	61.12	15.44	23.44	Franco arcillo arenoso
1	1	Carretas	Las Yeguas	Regenerativo	-108.80587800	30.64428350	58.76	7.07	57.12	21.44	21.44	Franco arcillo arenoso
2	1	Carretas	Las Yeguas	Regenerativo	-108.80381080	30.64063340		7.45	45.12	21.44	33.44	Franco arcillo arenoso
3	1	Carretas	Las Yeguas	Regenerativo	-108.80216990	30.64449460		7.55	53.12	19.44	27.44	Franco arcillo arenoso
100	1	Carretas	Las Yeguas	Regenerativo	-108.80619110	30.64057550						

Los resultados de la textura muestran contenidos altos de arenas en los suelos, lo cual se manifiesta en bajos contenidos de carbono orgánico en los suelos, lo que limita la detectabilidad de cambios asociados al COP. Por esta razón se decidió no realizar determinación del COP como indicador de cambios en el COS. La determinación del carbono orgánico fue utilizada para la detección de cambios, tal como está definido en los términos de referencia.

En el caso del promedio del COS por UPH, se detectó un error en los análisis previos ya que los promedios se determinaron con relación a los nueve puntos de muestreo de las unidades muestrales y no con relación a los cinco puntos determinados de la revisión de la diferencia de los promedios. Desafortunadamente esto fue encontrado después de terminada la campaña de muestreo final.

En el Cuadro 17 se muestran los resultados (**Anexo 13: Análisis\_Pre-Muestreo-PF**) de las determinaciones del número de muestras finales (y adicionales para la campaña de muestreo final) analizadas con relación a la DMD potencial mínima ( $0.7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1} \times 5 \text{ años} = 3.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) y máxima ( $1.1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1} \times 5 \text{ años} = 5.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ). Los resultados del Cuadro 17 cumplen los límites establecidos para DMD, particularmente el máximo, por lo cual se consideró que el número de muestras adicionales cumple los requerimientos estadísticos.

Los análisis del Cuadro 17 fueron realizados considerando una profundidad fija (PF) de los muestreos de suelos.

**Cuadro 17. Análisis de los requerimientos de muestras finales y adicionales para la campaña de muestreo final.**

UPH	Rancho	Potrero	Promedio COS	Desv. Est. COS	t alfa	t beta	DMD original	n inicial	t alfa	t beta	DMD muestreo	DMD mínima potencial	DMD máxima potencial	n final	n adicional
4	Cerro Colorado	Cerro Colorado	52.31	12.96	2.447	0.906	16.42	7	2.086	0.860	8.33	3.5	5.5	21	14
1	Los Robles	Cordon de Lico	49.86	13.07	2.447	0.906	16.56	7	2.086	0.860	8.40	3.5	5.5	21	14
4	El Uno	El Bosque	12.96	2.06	2.571	0.92	2.93	6	2.776	0.941	3.12	3.5	5.5	6	0
3	El Uno	El Bosque	17.57	10.67	4.303	1.061	33.03	3	2.093	0.861	7.05	3.5	5.5	20	17
2	El Uno	El Bosque	14.33	6.27	4.303	1.061	19.43	3	2.160	0.870	5.08	3.5	5.5	14	11
2	El Uno	La Bascula	9.50	1.17	2.571	0.92	1.66	6	2.571	0.920	1.66	3.5	5.5	6	0
3	El Uno	La Bascula	11.96	2.75	2.776	0.941	4.57	5	2.571	0.920	3.92	3.5	5.5	6	1
2	Loma Colorada	El Papalote	2.94	1.37	2.571	0.92	1.95	6	2.571	0.920	1.95	3.5	5.5	6	0
4	El Chamizo	La Sabaneta	11.91	7.23	2.365	0.896	8.34	8	2.101	0.862	4.92	3.5	5.5	19	11
0	La Enramada	La Enramada Vieja	22.95	4.60	2.447	0.906	5.83	7	2.262	0.883	4.57	3.5	5.5	10	3
1	La Enramada	La Enramada Vieja	24.90	8.76	2.776	0.941	14.56	5	2.093	0.861	5.79	3.5	5.5	20	15
3	Carretas	Las Yeguas	23.42	5.59	4.303	1.061	17.32	3	2.228	0.879	5.24	3.5	5.5	11	8
4	Carretas	Las Yeguas	16.30	12.25	4.303	1.061	37.94	3	2.093	0.861	8.09	3.5	5.5	20	17
1	Carretas	Las Yeguas	30.01	3.20	3.182	0.978	6.65	4	2.447	0.906	4.05	3.5	5.5	7	3

## 10. Resultados generales para el caso de profundidad fija

Los análisis de todas las unidades muestrales están en el **Anexo 14: Análisis muestreo final-PF**, caso de profundidad fija (PF), donde se han eliminado 12 datos (marcados en rojo) por tener valores de la densidad aparente (DAP) muy bajos, lo cual probablemente es producto de errores en la colecta del suelo de la barrena para situaciones donde la profundidad tuvo una profundidad inferior a 30 cm. Los valores de la concentración de carbono orgánico (materia orgánica) pueden ser utilizados para la estimación del COS usando relaciones empíricas, pero esto no fue realizado para conservar los niveles de incertidumbre. Los fragmentos gruesos (FG) también pueden ser utilizados, solo se requiere realizar estimaciones de la DAP.

El Cuadro 18 (**Anexo 15: Resultados muestreo final-PF**) muestra los resultados de todos los muestreos para la determinación de los promedios y varianzas asociadas a las UPH.

La implementación de la prueba *t* de Student para analizar diferencias en los promedios de los potreros de los ranchos ganaderos esta mostrada en el Cuadro 19 (**Anexo 15: Resultados muestreo final-PF**), para el caso de la profundidad fija (PF).

El Cuadro 19 muestra que, a excepción de los ranchos Loma Colorada (potrero El Papalote) y El Chamizo (potrero La Sabaneta), no se detectaron diferencias significativas en los promedios entre el manejo convencional y regenerativo. En el rancho El Uno, sin diferencias significativas, se encontró el COS promedio del manejo convencional es ligeramente superior al del manejo regenerativo.

La selección de los valores mínimo y máximo de la DMD potencial son congruentes con los resultados mostrados en el Cuadro 17.

En el **Anexo 16: Carbonatos** se encuentran las determinaciones del porcentaje de carbonatos en la fracción fina ( $\leq 2$  mm) del suelo, donde los resultados muestran valores relativamente importantes de carbono inorgánico del suelo. El contenido de carbonatos también incide en los valores de la densidad aparente (DAP) ya que actúa como agente cementante, reduciendo los valores esperados de la DAP

**Cuadro 18. Estimaciones de promedios y varianzas ponderadas por superficie de las UPH en cada potrero, caso PF.**

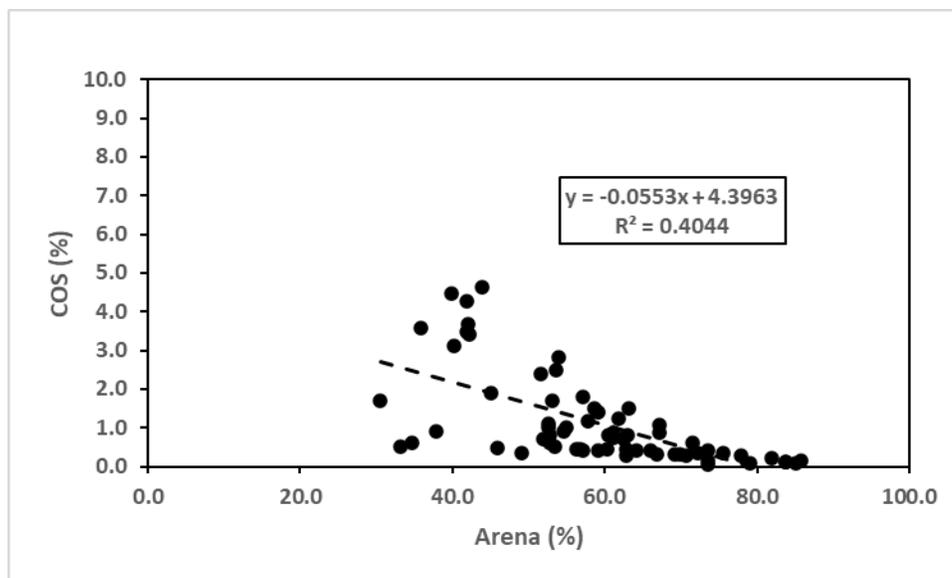
Rancho	Potrero	Manejo	Superficie (ha)	Prom COS	Desv Est COS	Var COS	n compuesto
Cerro Colorado	Cerro Colorado	Convencional	26.12	42.88	12.50	156.31	18
Los Robles	Cordon de Lico	Regenerativo	26.24	46.13	12.47	155.50	14
El Uno	El Bosque	Convencional	931.59	14.14	4.62	21.35	40
El Uno	La Bascula	Regenerativo	681.92	11.51	3.17	10.03	16
Loma Colorada	El Papalote	Convencional	508.44	2.94	1.37	1.88	6
El Chamizo	La Sabaneta	Regenerativo	959.82	9.41	5.86	34.32	19
La Enramada	La Enramada Vieja	Convencional	317.24	22.31	5.87	34.43	29
Carretas	Las Yeguas	Regenerativo	61.53	34.67	14.10	198.67	35

**Cuadro 19. Resultados de la prueba t de Student para diferencias en promedios del COS, caso PF.**

Potrero	Superficie (ha)	n	SS	$S_p^2$	$S_{p1-p2}$	v	t	t	$t_{0.05(2),v}$	Dif. COS promedio (rege. - conv.)	Tasa anual COS ( $Mg\ C\ ha^{-1}\ año^{-1}$ )	Prueba	Resultado Promedios
Cerro Colorado	26.12	18	2657.27	155.96	4.45	30	-0.729	0.729	2.042	3.245	0.649	$ t  < t_{0.05(2),v}$	Iguales, Regenerativo = Convencional
Cordon de Lico	26.24	14	2021.49										
El Bosque	931.59	40	832.81	18.21	1.26	54	2.082	2.082	2.005	-2.628	-0.526	$ t  > t_{0.05(2),v}$	Diferentes, Regenerativo < Convencional
La Bascula	681.92	16	150.40										
El Papalote	508.44	6	9.38	27.27	2.45	23	-2.645	2.645	2.069	6.469	1.294	$ t  > t_{0.05(2),v}$	Diferentes, Regenerativo > Convencional
La Sabaneta	959.82	19	617.79										
La Enramada Vieja	317.24	29	964.01	124.50	2.80	62	-4.414	4.414	1.999	12.366	2.473	$ t  > t_{0.05(2),v}$	Diferentes, Regenerativo > Convencional
Las Yeguas	61.53	35	6754.78										

La consideración del tipo del suelo y la textura del mismo debe ser tomada en cuenta al analizar los resultados del COS (Teague *et al.*, 2013; Garnett *et al.*, 2017), ya que se puede concluir incorrectamente, tal como es discutido por van der Ploeg *et al.* (2006) o no explicar los resultados (Teague y Foy, 2004). Por ejemplo, la concentración de carbono orgánico muchas veces se relaciona en forma positiva y lineal con el contenido de arcilla (%) (Gile y Grossman, 1979; Hewins *et al.*, 2018) y explica, junto con la precipitación, hasta el 85 % de la variación observada en el COS (McSherry y Ritchie, 2013). El uso de la textura del suelo como parámetro en el protocolo de pastizales ha sido considerado en CAR (2020).

La Figura 33 muestra la relación entre el porcentaje de arena y la concentración de carbono orgánico, que resulta mejor que la relación con el porcentaje de arcilla para los datos del proyecto.



**Figura 33. Relación entre el porcentaje de arena y la concentración de carbono orgánico del suelo.**

Los Cuadros 20 y 21 muestran los estadísticos de los atributos de los suelos analizados.

**Cuadro 20. Estadísticos de la textura del suelo, DAP y FG<sub>m</sub>.**

Potrero	Manejo	Arena (%)		Arcilla (%)		DAP (g/cm <sup>3</sup> )		FG <sub>m</sub>	
		Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.
Cerro Colorado	Convencional	40.87	2.77	29.47	2.73	0.98	0.14	0.58	0.06
Cordon de Lico	Regenerativo	48.37	6.61	25.64	4.64	1.01	0.37	0.44	0.09
El Bosque	Convencional	58.61	10.61	29.81	9.30	1.15	0.16	0.19	0.09
La Bascula	Regenerativo	60.65	12.01	26.72	9.69	1.25	0.09	0.30	0.07
El Papalote	Convencional	79.01	5.52	15.36	2.28	1.32	0.11	0.18	0.14
La Sabaneta	Regenerativo	68.98	19.39	20.73	11.76	1.16	0.20	0.15	0.08
La Enramada Vieja	Convencional	56.74	10.17	25.91	10.02	1.16	0.18	0.33	0.13
Las Yeguas	Regenerativo	57.72	5.61	25.82	5.14	1.12	0.17	0.46	0.09

**Cuadro 21. Estadísticos del COS, pH, CO<sub>3</sub> y CIS.**

Potrero	Manejo	COS (%)		pH 1:2 H <sub>2</sub> O		CO <sub>3</sub> (%)		CIS (%)	
		Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.
Cerro Colorado	Convencional	3.81	1.40	7.49	0.42	4.96	3.21	0.59	0.38
Cordon de Lico	Regenerativo	3.32	1.01	7.38	0.29	1.95	0.63	0.23	0.08
El Bosque	Convencional	0.54	0.20	6.90	0.80	1.84	1.43	0.22	0.17
La Bascula	Regenerativo	0.42	0.10	7.45	0.47	1.17	0.85	0.14	0.10
El Papalote	Convencional	0.09	0.04	9.32	0.14	4.76	1.91	0.57	0.23
La Sabaneta	Regenerativo	0.33	0.22	9.31	0.35	5.88	3.79	0.71	0.46
La Enramada Vieja	Convencional	1.07	0.37	7.44	0.40	1.21	0.68	0.15	0.08
Las Yeguas	Regenerativo	1.67	0.86	7.52	0.54	2.31	1.80	0.28	0.22

Para el caso del par de potreros del Rancho Cerro Colorado (potrero Cerro Colorado) de manejo convencional y Rancho Los Robles (Cordón de Lico) con manejo regenerativo, el COS del Cordón de Lico fue superior en 3.245 Mg C ha<sup>-1</sup> al del Cerro Colorado, aunque la diferencia no fue significativa. En términos de la salud del agostadero, el potrero Cerro Colorado mostro una compactación del suelo extrema, lo cual incide en una densidad aparente menor que en el caso del potrero Cordón de Lico, al contrario de los fragmentos gruesos que fue superior en el caso del potrero Cerro Colorado. La DAP y FG inciden directamente en el cálculo del COS, por lo que a pesar de que las concentraciones de carbono orgánico del potrero Cerro Colorado son mayores que las del potrero Cordón de Lico, los estimados del COS se modifican por efecto de la DAP y FG. Los contenidos de arena en el potrero Cordón de Lico son mayores que en el potrero Cerro Colorado, lo que reduce el potencial de captura del almacén de COS y explica las diferencias encontradas. En el potrero Cerro Colorado, la concentración de carbonatos (CIS) es mayor que en el caso del potrero Cordón de Lico, lo que plantea alguna limitación en el balance nutrimental del suelo, posiblemente fosforo. En resumen, las diferencias en los promedios del COS entre ambos potreros pueden ser explicadas por la textura del suelo y la presencia de carbonatos.

El rancho El Uno, con su potrero El Bosque de manejo convencional y potrero La Bascula de manejo regenerativo, presenta mayor promedio del COS en el potrero de manejo convencional que en el de manejo regenerativo (-2.628 Mg C ha<sup>-1</sup>). El potrero El Bosque muestra una degradación en la densidad de plantas y una mayor pérdida de suelos. La integridad biótica, particularmente la mortalidad de la vegetación, del potrero La Bascula es menor que la del potrero El Bosque, y explica parcialmente las diferencias encontradas. La textura con altos contenidos de arena predomina en ambos potreros y los fragmentos gruesos son mayores en el potrero La Bascula, explicando parcialmente la diferencia en el COS. Los carbonatos del suelo en ambos potreros son relativamente similares y las concentraciones de carbono orgánico son mayores en el potrero El Bosque que en el potrero La Bascula. En resumen, los promedios de COS en el potrero La Bascula son menores que en el potrero El Bosque debido a los valores de las concentraciones de carbono orgánico y fragmentos gruesos y la integridad biótica.

En el caso del rancho Loma Colorada con el potrero El Papalote con manejo convencional y rancho El Chamizo con potrero La Sabaneta con manejo regenerativo, el potrero El Papalote mostro más degradación y pérdida de la integridad biótica que el potrero La Sabaneta. La concentración promedio de carbono orgánico en el potrero El Papalote es mucho menor que la del potrero La Sabaneta, siendo el principal factor de las diferencias encontradas resultaron significativas ( $6.469 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ), donde la DAP y FG incidieron en las diferencias significativas, La concentración de carbonatos es mayor en el potrero La Sabaneta. En resumen, los promedios de la COS en el potrero La Sabaneta es mayor que en el potrero El Papalote por los ingresos de carbono al suelo (raíces, mantillo), donde las condiciones químicas y físicas entre los suelos de ambos potreros son relativamente similares.

Finalmente, para el rancho La Enramada con el potrero La Enramada Vieja con manejo convencional y el rancho Carretas con el potrero Las Yeguas con manejo regenerativo, las diferencias en la salud del agostadero son mínimas, con excepción de la integridad biótica en la que el potrero La Enramada Vieja presenta mayor deterioro, posiblemente por efecto del pastoreo continuo. El potrero La Enramada Vieja presenta promedios del COS menores a los de Las Yeguas ( $12.366 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ), aunque las diferencias no son significativas. El promedio de la concentración de carbono orgánico es mayor en el potrero Las Yeguas, aunque los FG de este potrero tengan valores mayores que el potrero La Enramada Vieja, donde se obtuvieron diferencias significativas entre los promedios del COS de ambos potreros, a pesar de estas diferencias. Algo similar sucede con la concentración de carbonatos, la cual es mayor en el potrero Las Yeguas que en el potrero La Enramada Vieja.

En lo general, con excepción de los potreros del rancho El Uno. Los potreros con manejo regenerativo contienen más COS en sus almacenes que los de manejo convencional.

## 11. Resultados generales para el caso de masa fija

### 11.1 *Análisis para el caso de masa fija*

La selección de Mref se realiza para el DAP menor de las muestras de los dos potreros a comparar en manejo (convencional y regenerativo), tal como se muestra en el **Anexo 17: Análisis muestreo final-MF**, donde el valor de Mref está asociado al DAP con celda rellena en azul claro.

#### 11.1.1 Resultados para el caso de masa fija

El Cuadro 22 (**Anexo 18: Resultados muestreo final-MF**) muestra los resultados de todos los muestreos para la determinación de los promedios y varianzas asociadas a las UPH.

La implementación de la prueba  $t$  de Student para analizar diferencias en los promedios de los potreros de los ranchos ganaderos esta mostrada en el Cuadro 23 (**Anexo 18: Resultados muestreo final-MF**), para el caso de la masa fija (MF).

Los resultados obtenidos al utilizar la DAP más pequeña como referencia para los pares de potrero analizadas generan los mismos resultados al utilizar la DAP promedio o la mayor.

Los resultados mostrados en el Cuadro 23 son similares que el caso de profundidad fija (Cuadro 19), por lo que su interpretación resulta en las mismas conclusiones discutidas en el caso de la profundidad fija. Nótese que para el caso del potrero Cerro Colorado (convencional) y Cordón de Lico (regenerativo), las diferencias de los promedios del COS están en el límite de su significancia.

+

**Cuadro 22. Estimaciones de promedios y varianzas ponderadas por superficie de las UPH en cada potrero, caso MF**

Rancho	Potrero	Manejo	Superficie (ha)	pH 1:2 H <sub>2</sub> O	Prom COS <sub>AEC</sub>	Desv Est COS <sub>AEC</sub>	Var COS <sub>AEC</sub>	n compuesto
Cerro Colorado	Cerro Colorado	Convencional	26.12	7.81	67.39	14.46	209.09	18
Los Robles	Cordon de Lico	Regenerativo	26.24	6.99	78.60	17.37	301.64	14
El Uno	El Bosque	Convencional	931.59	6.46	27.59	10.56	111.59	40
El Uno	La Bascula	Regenerativo	681.92	6.90	20.05	5.30	28.05	16
Loma Colorada	El Papalote	Convencional	508.44	9.45	5.22	2.42	5.85	6
El Chamizo	La Sabaneta	Regenerativo	959.82	9.92	16.25	9.69	93.85	19
La Enramada	La Enramada Vieja	Convencional	317.24	7.08	38.02	9.79	95.78	29
Carretas	Las Yeguas	Regenerativo	61.53	7.35	53.69	18.68	348.80	35

**Cuadro 23. Resultados de la prueba *t* de Student para diferencias en promedios del COS, caso MF.**

Potrero	Superficie (ha)	n	SS	S <sub>p</sub> <sup>2</sup>	S <sub>p1-P2</sub>	v	t	t	t <sub>0.05(2),v</sub>	Dif. COS promedio (rege. - conv.)	Tasa anual COS (Mg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Prueba	Resultado Promedios
Cerro Colorado	26.12	18	3554.56	249.19	5.63	30	-1.992	1.992	1.042	11.207	2.241	t  < t <sub>0.05(2),v</sub>	Igual, Regenerativo ≈ Convencional
Cordon de Lico	26.24	14	3921.26										
El Bosque	931.59	40	4351.85	88.38	2.78	54	2.711	2.711	2.005	-7.539	-1.508	t  > t <sub>0.05(2),v</sub>	Diferentes, Regenerativo < Convencional
La Bascula	681.92	16	420.75										
El Papalote	508.44	6	29.23	74.72	4.05	23	-2.725	2.725	2.069	11.030	2.206	t  > t <sub>0.05(2),v</sub>	Diferentes, Regenerativo > Convencional
La Sabaneta	959.82	19	1689.37										
La Enramada Vieja	317.24	29	2681.77	234.53	3.85	62	-4.076	4.076	1.999	15.674	3.135	t  > t <sub>0.05(2),v</sub>	Diferentes, Regenerativo > Convencional
Las Yeguas	61.53	35	11859.21										

## 12. Emisiones de metano por fermentación entérica

Para el cálculo de las emisiones de metano en los potreros de los ranchos ganadero se utilizó la información del **Anexo 19: Caracterización ganadera ranchos**.

En el **Anexo 20: Memoria calculo emisiones metano** se muestran las estimaciones de metano para cada par de potreros (manejo convencional y regenerativo) y los detalles de los cálculos para todos los potreros.

En el Cuadro 24 muestra las emisiones de metano para el periodo 2018-2022 en los diferentes potreros de los ranchos. EL Cuadro 25 muestra las emisiones promedio anuales de CH<sub>4</sub> y COS.

**Cuadro 24. Emisiones acumuladas de metano para el periodo 2018-2022 de los potreros**

Rancho	Potrero	Manejo	Emisiones de CH <sub>4</sub> por fermentación entérica en el periodo 2018-2022 (kg CH <sub>4</sub> )	Emisiones de CH <sub>4</sub> por fermentación entérica en el periodo 2018-2022 (kg CO <sub>2e</sub> )
Los Robles	Cordón de Lico	Regenerativo	2,937.39	82,247.0
Cerro Colorado	Cerro Colorado	Convencional	101,666.77	2,846,669.4
El Uno	La Bascula	Regenerativo	11,121.55	311,403.5
El Uno	El Bosque	Convencional	2,195.27	61,467.6
El Chamizo	La Sabaneta	Regenerativo	67,151.84	1,880,251.6
Loma Colorada	El Papalote	Convencional	52,533.52	1,470,938.5
Carretas	Las Yeguas	Regenerativo	1,296.64	36,306.0
La Enramada	La Enramada Vieja	Convencional	122,118.90	3,419,329.3

Se observó que la emisión de CH<sub>4</sub> total durante el periodo 2018-2022 es generalmente menor en el sistema regenerativo, lo cual se debe a que los animales permanecen menos tiempo en los potreros que en el sistema convencional. En la perspectiva de las emisiones promedio anuales por unidad de superficie, las emisiones de la ganadería holística son mayores que la convencional (Cuadro 25) y no compensan el secuestro del COS (Cuadro 25), por lo que la ganadería holística emite más de lo que secuestra.

Es necesario llevar a cabo más trabajos sobre la movilidad y adaptación del ganado a nuevas dietas, ya que es muy probable que cuando los animales ingresan a un potrero que no ha sido pastoreado por largo tiempo su consumo de materia seca sea más alto, mayor disponibilidad de forraje, y por tanto su emisión individual de CH<sub>4</sub> sea mayor, ya que el factor principal que determina la emisión de CH<sub>4</sub> es precisamente el consumo de materia seca.

**Cuadro 25. Promedio anual de emisiones CH<sub>4</sub> y secuestro COS.**

Potrero	Manejo	Promedio anual de emisiones de CH <sub>4</sub> por fermentación entérica (Mg CO <sub>2e</sub> /ha)	Ganancia promedio CH <sub>4</sub> anual del manejo (Mg CO <sub>2e</sub> /ha)	Ganancia promedio COS anual del manejo (Mg CO <sub>2</sub> /ha)
Cordón de Lico	Regenerativo	626.8	559.2	2.38
Cerro Colorado	Convencional	67.6		
La Bascula	Regenerativo	91.3	78.1	-1.93
El Bosque	Convencional	13.2		
La Sabaneta	Regenerativo	391.8	389.3	4.75
El Papalote	Convencional	2.5		
Las Yeguas	Regenerativo	118.0	114.1	9.08
La Enramada Vieja	Convencional	3.9		

### 13. Conclusiones y recomendaciones

Los resultados del proyecto muestran que en la mayoría de los potreros analizados el promedio del carbono orgánico del suelo (COS) muestra diferencias significativas entre el manejo convencional y el regenerativo, con excepción de los ranchos Los Robles (potrero Cordón de Lico) y Cerro Colorado (potrero Cerro Colorado) que mostraron diferencias no significativas (mayor promedio del COS en el manejo regenerativo que en el convencional). En los análisis de cada par de potreros se observó que la mayoría de las diferencias son explicadas por la textura, densidad aparente y fragmentos gruesos, además de las concentraciones de carbonatos. Esto es, los factores del COS inciden en las diferencias encontradas y no tanto las concentraciones de carbono orgánico, por lo que las diferencias, o falta de diferencias, son debidas a factores externos que no permiten su comparación sin introducir sesgos. Para el par de potreros con diferencias significativas, los factores externos resultaron ser relativamente similares.

En el caso de los potreros del rancho El Uno, los resultados reflejan las condiciones reales del agostadero en la actualidad, a diferencia de lo supuesto de trabajos realizados con anterioridad. La integridad biótica es una variable que explica los resultados obtenidos.

Aunque se intentó tener condiciones parecidas en las comparaciones entre los potreros analizados, el efecto de factores que controlan el COS incide en los resultados, por lo que deben tomarse con cautela los resultados obtenidos. No obstante esta situación, con excepción de los potreros del rancho El Uno, en el resto de los potreros las densidades promedio del COS con manejo regenerativo fueron mayores a las de manejo convencional.

En general, los resultados de los promedios de COS muestran valores más altos en la ganadería regenerativa que en la convencional, aunque estos resultados son enmascarados por factores externos.

La recomendación genérica es incrementar la productividad de los agostaderos para incrementar los ingresos de carbono en los suelos, en lo particular añadir fósforo y otros nutrimentos a los suelos, dados los pH encontrados. Con relación al manejo regenerativo no está claro el efecto del pisoteo intensivo en los potreros (cambios en la densidad aparente e infiltración del agua), a diferencia del incremento de nutrimentos producto de las excretas y orina del ganado. El alcance de este proyecto restringe realizar un esquema experimental orientado a este objetivo.

Se recomienda realizar otra evaluación (remuestreo) después de un periodo de tiempo razonable (3 a 5 años) para observar diferencias en potreros con un mismo manejo ganadero, particularmente para analizar si el COS está en estado estacionario o no.

Por otro lado, las emisiones de metano de los ranchos con ganadería regenerativa deben ser tomados en consideración en los balances de emisiones, ya que la evidencia experimental muestra que las prácticas de ganadería regenerativa emiten más de lo que secuestran. La situación de adaptabilidad del ganado (ajustes en las dietas y su digestibilidad) a la rotación en los potreros debe considerarse en análisis posteriores; aunque la información regional disponible es escasa.

En lo general, la ganadería sostenible con mejores prácticas ganaderas es recomendada para incentivar un mayor secuestro de carbono orgánico en los suelos. La consideración de las emisiones de metano, diferencia entre el manejo convencional y el sostenible, debe ser tomada en cuenta en los balances de emisiones.

## 14. Referencias Bibliográficas

- Abatzoglou, J.T., S.Z. Dobrowski, S.A. Parks, K.C. Hegewisch, 2018, Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015, *Scientific Data* 5:170191, doi:10.1038/sdata.2017.191
- Aguirre-Calderón, C.E. 2019. Índice de Sostenibilidad de Ranchos Ganaderos del Estado de Chihuahua. Pronatura Noreste A.C. y American Bird Conservancy. Informe Final SXH-113/21-AD/18. México 43 p.
- Aguirre, C. y J. Hoth. 2008. Mejores Prácticas Ganaderas para la Conservación y Uso Sustentable del Pastizal en el Desierto Chihuahuense. The Nature Conservancy 14 p.
- Alfaro-Arguello, R., S.A.W. Diemont, B.G. Ferguson, J.F. Martin, J. Nahed-Toral, J.D. Álvarez-Solís and R. Pinto-Ruíz. 2018. Steps toward sustainable ranching: an emergy evaluation of conventional and holistic management in Chiapas, Mexico. *Agricultural Systems* 103:639-646
- Biau, G. and E. Scornet. 2016. A random forest guided tour. *Test* 25 197–227.
- Bispo, A., L. Andersen, D.A. Angers, M. Bernoux, M. Brossard, L. Cécillon, R.N.J. Comans, J. Hamsen, K. Jonassen, F. Lamé, C. Lhuillery, S. Maly, E. Martin, A.E. Melnea, H. Sakai, Y. Watabe and T.K. Eglin. 2017. Accounting for carbon stocks in soils and measuring GHGs emission fluxes from soils: do we have the necessary standards? *Frontiers in Environmental Science* doi:10.3389/fenvs.2017.0041
- Blanco-Canqui, H., L.R. Stone, A.J. Schlegel, D.J. Lyon, M.F. Vigil, M.M. Mikha, P.W. Stahlman and C.W. Rice. 2009. No-till induced increase in organic carbon reduces maximum bulk density in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:1871-1879
- Bossio, D.A., S.C. Cook-Patton, P.W. Ellis, J. Fargione, J. Sanderman. P. Smith, S. Wood, R.J. Zomer, M. von Unger, I.M. Emmer and B.W. Griscom. 2020. The role of soil carbon in natural climate solutions doi:10.1038/s41893-020-0491-z
- Breiman, L. 2001. Random Forests. *Machine Learning*. 45:5-32. doi:10.1023/A:1010933404324. 2001.
- Briske, D:D., A.J. Ash, J.D. Derner and L. Huntsinger. 2014. Commentary: A critical assessment of the policy endorsement for holistic management. *Agricultural Systems* 125:50-53
- Briske, D.D., B.T. Bestelmeyer and J.R. Brown. 2014. Savory's unsubstantiated claims should not be confused with multipaddock grazing. *Rangelands* 36:39-42
- Briske, D.D., B.T. Bestelmeyer, J.R. Brown, S.D. Fuhlendorf and H. Wayne Polley. 2013. The Savory method can not green deserts or reverse climate change: a response to the Allan Savory TED video. *Rangelands* 35:72-74

- Briske, D.D., J.D. Derner, J.R. Brown, S.D. Fuhlendorf, W.R. Teague, K.M. Havstad, R.L. Guillen, A.J. Ash and W.D. Willms. 2008. Rotational grazing on rangelands: reconciliation of perception and experimental evidence. *Rangeland Ecol. Manage.* 61:613-617
- Camps-Valls, G., M. Campos-Taberner, A. Moreno-Martínez, S. Walther, G. Duveiller, A. Cescatti and S.W. Running. 2021. A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere. *Science Advances* 7(9), eabc7447.
- CAR. 2011. Accounting for Carbon in Soils. Prepared by A. Gershenson, J. Barsimantov and EcoShift Consulting, LLC
- CAR. 2019. Standardized GHG Accounting for Soil Organic Carbon Accrual on non-Forest Lands: challenges and Opportunities. Discussion Paper. Climate Action Reserve
- CAR. 2020. Grassland Project Protocol. Version 2.1. Climate Action Reserve
- CAR. 2022. Soil Enrichment Protocol. Version 1.1. Climate Action Reserve
- Carter, J., A. Jones, M. O'Brien, J. Ratner and G. Wuerthner. 2014. Holistic management: misinformation on the science of grazed ecosystems. *International Journal of Biodiversity* doi:10.1155/2014/163431
- Castelán-Ortega O. A., J. C. Ku-Vera, J.C. Ángeles-Hernández., M. Benaouda., G. S. Hernández-Pineda., T. L. Molina., L. Ramírez-Cancino., S.V. Castelán-Jaime., A.R. Praga-Ayala., F. Lazos-Balbuena., H. Montelongo-Pérez., M. González-Ronquillo., M. F. Vázquez-Carrillo., E. Cardoso-Gutiérrez., E. Aranda-Aguirre., D. Villegas-Estrada., A. P. Guadarrama-López. y G. Apodaca-Martínez. 2019. Capítulo 22: Ganadería. pp 492-528. En: F. Paz-Pellat, J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A. S. Velázquez-Rodríguez (Eds.). 2019. Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.
- Castelán-Ortega, O.A., J.C. Ku-Vera, S.V. Castelán-Jaime, G.S. Hernández-Pineda, G.S. B. Mohammed, J.C. Ángeles-Hernández, A.R. Praga-Ayala y H.D. Montelongo-Pérez. 2018. Inventory of enteric methane emissions by cattle in the dry-land regions of México using the IPCC 2006 Tier 2 main method. p. 739. In: *Advances in Animal Biosciences*. Presented at the Proceedings of the 10th International Symposium on the Nutrition of Herbivores., Cambridge University Press, Clermont-Ferrand, France.
- Cibils, A.F., R.J. Lira Fernández, G.E. Oliva and J.M. Escobar. 2014. Is holistic management really saving Patagonian rangelands from degradation? A response to Teague. *Rangelands* 36:26-27
- Coleman, K. and S. D. Jenkinson. 1996. RothC-26.3: a model of the turnover of carbon in soil. In: D. S. Powlson, P. Smith, and J. U. Smith (Eds.). *Evaluation of Soil Organic Matter Models using Existing Long-term Datasets*. Springer-Verlag. Berlin. Volume 38 pp.237-246
- Conant, R.T., C.E.P. Cerri, B.B. Osborne and K. Paustian. 2017. Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. *Ecological Applications* 27:662-668

- Conant, R.T. and K. Paustian. 2002a. Potential soil carbon sequestration in overgrazed grassland ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles* 16, 4, 1143 doi:10.1029/2001GB001661
- Conant, R.T. and K. Paustian. 2002b. Spatial variability of soil organic carbon in grasslands: implications for detecting change at different scales. *Environmental Pollution* 116:S127-S135
- Conant, R.T., K. Paustian and E.T. Elliot. 2001. Grassland management and conversion into grassland effects on soil carbon. *Ecological Applications* 11:343-355
- Conen, F., M.V. Yakutin and A.D. Sambuu. 2003. Potential for detecting changes in soil organic carbon concentrations resulting from climate change. *Global Change Biology* 9:1515-1520
- Cotler, H. 2020. Informe final del proyecto: Desarrollo de una metodología de monitoreo de suelos en sistemas ganaderos en Chiapas, Chihuahua, Jalisco y Veracruz, México. Contrato No. O-24-5-19-0134 FMCN
- DeLonge, M. and A. Basche. 2018. Managing grazing lands to improve soils and promote climate change adaptation and mitigation: a global synthesis. *Renewable Agriculture and Food Systems* doi:10.1017/S1742170517000588
- Di Stefano, J. 2003. How much power is enough? Against the development of an arbitrary convention for statistical power calculations. *Functional Ecology* 17:707-709
- Díaz-Solís, H., W.E. Grant, M.M. Kothmann, W.R. Teague, F. Paz Pellat and M. Bolaños González. 2016. Strategies to reducing GHG emissions in semi-arid rangelands of Mexico. *Terra Latinoamericana* 34:73-81
- Ellert, B.H. and J.R. Bettany. 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci.* 75:59-538
- Ellert, B.H., H.H. Janzen, A.J. VandenBygaart and E. Bremer. 2007. Measuring change in soil organic carbon storage. p.p. 25-38 In: M.R. Carter and E.G. Gregorich (eds.). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Second edition. CRC Pres, Taylor and Francis Group. Boca Raton, FL
- FAO. 2018. Global Livestock Environmental model, Model Description. Version 2.0. Rome, Italy.
- FAO. 2019. Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems. Guidelines for assessment. Rome, Italy 145 p.
- FAO. 2020. A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes. – GSOC-MRV Protocol. Rome, Italy doi:10.4060/cbo5gen 140 p.
- FAO. 2021. Global Livestock Environmental Assessment Model – Interactive (GLEAM-i), Guidelines. Version 1.9. Rome, Italy.

- Ferguson, B.G., S.A.W. Diemont, R. Alfaro-Arguello, J.F. Martin, J. Nahed-Toral, D. Álvarez-Solís and R. Pinto-Ruíz. 2013. Sustainability of holistic and conventional cattle ranching in the seasonally dry tropics of Chiapas, Mexico. *Agricultural Systems* 120:38-48
- Filazzola, A., C.Brown, M.A. Detlaft, A. Batbaatar, J. Grenke, T. Bao, I. Peetom Heida and J.F. Cahill. 2020. The effects of livestock grazing on biodiversity are multi-trophic: a meta-analysis. *Ecology Letters* 23:1298-1309
- Garnett, T., C.Godde, A. Muller, E. Rööös, P. smith, I. de Boer, E. zu Ermgassen, M. Herrero, C. vsn Middelaar, C. Schader and H. van Zanten. 2017. *Grazed and Confused? Food Climate Research Network. Oxford Martin Programme on the Future of Food. Environmental Change Institute, University of Oxford* 127 p.
- Ghosh, P.K. and S.K. Mahanta. 2014. Carbon sequestration in grassland systems. *Range Mgmt. Nd Agroforestry* 35:173-181
- Gile, L.H. and R.B. Grossman. 1979. *The Desert Project Soil Monograph. USDA-SCS. Washington, D.C.*
- Godde, C.M., I.J.M. de Boer, E. su Ermgassen, M. Herrero, C.E. van Middelaar, A. Muller, E. Rööös, C. Schader, P. Smith, H.H.E. van Zanten and T. Garnett. 2020. Soil carbon sequestration in grazing systems: managing expectations. *Climatic Change* 161:385-391
- Gold Standard. 2020. *Soil Organic Carbon Framework Methodology. Version 1.0. SDG:13 Climate Action. Developed by TREES Consulting*
- González-Molina, L., F. Carrillo-Anzures, M. Acosta-Mireles, A. Baéz-Pérez, E. Espitia-Rangel, J. Etchevers-Barra y F. Paz-Pellat. 2022. Experiencia mexicana en la implementación del modelo RothC-26.3 de la dinámica del carbono orgánico en suelos: alcances y limitaciones. *Terra Latinoamericana* 40:1-23.
- Gosnell, H., S. Charnley and P. Stanley. 2020. Climate change mitigation as a co-benefit of regenerative ranching: insights from Australia and the United States. *Interface Focus* doi:10.1098/rsfs.2020.0027
- Gosnell, H., N. Gill and M. Voyer. 2019. Transformational adaptation on the farm: processes of change and persistence in transitions to 'climate-smart' regenerative agriculture. *Global Environmental Change* doi:10.1016/J.GLOENVCHA.2019.10196
- Gosnell, H., K. Grimm and B.E. Goldstein. 2020. A half century of holistic management: what does the evidence reveal? *Agiculture and Human Values* 37:849-867
- Griscom, B.W., J. Adams, P.W. Ellis, R.A. Houghton, G. Lomax, D.A. Miteva, W.. Schlesinger, D. Shoch, P. Smith, P. Woodbury, C. Zganjar, A. Blackman, J. Compari, R.T. Conant, C. Delgado, P. Elias, T. Gopalakrishna, M.R. Hamsik, M. Herrero, J. Kiesecker, E. Landis, L. Laestadius, S.M. Leavitt, S. Minnemeyer, S. Polasky, P. Potapov, F.E. Putz, J. Sanderman, M. Silvius, E. Wollenberg and J. Fargione. 2017. Natural climate solutions. *PNAS* 114:1645-11650

- Grissom, G. 2014. A producer perspective on Savory's TED talk. *Rangelands* 36:30-31
- Grupo Ecológico Sierra Gorda, IAP. 2016. *Introducción al Holismo: Agua, Carbono y Vida en Suelos*. Querétaro 15 p.
- Guevara, M., C. Arroyo, N. Brunzell, C.O. Cruz, G. Domke, J. Equihua, J. Etchevers, D. Hayes, T. Hengl, A. Ibelles, K. Johnson, B. de Jong, Z. Libohova, R. Llamas, L. Nave, J.L. Ornelas, F. Paz, R. Ressler, A. Schwartz, A. Victoria, S. Wills and R. Vargas. 2020. Soil organic carbon across Mexico and the conterminous United States (1991-2010). *Global Biogeochemical Cycles*. 34, e2019GB006219, doi:10.1029/2019GB006219
- Henderson, B.B., P.J. Gerber, T.E. Hilinski, A. Falcucci, D.S. Ojima, M. Salvatorre and R.T. Conant. 2015. Greenhouse gas mitigation potential of the world's grazing lands: modeling soil carbon and nitrogen fluxes of mitigation practices. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 207:91-100
- Hewins, D.B., M.P. Lyseng, D.F. Schoderbek, M. Alexander, W.D. Willms, C.N. Carlyle, S.X. Chang and E.W. Bork. 2018. Grazing and climate effects on soil organic carbon concentration and particle-size association in northern grasslands. *Scientific Reports* doi:10.1038/s41598-018-19785-1
- Hollenchek, J.L., H. Gomes, F. Molinar, D. Galt and R. Valdez. 2000. Short-duration grazing the facts in 1999. *Rangelands* 22:18-22
- Homann, P.S., B.T. Bormann and J.R. Boye. 2001. Detecting treatment differences in soil carbon and nitrogen resulting from forest manipulations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:463-469
- Hoth, J. 2012. *Buenas Prácticas Ganaderas en México*. Elaborado para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA). Montreal 30 p.
- INECC-SEMARNAT. 2018. *Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Mexico 62 p.
- IPCC. 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Edited by Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraiishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner. Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC.
- IPCC. 2006. *Agriculture, forestry and other land use IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (eds.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan.
- IPCC. 2019. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, A. Osako, Y. Pyrozhenko, P. Shermanau and S. Federici (eds.). IPCC, Switzerland

- Itzkan, S. 2014. Upside (Drawdown), The Potential of Restorative Grazing to Mitigate Global Warming by increasing Carbon Capture on Grasslands, An Emerging Narrative. Planet-TECH Associates. Somerville, MA. 34 p.
- Jacobs, A., C. Heidecke, Z. Jumshudzade, B. Osterburg, H. Martens Paulsen and C. Poeplau. 2020. Soil organic certificates – potential and limitations for private and public climate action. *J. Sustainable Organic Agric. Syst.* 70:31-35
- Kelliher, F. and H. Clark. 2010. Methane emissions from bison—An historic herd estimate for the North American Great Plains. *Agricultural and Forest Meteorology* 150:473-477
- Lal, R. 2001. Potential of desertification control to sequester carbon and mitigate greenhouse effect. *Climate Change* 51:35-72
- Lal, R. 2003. Carbon sequestration in dryland ecosystems. *Environmental Management* 33:528-544
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123:1-22
- Lal, R. 2009. Sequestering carbon in soils of arid ecosystems. *Land Degradation and Development* 20:441-454
- McCosker, T. 2000. Cell grazing – the first 10 years in Australia. *Tropical Grasslands* 34:207-218
- McSherry, M.E. and M.E. Ritchie. 2013. Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. *Global Change Biology* 19:1347-1357
- Molina-Guerra, V.M., M. Pando-Moreno, E. Alanís-Rodríguez, P.A. Canizales-Velázquez, H. González-Rodríguez and J. Jiménez-Pérez. 2013. Composición y diversidad vegetal de dos sistemas de pastoreo en el matorral espinoso tamaulipeco del Noreste de México. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 4:361-371
- Molinar, F., H. de Souza Gomes, J.L. Holenckek and R. Valdez. 1998. Mexico, macro-economics, and range management. *Rangelands* 20:16-24
- Morris, C.D. 2021. How biodiversity-friendly is regenerative grazing? *Frontiers in Ecology and Evolution* doi:10.3389/fevo.2021.816374
- Newton, P., N. Civita, L. Frankel-Goldwater, K. Bartel and C. Johns. 2020. What is regenerative agriculture? A review of scholar and practitioner definitions based on processes and outcomes. *Frontiers in Sustainable Food Systems* doi:10.3389/fsufs.2020.577723
- Nordborg, M. 2016. Holistic Management – A Critical Review of Allan Savory’s Grazing Method. SLU/EPOK – Centre of Organic Food and Farming and Chalmers SLU, Sweden 45 p.
- Oldfield, E.E., A.J. Eagle, R.L. Rubin, J. Rudek, J. Sanderman and D.R. Gordon. 2021. Agricultural Soil Carbon Credits: Making Sense of Protocols for Carbon Sequestration and Net Greenhouse Gas Removals. Environmental Defense Fund. New York, N.Y. 41 p.

- O'Reagain, P.J. and J.R. Turner. 1992. An evaluation of the empirical basis for grazing management recommendations for rangeland in southern Africa. *J. Grassl. Soc. S. Afr.* 9:38-49
- Ogle, S.M., R.T. Conant and K. Paustian. 2004. Deriving grassland management factors for a carbon accounting method developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Environmental Management* 33:474-484
- Padilla, J., J.D. Etchevers, R.C. Gomora, C.I. Hidalgo, M. Carrasco y V. Saynes. 2012. Relación entre los métodos TOC, LOI, Walkley-Black y NIR para determinar carbono en suelos. pp. 187-194. En: F. Paz y R. Cuevas (eds.), *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México
- Paz Pellat, F., J. Argumedo Espinoza, C.O. Cruz Gaistardo, J.D. Etchevers y B. de Jong. 2016. Distribución espacial y temporal del carbono orgánico del suelo en los ecosistemas terrestres de México. *Terra Latinoamericana* 34:289-310
- Paz-Pellat, F. y A.S. Velázquez-Rodríguez. 2018. Base de datos de perfiles de suelos en México. *Elementos para Políticas Públicas* 2:210-235
- Paz-Pellat, F., A.S. Velázquez-Rodríguez, J.D. Etchevers-Barra, C.I. Hidalgo-Moreno, M. Bolaños-González, B. de Jong, S. Covalada-Ocón, M. Fuentes-Ponce, G. Vela-Correa, F. García-Oliva, Mario Guevara y R. Vargas. 2019. Capítulo 20: Suelos. pp. 436-468. En: F. Paz-Pellat, J.M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A.S. Velázquez-Rodríguez. *Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde*. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México. ISBN 978-607-96490-7-4
- Pearson, T.R.H., S.L. Brown and R.A. Birdsey. 2007. *Measurement Guidelines for the Sequestration of Forest Carbon*. General Technical Report NRS-18. Northern Research Station. Forest Service. USDA <https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-18>
- Pellant, M., P.L. Shaver, D.A. Pyke, J.E. Herrick, N. Lepak, G. Riegel, E. Kachergis, B.A. Newingham, D. Toledo and F.E. Busby. 2020. *Interpreting indicators of Rangeland Health, Version 5*. Tech Ref 1734-6 U.S. Department of the Interior. Bureau of Land Management. National Operations Center. Denver, CO
- Petri, M., C. Batello, R. Villani and Nachtergaele. 2010. Carbon status and carbon sequestration potential in the World's grasslands pp. 19-31. In: *Grassland Carbon Sequestration, Management, Policy and Economics*. FAO. Rome, Italy
- Périé, C. and R. Ouimel. 2008. Organic carbon, organic matter and bulk density relationships in boreal forest soils. *Can. J. Soil Res.* 88:315-325
- PMC. 2015. *Desarrollo de productos cartográficos de uso del suelo y cobertura 1:50,000 armonizados a los productos nacionales 1:250,000*. Estudio de Factibilidad Técnica para el Pago de Bonos de Carbono en el Estado de México (RETUS con BASES EDOMEX).

- Coordinador: Fernando Paz-Pellat. Colaboradores: Ana L. Aguilar-García y Ma. I. Marín-Sosas. Texcoco, Estado de México 40 p.
- Poeplau, C., C. Vos and A. Don. 2017. Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. *Soil* 3:61-66
- Post, W.M., R.C. Izaurralde, L.K. Mann and N. Bliss. 2001. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. *Climate Change* 51:73-99
- Pyke, D. A., J.A. Herrick, P. Shaver, and M. Pellant. 2002. Rangeland health attributes and indicators for qualitative assessment. U.S. Department of the Interior. Bureau of Land Management. National Operations Center. Denver, CO
- SIAP-SAGARPA. 2018. Atlas Agroalimentario 2012-2018. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación. México 222 p.
- Salas Aguilar, V.M. y F. Paz Pellat. 2017. Desarrollo de una base de datos geomorfométrica nacional. *Elementos para Políticas Públicas* 1:173-182
- Salas-Aguilar, V.M. y F. Paz-Pellat. 2018. Desarrollo de una base de datos climática nacional anual, 1989-2012: resolución 250 m. *Elementos para Políticas Públicas* 2:19-32
- Savory, A. 1983. The Savory grazing method or holistic resource management. *Rangelands* 5:155-159
- Savory, A. 1988. *Holistic Resource Management*. Island Press. Washington, D.C.
- Savory, A. 2013. How to fight desertification and reverse climate change. TED talk. [http://www.ted.com/talks/allan\\_savory:how\\_to\\_green\\_the\\_world\\_s\\_deserts\\_and\\_reverse\\_climate\\_change.html](http://www.ted.com/talks/allan_savory:how_to_green_the_world_s_deserts_and_reverse_climate_change.html)
- Savory, A. and J. Butterfield. 2016. *Holistic Management: A Commonsense Revolution to Restore our Environment*. Island Press. Washington, U.S.A.
- Savory, A. and S.D. Parsons. 1980. The Savory grazing method. *Rangelands* 2:234-237
- Savory Institute. 2013. Restoring the Climate through Capture and Storage of Soil Carbon through Holistic Planed Grazing 7 p.
- Savory Institute. 2015. An Exploration of Methane and Properly Managed Livestock through Holistic Management 20 p.
- Schreefel, L., R.P.O. Schulte, I.J.M. de Boer, A. Pas Schrijver and H.H.E. van Zanten. 2020. Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security* doi:10.1016/j.gfs.2020.100404
- Schuman, G.E., H.H. Janzen and J.E. Herrick. 2002. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environmental Pollution* 116:391-396

- SEMARNAT. 2014. Diagnóstico del Programa de Manejo de Tierras para la Sustentabilidad Productiva. Diagnóstico para programas nuevos. Dirección General del Sector Primario y Recursos Naturales. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México 104 p.
- Sherren, K., J. Fischer and I. Fazey. 2012. Managing the grazing landscape: insights for agricultural adaptation from a mid-drought photo-elicitation study in the Australian sheep-wheat belt. *Agricultural Systems* 106:72-83
- Sherren, K. and C. Kent. 2017. Who's afraid of Allan Savory? Scientometric polarization of holistic management as competing understandings. *Renewable Agriculture and Food Systems* doi:10.1017/S1742170517000308
- Skovlin, J. 1997. Southern Africa's experience with intensive short duration grazing. *Rangelands* 9:162-167
- Smith, P. 2004. How long before a change in soil organic carbon can be detected? *Global Change Biology* 10:1878-1883
- Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, B. Scholes, O. Sirontenko, M. Howden, T. McAllister, G. Pan, V. Romanenkov, U. Schneider, S. Towprayoon, M. Wattenbach and J. Smith. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363:789-813
- Soussana, J.F., V. Allard, K. Pilegaard, P. Ambus, C. Campbell, E. Ceschia, J. Clifton-Brown, S. Czobel, R. Domingues, C. Flechard, J. Fuhrer, A. Henssen, L. Horvath, M. Jones, G. Kasper, C. Martin, Z. Nagy, A. Neftel, A. Raschi, S. Baronti, R.M. Rees, U. Skiba, P. Stefani, G. Manca, M. Sutton, Z. Tuba and R. Valentini. 2007. Full accounting of the greenhouse gas (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) budget of nine European grassland sites. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 119:1-15
- Stinner, D.H., B.R. Stinner and E. Martsolf. 1997. Biodiversity as an organizing principle in agroecosystem management: case studies of holistic resource management practitioners in the USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 61:199-213
- Teague, R. 2014. Deficiencies in the Briske et al. rebuttal of the Savory method. *Rangelands* 36:37-38
- Teague, W.R. and J.K. Foy. 2004. Can the SPUR rangeland simulation model enhance understanding of field experiments? *Arid Land Research and Management* 18:217-228
- Teague, R. and U. Kreuter. 2020. Managing grazing to restore soil health, ecosystem function, and ecosystem services. *Frontiers in Sustainable Food Systems* doi:10.3389/fsufs.2020.534187
- Teague, W.R., S.L. Dowhower, S.A. Baker, N. Haile, P.B. DeLaune and D.M. Conover. 2011. Grazing management impact on vegetation, soil biota and soil chemical, physical and hydrological properties in tall grass prairie. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 141:310-322

- Teague, R., F. Provenza, U. Keuter, T. Steffens and M. Barnes. 2013. Multi-paddock grazing in rangelands: why the perceptual dichotomy between research results and rancher experience? *Journal of Environmental Management* 128:699-717
- Tessema, B., R. Sommer, K. Pikki, M. Söderström, S. Namirembe, A. Notenbaert, L. Tamene and S. Nyawira. 2018. Potential for soil organic carbon sequestration in grasslands in East African countries: a review. *Grassland Science* 66:135-144
- The World Bank. 2021. Soil Carbon MRV Sourcebook for Agricultural Landscapes. World Bank. Washington, D.C.
- UNFCCC. 2010. Calculation of the Number of Sample Plots for Measuring within A/R CDM Project Activities. A/R Methodological Tool. EB 58 Report Annex 15
- van der Ploeg, P. Verschuren, F. Verhoeven and J. Pepels. 2006. Dealing with novelties: a grassland experiment reconsidered. *Journal of Environmental Policy and Planning* 8:199-218
- VCS. 2012a. VCS Module VMD0018, Methods to Determine Stratification. Version 1.0. Sectoral Scope 14. Document prepared by The Earth Partners LLC
- VCS. 2012b. VCS Module VMD0021. Estimation of Stocks in the Soil Carbon Pool. Version 1.0. sectoral Scope 14. Document prepared by The Earth Partners LLC
- VCS. 2012c. Approved VCS Methodology VM0021. Soil Carbon quantification Methodology. Version 1.0, Sectoral Scope 14. Document prepared by The Earth Partners LLC
- VCS. 2020. VCS Methodology VM0042. Methodology for Improved Agricultural Land Management. Version 1.0, Sectoral Scope 14. Document prepared by TerraCarbob LLC.
- Xu, S., S. Jagadamma and J. Rowntree. 2018. Response to grazing land soil health to management strategies: a summary review. *Sustainability* doi:10.3390/su10124769
- White, R.E. 2022. The role of soil carbon sequestration as a climate change mitigation strategy: an Australian case study. *Soil Systems* doi:10.3390/soilsystems6020046
- Willat, S.T. and D.M. Pullar. 1984. Changes in soil physical properties under grazed pastures. *Aust. J. Soil Res.* 22:343-348
- Willms, W.D., S. Smoliak and J.F. Dormaar. 1990. Vegetation response to time-controlled grazing on mixed and fescue prairie. *Journal of Range Management* 43:513-517
- Zar, J.H. 2010. *Biostatistical Analysis*. Fifth Edition. Prentice Hall
- Zhao, Y., S. Peth, J. Krümmelbein, R. Horn, Z. Wang, M. Steffens, C. Hoffmann and X. Peng. 2007. Spatial variability of soil properties affected by grazing intensity in Inner Mongolia grassland. *Ecological Modelling* 205:241-254