



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

Responsable: Dra. Helena Cotler Avalos

28 Febrero 2020

Índice

LISTA DE CUADROS	3
LISTA DE FIGURAS	3
RESUMEN EJECUTIVO	4
1. INTRODUCCIÓN	5
OBJETIVO GENERAL.....	6
2. METODOLOGÍA	6
3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO	8
3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS INDICADORES DE SUELOS.....	8
3.2 SÍNTESIS DE INDICADORES DE CALIDAD DE SUELOS PARA SISTEMAS GANADEROS.....	15
4. GENERACIÓN DE INDICADORES LOCALES	15
4.1 ESTRUCTURA METODOLÓGICA.....	17
1. <i>Elaboración del mapa de Unidades de Paisaje (UP) de cada predio</i>	17
2. <i>Muestreo de suelos para generar indicadores técnicos de calidad de suelos (ITCS) que conformarán línea base</i>	19
3. <i>Indicadores locales de calidad de suelos (ILCS)</i>	21
4.2 NECESIDADES DE MATERIAL DE CAMPO	30
5. LABORATORIOS DE SUELOS	31
6. GANADERÍA REGENERATIVA DESDE LA PERSPECTIVA DE SUELO	34
REFERENCIAS	36
ANEXOS	40
ANEXO 1- MONITOREO DE MATERIA ORGÁNICA	40
ANEXO 2- MONITOREO DE PH.....	41
ANEXO 3- MONITOREO DE DENSIDAD APARENTE.....	42
ANEXO 4- MONITOREO DE ESTRUCTURA.....	43
ANEXO 5- MONITOREO DE LOMBRICES.....	44
ANEXO 6- MONITOREO PÉRDIDA DE SUELO A TRAVÉS DE TERRACETAS.....	51
ANEXO 7- MONITOREO DE CALIDAD DE SUELOS	52

Lista de Cuadros

Cuadro 1. Palabras claves (español, inglés, francés) para búsqueda de artículos

Cuadro 2. Lista de revistas consultadas

Cuadro 3. Relación de las funciones de los suelos con sus características y el tiempo requerido para percibir cambios. Fuentes: Larson y Pierce, 1991; Doran y Parkin, 1994; Seybold *et al.*, 1997, Arnold *et al.* 1990.

Cuadro 4. Indicadores utilizados para evaluar cambios en la calidad de los suelos (Doran y Parkin, 1994)

Cuadro 5. Indicadores propuestos a partir de la revisión bibliográfica para medir calidad de suelos ganaderos, su justificación, método y referencias

Cuadro 6. Principales indicadores de calidad de suelos ganaderos, métodos y valores Cuadro 7. Variables y método analítico propuesto

Cuadro 8. Evaluación visual de la densidad aparente

Cuadro 9. Evaluación visual de la estructura (modificado de Siebe et al. 2002)

Cuadro 10. Laboratorios de suelos ubicados en los Estados del presente estudio

Lista de Figuras

Figura 1. Modelo conceptual señalando la naturaleza complementaria entre el conocimiento local y técnico generando un conocimiento híbrido (adaptado de Barrios et al. 2006).

Figura 2. Ruta metodológica para la elaboración de indicadores locales

Figura 3. Foto izq: excavación para perfil de suelos; Foto der: perfil de suelo, en la parte superior del suelo se observa la acumulación de raíces

Figura 4: Horizontes (o capas) en distintos suelos. Las líneas rojas distinguen dos horizontes distintos.

Figura 5. (a) muestra de suelo en frasco, (b) suelo y agua, (c) suelo sedimentado, papel-indicador puesto en solución, (d) comparación de papel indicador con las diferentes posibilidades

Figura 6. izq: terrón de tamaño medio y fuerte, der: grados de estructura de terrones

Figura 7. Principales formas de estructura (terriones)

Figura 8. Monolito para estudio de lombrices (Fuente: Moreira et al. 2012)

Figura 9. izq: terracetas, der: ladera con conjunto de terracetas, también llamada “pie de vaca”

Figura 10- Interrelaciones entre el ganado, los pastos, los suelos y los organismos vivos. Adaptado de Greenwood y Mc Kenzie (2001)

Resumen Ejecutivo

Los sistemas ganaderos convencionales alteran casi todos los aspectos de la estructura y función del suelo, incluyendo la porosidad, la química, la microbiología, los ciclos de nutrientes, la productividad y las tasas de erosión. La mayoría de los estudios han demostrado que el pisoteo del ganado aumenta la compactación del suelo, la erosión y la disponibilidad de nutrientes a corto plazo y los niveles de materia orgánica a largo plazo, y que dichas afectaciones en conjunto reducen el potencial de la productividad global de los sistemas ganaderos (Lobell et al., 2009; Steinfeld et al., 2009; Zika & Erb, 2009; Mueller et al., 2012; Herrero et al., 2013; Smith et al., 2014). De allí la importancia de identificar indicadores de calidad de suelos que permitan monitorear el impacto y mitigarlo a partir de mejores sistemas ganaderos.

Aún no hay criterios universales para evaluar los cambios en la calidad del suelo (Arshad y Coen, 1992). Para hacer operativo este concepto, es preciso contar con variables que puedan servir para evaluar la condición del suelo. Usualmente estas variables son analizadas en laboratorio. Sin embargo, este conocimiento rara vez llega a los tomadores de decisión en campo: los ganaderos. Por ello es importante generar indicadores de calidad de suelos que puedan ser realizados por los mismos dueños de la tierra de manera sencilla.

Para la identificación de indicadores locales que permitan medir cambios, de manera temporal y espacial de la calidad de los suelos se utilizó un método dividido en dos grandes fases.

La primera fase consistió en una revisión bibliográfica que abordó los principales indicadores de suelos en sistemas ganaderos, enfatizando en su análisis espacial, temporal, tendencias y valores umbrales. Con esta información se identificaron los cuatro indicadores más utilizados para evaluar la de calidad de suelos en sistemas ganaderos: compactación, materia orgánica, estructura de suelos y edafofauna. Asimismo, la revisión bibliográfica permitió identificar algunas consideraciones que deben tomarse en cuenta al momento del muestreo. Así, en el muestreo de suelos es importante considerar que las áreas ganaderas son extensas y cubren paisajes disímiles donde las características y propiedades de los suelos son muy variables espacialmente. Por ello, se recomienda realizar el muestreo y el análisis de suelos por unidad homogénea de paisaje.

La segunda fase consistió en establecer y desarrollar la estructura metodológica para diseñar los indicadores locales. En ella se cuentan cuatro etapas: (i) técnicas para elaborar el mapa de Unidades de paisaje (UP), (ii) muestreo para generar indicadores técnicos de calidad de suelos necesarios para elaborar la línea base, (iii) muestreo para generar indicadores locales de calidad de suelos y (iv) método para integrar los indicadores técnicos y los locales.

Los indicadores locales de calidad de suelos que fueron desarrollados son: materia orgánica, pH, densidad aparente, estructura de suelos, densidad y biomasa de lombrices, y rasgos de erosión (terracetas). Para cada indicador se da una explicación de su importancia, el método de muestreo y su interpretación. Además, cada indicador va acompañado de una hoja de registro de datos. Finalmente, también se anexa una hoja en la cual se puede registrar de manera temporal el estado de la calidad de los suelos de cada Unidad de Paisaje.

Para el estudio analítico de los indicadores de calidad de suelos en cada uno de los Estados del estudio se identificaron los principales laboratorios de suelos.

1. Introducción

Los sistemas ganaderos convencionales alteran casi todos los aspectos de la estructura y función del suelo, incluyendo la porosidad, la química, la microbiología, los ciclos de nutrientes, la productividad y las tasas de erosión. La mayoría de los estudios han demostrado que el pisoteo del ganado aumenta la compactación del suelo, la erosión y la disponibilidad de nutrientes a corto plazo y los niveles de materia orgánica a largo plazo, y que dichas afectaciones en conjunto reducen el potencial de la productividad global de los sistemas ganaderos (Lobell et al., 2009; Steinfeld et al., 2009; Zika & Erb, 2009; Mueller et al., 2012; Herrero et al., 2013; Smith et al., 2014).

Aún no hay criterios universales para evaluar los cambios en la calidad del suelo (Arshad y Coen, 1992). Por ello, para hacer operativo este concepto, es preciso contar con variables que puedan servir para evaluar la condición del suelo. Estas variables se conocen como indicadores, pues representan una condición y conllevan información acerca de los cambios o tendencias de esa condición (Dumanski *et al.*, 1998). Los indicadores son instrumentos de análisis que permiten simplificar, cuantificar y comunicar fenómenos complejos.

El concepto de calidad de suelo está definido como su capacidad para mantener a) La productividad del suelo, que se refiere a la habilidad del mismo para promover la productividad del ecosistema o agroecosistema, sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas; b) la calidad medio ambiental, entendida como la capacidad de un suelo para atenuar los contaminantes ambientales, los patógenos, y cualquier posible daño hacia el exterior del sistema, incluyendo también los servicios ecosistémicos que ofrece (reservorio de carbono, mantenimiento de la biodiversidad, recarga de acuíferos, etc.); y, c) la salud, que se refiere a la capacidad de un suelo para producir alimentos sanos y nutritivos para los seres humanos y otros organismos (Arshad y Coen, 1992; Parr *et al.*, 1992; Doran y Parkin, 1994). Mantener un máximo de productividad a largo plazo sin decrecer la calidad del suelo y provocar degradación de suelos es la premisa de un uso sustentable de suelos (Yu et al 2018).

Un indicador de calidad de suelos se concibe como una herramienta de medición que debe dar información sobre las propiedades, procesos y características. Los indicadores se miden para dar seguimiento a los efectos del manejo sobre el funcionamiento del suelo en un periodo dado. En los suelos, las características y propiedades de suelos pueden convertirse en indicadores, siendo de tres tipos principales: físicos, químicos y biológicos. Las propiedades biológicas, como indicadores, son las más dinámicas y, por lo tanto, tienen la ventaja de servir como señales tempranas de degradación o de mejoría de los suelos. Sin embargo, hay indicadores que requieren de más de 10 años para exhibir cambios como respuesta a un manejo determinado (Astier et al. 2002). Estos indicadores pueden ser cualitativos (ej. rasgos de erosión) o cuantitativos (tasa de infiltración, capacidad de intercambio catiónico, pH, cantidad de nemátodos, etc.). La evaluación de la calidad del suelo es indispensable para determinar si un sistema de manejo es sustentable, a corto y largo plazo (Doran *et al.*, 1994).

El establecimiento y la calibración de parámetros globales de suelo es aún un reto debido la extensa variabilidad de los suelos, climas y tipos de ecosistemas (Muñoz-Rojas 2018). Sin embargo, la cuantificación de la calidad de los suelos es importante como alerta temprana de tendencias adversas y para evaluar el manejo sustentable (Merrington, 2006). Además de que evaluar la relación entre características inherentes y dinámicas puede mejorar el entendimiento de la calidad del suelo y ayudar a los manejadores a evaluar el impacto de las prácticas de manejo sobre la condición del suelo (USDA 2015).

Objetivo general

Identificar los indicadores que permitan medir e interpretar cambios en la calidad de los suelos en sistemas ganaderos y los métodos que pueden ser utilizados en campo por productores ganaderos, instituciones académicas, organizaciones de la sociedad civil e instituciones de gobierno para su medición.

2. Metodología

La metodología del trabajo consistió en dos etapas principales.

En la primera se realizó una revisión bibliográfica que abordó dos temas principales:

- i. Características de los indicadores de calidad de suelos: análisis espacial, temporal, tendencias, valores umbrales
- ii. Indicadores analizados para suelos ganaderos: justificación y métodos

Esta revisión dio pautas para identificar los principales indicadores utilizados para evaluar la calidad de suelos ganaderos, así como el proceso que debe seguirse para la generación de indicadores locales de calidad de suelos.

Para la primera etapa se hizo una revisión exhaustiva en revistas internacionales y nacionales, a través de palabras claves.

Cuadro 1. Palabras claves (español, inglés, francés) para búsqueda de artículos

Internacional (idioma inglés/francés)	Nacional (español)
Soil indicators, grasslands, silvopastoral, soil functions, soil quality indicators Indicateurs de qualité du sol et pâturages	Indicadores de suelo, (sistemas) ganaderos, silvopastoril, funciones de suelo

Cuadro 2. Lista de revistas consultadas

Internacionales	Nacionales
Catena	Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias
Geoderma	Revista mexicana de ciencias forestales
Pedobiología	Scientia Agropecuaria
Soil& Tillage Research	Cultivos Tropicales
Soil use &management	Ciencia e investigación agraria
Journal of Hydrology	
European Journal of Soil Biology	
Applied Soil Ecology	
Ecological Engineering	
Ecological indicators	
Revista cubana de Ciencia Agrícola	
Current Opinion in Environmental Science & Health	
Journal Range Management	
Agricultural and Forest Management	
Agricultural and Forest Meteorology	
Chilean journal of agricultural and animal sciences	
Ciencia del suelo	

Además se revisaron las páginas web de las siguientes Agencias Internacionales:

- US Environmental Agency
- USGS-USDA-NRCS
- Gobierno de Canadá: Agriculture et agroalimentaire
- Bioactualités: <https://www.bioactualites.ch/cultures/sol/evaluersol-fr.html>

Falta dar detalles del análisis bibliométrico sobre la literatura identificada vía la búsqueda: cuantos artículos, de que tipo, sobre que temas y países / regiones, etc.

La segunda etapa se caracterizó por detallar los pasos y los métodos para analizar los principales indicadores de calidad de suelos en campo, mediante técnicas sencillas. Los cuales serán explicados más adelante.

3. Resultados del Análisis bibliográfico

3.1 Características de los indicadores de suelos

La calidad de los suelos se basa en la posibilidad de que éstos cumplan sus funciones ecológicas. Las funciones de los suelos dependen de la interacción de características (textura, estructura, materia orgánica, porosidad, densidad aparente) y de propiedades (capacidad de infiltración, erosionabilidad). Las complejas relaciones que existen entre las funciones, las propiedades y las características hacen que rara vez exista una coincidencia exacta entre ellos (Bone *et al.* 2010; Schoenholtz *et al.* 2000).

La complejidad del funcionamiento del suelo impulsa hacia la búsqueda de indicadores que no necesariamente midan las diferentes funciones del suelo, sino que sean sustitutos que correlacionen con la función del suelo (Burger and Kelting 1999).

No existe un índice de calidad de suelos que pueda ser utilizado como método universal en todas las regiones y escalas (Qi *et al.*, 2009; Sun *et al.*, 2003, Zhang *et al.*, 2004), por ello se han desarrollado varios índices de calidad de suelos para distintos propósitos y condiciones ambientales específicas (Sadegh & Holden, 2014)

El levantamiento de las características de suelo consume tiempo y recursos, por ello el reto consiste en identificar (i) la o las función(es) que se quiere(n) monitorear, (ii) las características y propiedades estrechamente relacionadas con esa función y (iii) el indicador proxy que puede dar información al respecto. Se recomienda construir un conjunto mínimo de indicadores que aporten información relevante, que sean poco redundantes entre ellos (Sadegh y Holden, 2014) y que puedan ser interpretados en términos cuantitativos y temporales.

Las características y propiedades de los suelos son muy variables espacialmente, por ello varios autores (Pellant *et al.* 2005) recomiendan analizar previamente las condiciones de paisaje, en términos de las características geomorfológicas (relieve, geología), de vegetación y de suelos. Esta integración puede expresarse en un mapa morfo-edafológico (o geopedológico).

Para la contextualización de los indicadores de suelos en un paisaje, los mapas morfo-edafológicos permitirían: (a) ubicar los sitios representativos para el muestreo de suelos y (b) permitir la extrapolación de los datos a polígonos que cuenten con condiciones de relieve, geológicas, de vegetación y de suelo semejantes.

Además los paisajes morfo-edafológicos pueden explicar algunos efectos como lugares dominantes de escorrentía, erosión y zonas de dispersión de semillas; y efectos indirectos, como diferencias en herbivoría según la proximidad a cuerpos de agua.

Las características y propiedades de los suelos son muy variables espacialmente, y pueden tener un cambio muy lento en el tiempo. Por ello, se requiere que los indicadores sean evaluados en el tiempo en el cual puedan detectarse cambios (Cuadros 1 y 2).

Por otro lado, en los indicadores edáficos, el establecimiento de valores umbrales se dificulta por la ausencia de datos sobre cambios en la calidad de suelos y por el hecho de que muchos indicadores siguen un patrón curvilíneo, con poca claridad. Los valores críticos se definen como valores o rango de valores, que sobre o debajo de ellos un cambio es entendido como crítico en términos de la capacidad del suelo para un específico uso. Los valores críticos deben ser entendidos en el contexto de una información particular en función del tipo de suelo, sistema de producción, clima, entre otros (Merrington et al. 2006).

En la ausencia de umbrales claros y la ausencia de evidencia ecológica cuantitativa, el establecimiento de indicadores de calidad de suelos a veces requiere de “juicio experto” y requiere del sustento de una amplia literatura.

La evaluación de la calidad de suelos requerirá establecer monitoreos de largo plazo (Merrington et al 2006), en ellos pueden utilizarse indicadores obtenidos de métodos de campo simple. Pero es importante que estos métodos sean robustos y estén relacionados con otros indicadores de calidad de suelos. Asimismo es importante definir la interpretación de los valores obtenidos. La investigación que relaciona métodos visuales de evaluación y datos físicos es limitada, particularmente en suelos ganaderos (Mueller et al 2012).

La evaluación de la calidad del suelo debe concebirse en un contexto donde se establezcan y especifiquen las escalas espacio-temporales. De esta forma, el seguimiento de la calidad del suelo podrá efectuarse de manera comparativa o relativa. Al respecto, Massera et al. (1999) sugieren dos vías fundamentales: 1) comparar la dinámica de un mismo sistema a través del tiempo, y 2) comparar simultáneamente uno o más sistemas de manejo alternativo o innovador, con una situación de referencia. Se ha destacado la importancia de establecer para cada indicador la línea base, de referencia o de inicio de una actividad, para reflejar la generación de impactos positivos o negativos en el ambiente, y los valores umbrales para el monitoreo de impactos, los cuales no deben exceder un determinado nivel o valor (Segnestam, 2002). Los valores umbrales (VU), que pueden ser valores máximos o mínimos dependiendo de la variable en cuestión, representan para cada indicador, el nivel por encima del cual el recurso suelo se torna sensible a los procesos degradativos generados por el uso, arriesgándose su capacidad de recuperación. Existen distintos criterios para establecer los valores umbrales, Tolon Becerra y Ramírez Román (2000) consideran que la asignación de valores umbrales para cada indicador puede realizarse de acuerdo a los siguientes criterios: valores establecidos científicamente; medias espaciales (comparaciones sincrónicas), medias temporales (comparaciones diacrónicas); opinión de expertos; opinión de representantes institucionales y de grupos sociales (a través de encuestas) y opinión popular (también a partir de encuestas).

Varios autores ya han establecido una relación entre las funciones, los indicadores, sus variables, el tipo de tendencia y la frecuencia de medición sugerida (Cuadros 3 y 4).

Introducir e interpretar el cuadro 5 en este texto

Cuadro 3. Relación de las funciones de los suelos con sus características y el tiempo requerido para percibir cambios. Fuentes: Larson y Pierce, 1991; Doran y Parkin, 1994; Seybold *et al.*, 1997, Arnold *et al.* 1990.

Relación con la condición y función del suelo	Parámetro	Tiempo requerido para percibir cambios
	Físicos	
Retención y transporte de agua y compuestos químicos, erosión del suelo	Textura Estabilidad de agregados	>10 ³ <10 ⁻¹ años
Estima la productividad potencial y la erosión	Profundidad del suelo	<10 ⁻¹ años
Potencial de lavado, productividad, y erosividad	Infiltración Densidad aparente	<10 ⁻¹ años
	Químicos	
Define la fertilidad del suelo, estabilidad, erosión	(N y C total) Contenido de materia orgánica	10 ⁻¹ - 10 ⁰ años
Define la actividad química y biológica	Conductividad eléctrica	10 ⁻¹ - 10 ⁰ años
Define la actividad vegetal y microbiana	P, N, y K extractables	10 ⁻¹ - 10 ⁰ años
	Biológicos	
Potencial microbiano catalítico y depósito para el C y N, cambios tempranos de los efectos del manejo sobre la materia orgánica	C y N de la biomasa microbiana	<10 ⁻¹ años

En el cuadro anterior podemos observar que un parámetro físico o químico puede explicar diferentes funciones, por ejemplo, la profundidad del suelo puede estimar la productividad potencial así como la intensidad de la erosión. Por otro lado, se especifica que el tiempo requerido para ver los cambios varía entre los parámetros. Así si bien el cambio en la profundidad del suelo puede percibirse aproximadamente en un año, los cambios en el contenido de materia orgánica pueden llevar hasta 10 años.

Cuadro 4. Indicadores utilizados para evaluar cambios en la calidad de los suelos (Doran y Parkin, 1994)

Indicador	Profundidad (cm)	Tipo de tendencia	Tiempo requerido para percibir cambios	Frecuencia de medición	Referencia
Indicadores físicos					
Textura (% arena, arcilla, limo)	0 - 30	Equilibrio	>10 ³ años	Cada 2-3 años	Arnold <i>et al.</i> ,1990
Densidad aparente (g cm ⁻³)	0 - 7.5	Reducción	<10 años	Anual	Arshad y Coen, 1992 Arnold <i>et al.</i> ,1990
Tasa de infiltración (cm min ⁻¹)	0 - 15	Incremento	<1 año	Periodicamente	Arshad y Coen, 1992 Doran <i>et al.</i> ,1994
Retención de humedad (%)	0 - 15	Incremento	<1 año	Estacional	Arnold <i>et al.</i> ,1990
Resistencia a la penetración (Mpa)	0 - 50	Disminución	<1 año	Estacional	Arnold <i>et al.</i> ,1990
Profundidad capa arable (cm)	0 -100	Incremento	>10 años	Anual	Arshad y Coen, 1992 Doran <i>et al.</i> ,1994
Sistema radicular (cm)	0 -120	Incremento	<2 años	Estacional	Larson y Pierce, 1991
Estabilidad de agregados (% 1-2 mm diámetro)	0 - 7.5	Incremento	<2 años	Estacional	Doran <i>et al.</i> ,1994
Indicadores químicos					
pH	0 - 7.5	Neutralidad	>5 años	Estacional	Doran <i>et al.</i> ,1994 Arshad y Coen, 1992
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0 - 7.5	Disminución	<2 años	Estacional	Larson y Pierce, 1991
N total (kg N ha ⁻¹)	0 - 30	Incremento	<2 años	Estacional	Larson y Pierce, 1991
P disponible (P extractable) (mg kg ⁻¹)	0 - 30	Incremento	<2 años	Estacional	Doran y Parkin, 1994
Capacidad de intercambio catiónico (meq 100 g ⁻¹)	0 - 30	Incremento	0 - 10 años	Anual	Arnold <i>et al.</i> ,1990
Indicadores biológicos					
Carbono orgánico (Mg C ha ⁻¹)	0 - 30	Incremento	>10 años	Anual	Arnold <i>et al.</i> ,1990
N mineralizable (kg N ha ⁻¹)	0 - 30	Incremento	<2 años	Periodicamente	Doran <i>et al.</i> ,1994
Respiración (kg CO ₂ -C ha ⁻¹ día ⁻¹)	0 - 7.5	Variable	<2 años	Estacional	Doran <i>et al.</i> ,1994
Lombrices de tierra m ⁻²	0 - 30	Incremento	<2 años	Periodicamente	Visser y Parkinson, 1992 Stork y Eggleton, 1992

En este cuadro se observan las profundidades a las cuales los autores recomiendan tomar las muestras. Por otro lado, se determinan las tendencias que tienen que seguirse para obtener una buena calidad de suelos, es decir si buscamos una buena calidad de suelos en términos de densidad aparente, se requiere que este valor vaya hacia la baja, ya que densidades aparente más bajas significan una mayor aireación en el suelo. Por otro lado, para la calidad de suelos en términos de estabilidad de agregados se busca que su valor se incremente, ya que esto significa que los agregados presentan condiciones de mayor estabilidad y pueden resistir mejor el impacto de las gotas de agua, es decir tienen mayor resistencia ante el proceso de erosión de suelos. En este cuadro también se observa el tiempo que se requiere para observar los cambios. Este parámetro es muy importante ya que define los tiempos para el monitoreo, especificando una frecuencia de medición distinta para cada parámetro.

Cuadro 5. Indicadores propuestos a partir de la revisión bibliográfica para medir e interpretar calidad de suelos ganaderos, su justificación, método y referencias

Indicador propuesto	Justificación	Metodología	Referencias
Compactación de suelos	<p>La compactación de suelos que puede reflejarse en cambios en la densidad aparente, afecta diferentes funciones del suelo como la resistencia al crecimiento de raíces, la modificación en la distribución del tamaño de los poros y su conectividad, cambios en la retención de agua y disponibilidad, y la aireación.</p> <p>El impacto de la compactación dependerá de la intensidad del pastoreo y de la textura del suelo. La resistencia de la penetración en el suelo puede incrementar de 4.5 a 6 por animal/ha. Los cambios en el tamaño y la continuidad de los poros reduce la habilidad de los suelos de proveer servicios ecosistémicos, sobre todo constituye una barrera para la restauración de pastizales (Palmer, 2004).</p>	<p>Parámetro: rango de agua menos limitante (Least Limiting Water Range, LLWR) que considera cuatro factores físicos restrictivos para el crecimiento de plantas: contenido de agua relacionado con capacidad de campo y punto de marchitez, aireación y resistencia física al crecimiento de raíces.</p> <p>Para la variable de resistencia de penetración se utilizó un penetrómetro de campo. Además se tomaron muestras para el cálculo de: densidad aparente, contenido de agua, densidad de partículas y carbono orgánico en laboratorio. Los resultados son analizados a través de una ecuación de pedotransferencia. Otra aproximación de la compactación de suelos es la “densidad compactada” (packing density”, PD) expresada como:</p> $PD = \text{densidad aparente} * 0.09 (\% \text{ arcilla})$ <p>En los primeros 10 cm de suelos pueden observarse los principales cambios (aunque esto no es restrictivo de encontrar otros horizontes compactados).</p> <p>En la revisión se pueden encontrar ciertos valores deseados de densidad aparente en función de la textura de suelos (Anexo 1)</p>	<p>Batista et al. (2019); Silva et al (2008); Newell-Price et al (2013); Mc Kenzie (2013); Merrington et al (2006)</p>
Estructura del suelo	<p>La estructura del suelo integra varias propiedades que determinan la fertilidad de los suelos, su biodiversidad, el ciclo de nutrientes, el secuestro de carbono y la regulación del ciclo hidrológico .</p>	<p>La evaluación visual de la estructura de suelos consiste en una evaluación global que incluye parámetros como el color del suelo, la porosidad, agregados, raíces y actividad de macro fauna.</p> <p>La evaluación se realizó en 7 parcelas (30 x 30 m) con intensidad de manejo distintas, esta información se obtuvo a través de entrevistas con los productores. Se tomaron muestras a profundidad de 0-10 cm y 10-20 cm. Se tomaron 5 muestras para determinación de densidad aparente, pH, C, N y actividad enzimática en laboratorio.</p>	<p>Cui y Holden (2015); Ball y Douglas(2003); Newell- Price et al (2013); Cui et al. (2014); Johannes et al (2019); Lock et al (2007)</p>

Capacidad de infiltración	En regiones semi-áridas la capacidad de infiltración determina la restauración de la vegetación. La capacidad de infiltración está determinada por varias propiedades del suelo, como porosidad, materia orgánica, el contenido de agua en el suelo, la densidad aparente y las raíces.	Se tomaron muestras en 5 parcelas. En ellas se analizó la capacidad de infiltración a través de un sistema de medición automático, una cámara que capturaba imágenes del área húmeda, una bomba peristáltica que proveía agua al suelo a una tasa constante. La capacidad de infiltración se calculó a través de un algoritmo numérico basado en el cambio de área húmeda. En el caso de sistemas silvopastoriles con hileras de árboles se tomaron las muestras en 2 líneas perpendiculares a las hileras de los árboles, encontrándose que la tasa de infiltración de agua fue mayor en el suelo dentro de las filas dobles de los árboles leguminosos (Lima et al 2018)	Cui et al. (2019); Alaoui (2015)
Riqueza de nematodos	La composición de la comunidad de nematodos del suelo está relacionada con varios parámetros del suelo y tienen correlación con su disturbio, riqueza de nutrientes y contaminación.	En cada sitio se realizó un análisis microclimático (temperatura y humedad del suelo). Se extrajeron bloques de suelo de 55x35x22 cm a lo largo de un gradiente climático para muestreo de nematodos. Además se tomaron muestras para análisis de nutrientes y densidad aparente. La riqueza de nematodos es mayor en ambientes templados, disminuyendo en condiciones extremas. Índice de madurez de nematodos constituye un buen indicador para el status del Nitrógeno.	Ekschmitt et al. (2001)
Calidad Biológica de suelos (micro artrópodos)	Las zonas de pastizales se caracterizan por una gran diversidad de fauna edáfica: nematodos, micro artrópodos y anélidos. Todos ellos son importantes para mejorar la estructura de los suelos, y con ello su porosidad	El análisis de micro artrópodos se complementó con análisis físico-químico de suelos. Para ello se tomaron muestras de suelo se tomaron cada 10 cm hasta los 80 cm de profundidad, por triplicado, donde se analizaron carbono orgánico, textura, pH, carbonato de calcio total, densidad aparente y estabilidad de agregados. Se determinó un índice de calidad de suelo Biológico, a partir del grupo de micro artrópodos y colémbolos.	Gardi et al. (2002)
Materia orgánica	El contenido de materia orgánica en los suelos mejora su calidad al incrementar la estabilidad de agregados y la capacidad de infiltración. La mejora de la calidad de los suelos es mayor en suelos pobres de ambientes áridos, ya que los cambios ante distintas prácticas de manejo son más	El muestreo de suelos se realizó hasta los 80c m, cada 10 cm de profundidad, en parcelas de 30m ² con tres réplicas, en un predio de 10 ha. En estas muestras se midieron: Carbono orgánico total, Nitrógeno total, pH, conductividad hidráulica, densidad aparente, comunidad microbiana y actividad enzimática.	Ghimire et al (2019); Lock et al (2007); Sadegh y Holden (2014); Safaei et al. (2019); Torres Sallan et al 2018; Wang et al (2019); Yu et

	<p>visibles. En estos ambientes la incorporación de carbono al suelo está limitada por bajas precipitaciones y altas temperaturas. La textura de los suelos también influye en la dinámica del carbono: suelos más arcillosos tiene generalmente mayor concentración de carbono. El clima también determina el contenido de carbono: en ambientes fríos el contenido puede ser mayor. Asimismo el contenido cambia en función de la altitud y el relieve. Los sistemas silvopastoriles han demostrado mantener o incrementar potencialmente los niveles de carbono orgánico en el suelo. Amézquita et al. (2004) encontraron en un sistema silvopastoril (SSP) un incremento en la asimilación de C de los árboles, de 107 a 620 gm⁻² en dos años. Oelbermann et al. (2006) encontraron que, a los cuatro años de SSP, el carbono orgánico del suelo fue 6 % mayor que en el pastizal en monocultivo. Mientras que Villanueva-López et al (2014) encontraron que sistemas silvopastoriles con cercas vivas obtuvieron valores mayores en materia orgánica y valores bajos de densidad aparente del suelo sobre todo en los primeros 10 cm y a una distancia de 3 a 6 metros de las cercas vivas.</p>	<p>Antes del muestreo de suelos se obtuvo información sobre el manejo a través de entrevistas semi-estructuradas con cada ganadero. IPCC recomienda el muestreo de carbono en suelos hasta los 30 cm. La dinámica del carbono en horizontes profundos (más de 30 cm) depende del tipo de suelo (Torres Sallan et al 2018). En sistemas silvopastoriles con diez años de explotación se encontró que la materia orgánica fue mayor en los sistemas con árboles (4,4 y 4,5%) que en el monocultivo (3%) (Hernández et al. 2008)</p>	<p>al (2018); Yong-Zhong et al (2005); Crespo (2008)</p>
--	---	---	--

3.2 Síntesis de indicadores de calidad de suelos para sistemas ganaderos

A partir de las referencias bibliográficas se puede concluir que los indicadores de calidad de suelos de sistemas ganaderos más eficientes, para distintos ambientes bioclimáticos, son la compactación, la materia orgánica, la estructura de suelos y la edafofauna, tal como se indica en el cuadro 6.

Cuadro 6. Principales indicadores de calidad de suelos ganaderos, métodos y valores

Indicador	Métodos	Valores
Compactación	-Densidad aparente -Densidad compactada (“packing density”) -Rango de agua menos limitante (“Least Limiting Water Range) Especialmente en los primeros 10- 20 cm de suelo (u otros horizontes si se encuentran compactados)	Valores deseados de densidad aparente en función de la textura de suelos (Anexo 3)
Materia orgánica	Cada 10 cm de profundidad hasta los 30 cm (o bien los primeros dos a tres horizontes), en parcelas representativas (unidades de paisaje) con réplicas.	En ambientes áridos la incorporación de carbono al suelo está limitada por bajas precipitaciones y altas temperaturas. En suelos arcillosos, la concentración de carbono es mayor. En ambientes fríos el contenido de carbono puede ser mayor.
Estructura de suelos	evaluación visual de la estructura de suelos	Variable en función del sistema e intensidad de manejo, tipo de suelos y contenido de materia orgánica
Edafofauna	Extracción de bloques de suelo o bien toma de muestras cada 10 cm de profundidad, hasta los 80 cm	Muy variable, mayor en ambientes templados, disminuyendo en condiciones extremas.

4. Generación de indicadores locales

A partir de la revisión bibliográfica se elaboró una estructura metodológica y los pasos a seguir para integrar el conocimiento técnico con el conocimiento local (Figura 1) buscando generar un conocimiento híbrido, que es más relevante e integrador, y que permite construir los indicadores locales y técnicos. En cada etapa se necesitará de la

presencia activa tanto de técnicos como de los ganaderos.

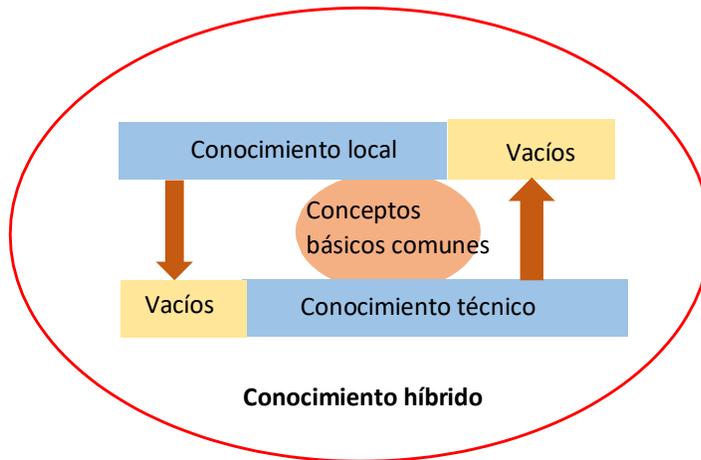


Figura 1. Modelo conceptual señalando la naturaleza complementaria entre el conocimiento local y técnico generando un conocimiento híbrido (adaptado de Barrios et al. 2006).

Algunas consideraciones importantes para la elaboración de indicadores de calidad de suelos de campo, surgidas de la revisión de la bibliografía sugieren:

- Las áreas ganaderas son extensas y cubren paisajes disímiles, donde las características y propiedades de los suelos son muy variables espacialmente. Por ello previo a la toma de muestras es necesario establecer unidades homogéneas de paisaje, en términos de relieve, geología, suelos, vegetación de tal forma que la toma de muestras sea representativa de cada una de estas unidades (mapa morfo- edafológico)
- Cada unidad de paisaje debe ir acompañada por la explicación de su sistema de manejo (a través de encuestas semi-estructuradas).
- Para la evaluación de la calidad de suelos, se debe identificar (i) la o las función (es) que se quiere(n) monitorear, (ii) las características y propiedades estrechamente relacionadas con esa función y (iii) el indicador proxy que puede dar información al respecto. Para ello, se debe considerar varios indicadores, construyendo un conjunto mínimo de ellos, que aporten información relevante, y que puedan ser interpretados en términos cuantitativos y temporales.
- Cabe resaltar que, en todas las experiencias revisadas, tanto en aquellos casos donde se utilizó indicadores cualitativos de campo como indicadores cuantitativos, fue necesario, en un inicio para establecer una línea base, acompañarlos con análisis de distintos parámetros de suelos en laboratorio para poder calibrarlos y darles una explicación sólida.

4.1 Estructura metodológica

A partir de las experiencias examinadas en la revisión bibliográfica, se elaboró una estructura metodológica para la elaboración de los indicadores locales, descritas en la Figura 2.

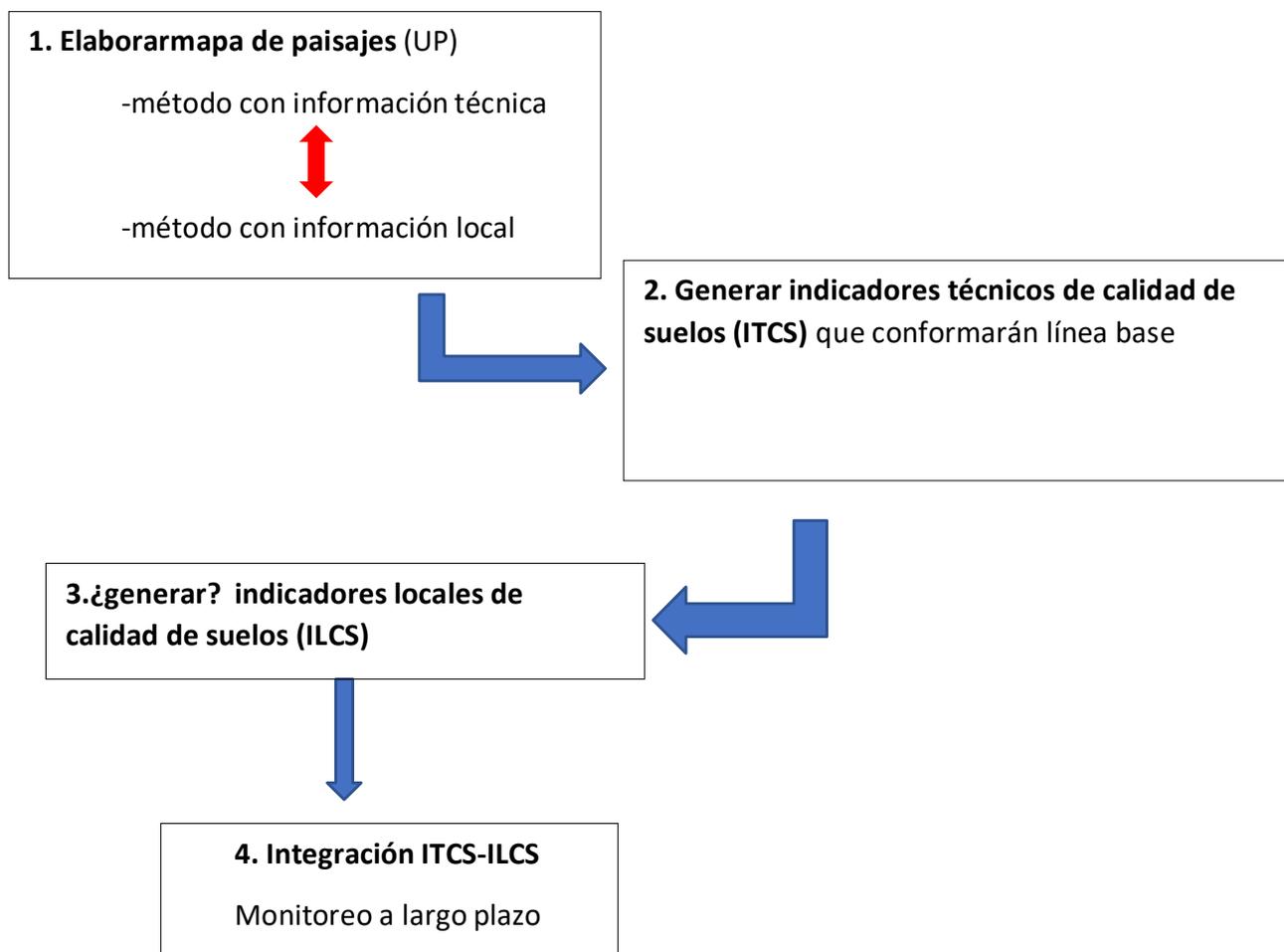


Figura 2. Ruta metodológica para la elaboración de indicadores locales

1. Elaboración del mapa de Unidades de Paisaje (UP) de cada predio

Porque no proponer algo que haga uso de GPS y de alguno de los TICs, para simplificar esta fase y proporcionar una base digital para luego reportar los resultados del monitoreo

La elaboración de este mapa nos permitirá identificar zonas que tengan suelos distintos donde sea necesario muestrear y monitorear su calidad a lo largo del tiempo.

La elaboración de este mapa se puede realizar de dos formas distintas, las cuales pueden complementarse entre ellas.

i. Método con información técnica: Se identifican principales formadores de suelo a través de la cartografía existente. Los principales factores formadores que deben estar

presentes en la matriz son:

- Relieve: Mapa elaborado a partir de modelo Digital de Elevación, el cual se organizará en rangos de pendientes
- Geología: Mapa INEGI, diferenciar los tipos de roca
- Vegetación: mapa INEGI, diferenciar zonas de pastos, arbustos, matorrales, etc

Si el predio es muy grande, y abarca microclimas distintos, o si se tiene otra fuente de información, como erosión de suelos o suelos, también se puede integrar (Geissert y Rossignol, 1987; Cotler et al.2002)

El método de integración puede ser en una matriz que acompañe al mapa, estableciendo nombres y códigos (numéricos o en colores) a cada una de las unidades, ejemplo:

Código o color	Unidades de paisaje
	Planicie (pendiente 0-4°) sobre rocas lutitas (sedimentarias) con vegetación de tipo arbustivo
	Piedemonte (4-7°) sobre sedimentos coluviales con vegetación de tipo herbáceo
	Colinas (6-12°) sobre rocas volcánicas con vegetación interestratificada herbácea/arbustiva)

ii. Método con información local: Se derivan los principales factores formadores de suelo en reuniones entre técnicos y ganaderos. Para ello será necesario contar como base con una imagen satélite o un mapa topográfico que muestre relieve.

A partir de ese mapa se trabajará con ganaderos para conocer su percepción acerca de:

- relieve: zonas planas, zonas colinosas, zonas empinadas
- zonas más erosionadas, más infértiles, más fértiles
- zonas más pedregosas
- zonas más húmedas (por cercanía a un cuerpo de agua)
- distintos tipos de vegetación
- carga animal a lo largo del tiempo
- Tipos de manejo

A partir de esta información se elaborará el mapa integrando la información obtenida, por ejemplo:

Código o color	Unidades de paisaje
	Plano, suelos profundos, húmedo en lluvias, con vegetación de tipo arbustivo. Cada año el ganado entra a esta zona
	En pendiente, pedregoso, se lava en lluvias, vegetación herbácea dispersa. Presencia temporal (bi-anual del ganado)
	Colinas, pierden suelo con lluvias fuertes, suelos superficiales, el pasto y las especies arbóreas crecen bien. En barrancos puede haber erosión. El ganado entra solo en secas.

Este conocimiento local también puede incorporarse en la matriz elaborada por el primer método, es decir que al mapa morfoedafológico elaborado con información técnica (geología, relieve, vegetación), se le puede complementar con el conocimiento oca.

2. Muestreo de suelos para generar indicadores técnicos de calidad de suelos (ITCS) que conformarán línea base

- A partir del mapa de unidades de paisajes (UP), elegir en conjunto, entre ganaderos y técnicos¹, los sitios de muestreo de suelos. Se recomienda realizar el muestreo de campo de manera conjunta, entre técnicos y varios ganaderos, de modo de poder aclarar dudas y homogeneizar el método en campo.
- En cada UP se recomienda hacer un muestreo compuesto; es decir muestrear en varios puntos de cada UP y luego mezclar estas muestras (en una cubeta) para obtener solo una muestra compuesta.
- Los sitios que se van a elegir serán utilizados para definir línea base y como sitios de monitoreo a largo plazo.
- En cada UP, ubicar dos sitios de referencia. Uno de ellos puede ser un sitio con vegetación natural, o bien un sitio que – en función del conocimiento local – presente las mejores condiciones de suelo y el otro sitio que se caracterice por presentar las peores condiciones de suelo.
- Las muestras para análisis físico-químicos de suelos se tomarán de un pequeño perfil (50x 50 cm x 50 cm, ver Fig 3). En éste se tomarán muestras de suelos de los primeros 30cm aprox: de preferencia considerando dos horizontes o capas, la primera con muchas raicillas, y la segunda con menor cantidad de ellas (Fig 3).

¹ De preferencia contar con técnicos o profesionista que cuenten con experiencia en el muestreo de suelos.



Figura 3. Foto izq: excavación para perfil de suelos; Foto der: perfil de suelo, en la parte superior del suelo se observa la acumulación de raíces

En cada uno de los horizontes se tomará una muestra de suelo para analizar en laboratorio los parámetros indicados en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Variables y método analítico propuesto

Variable	Método analítico propuesto
Carbono	Analizador elemental CNHS
pH	Potenciómetro
Densidad aparente	Método del cilindro
Textura	Método de Bouyoucos modificado
Estructura	Método de campo
Estabilidad de agregados	Método de campo
Edafofauna	Método de campo

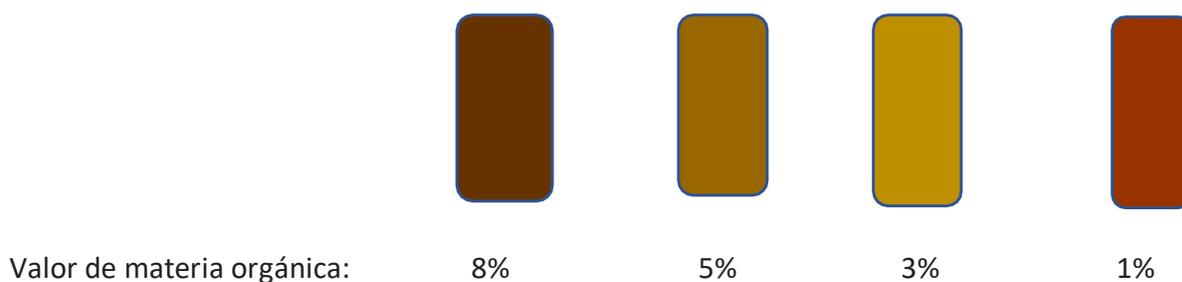
- Junto con el muestreo de suelos, se realizarán lecturas en el mismo perfil para especificar:

Variable	Método propuesto
Profundidad de horizontes	Valoración en campo (Siebe et al 1996)
Materia orgánica	Color del suelo: Tabla Munsell por horizontes
pH	Indicador pH, por horizontes
Densidad aparente	Valoración en campo (Siebe et al 1996), por horizontes
Estructura	Valoración en campo (Siebe et al 1996), por horizontes

A partir de los resultados obtenidos en el laboratorio y en campo se generará la línea base de suelos de cada UP. Posteriormente deberán elaborarse materiales que permitan el monitoreo local de los suelos.

- a. Preparación de material para materia orgánica: se relacionarán los resultados obtenidos de materia orgánica en laboratorio con los colores que se registraron en campo durante la lectura del perfil. A partir de esta relación se elaborará una paleta de colores de cada predio ganadero. Esta paleta de colores debe incluir los sitios de referencia: conservado y degradado. De preferencia la paleta de colores se debe imprimir sobre un material impermeable, suficientemente duro para que no se doble y no brillante. Al reverso imprimir el % de materia orgánica que representa el color.

Ejemplo:



3. Indicadores locales de calidad de suelos (ILCS)

A continuación, se presentan los pasos metodológicos para el monitoreo en campo de indicadores de suelos, tales como materia orgánica, pH, densidad aparente, estructura, lombrices y terracetos (rasgos de erosión). Los muestreos se realizarán en cada Unidad de Paisaje (UP) definidas anteriormente (usar mapa).

Para el muestreo de materia orgánica, pH, densidad aparente, estructura, en cada Unidad de Paisaje se excavará un pequeño hoyo de 50 x 50 x 30 cm de profundidad. En este hoyo, se trabajará en una de las paredes, sobre la cual no debe hacerse ningún disturbio (como pisar o echar tierra encima). El primer paso es distinguir los horizontes (capas) del suelo. Los horizontes se distinguen por la coloración, densidad de raíces, pedregosidad (Figura 4). Una vez que se han distinguido los horizontes, trazar una raya en la pared del hoyo para reconocer estos horizontes o capas.

Se recomienda realizar estos monitoreos en el mismo mes una vez al año.

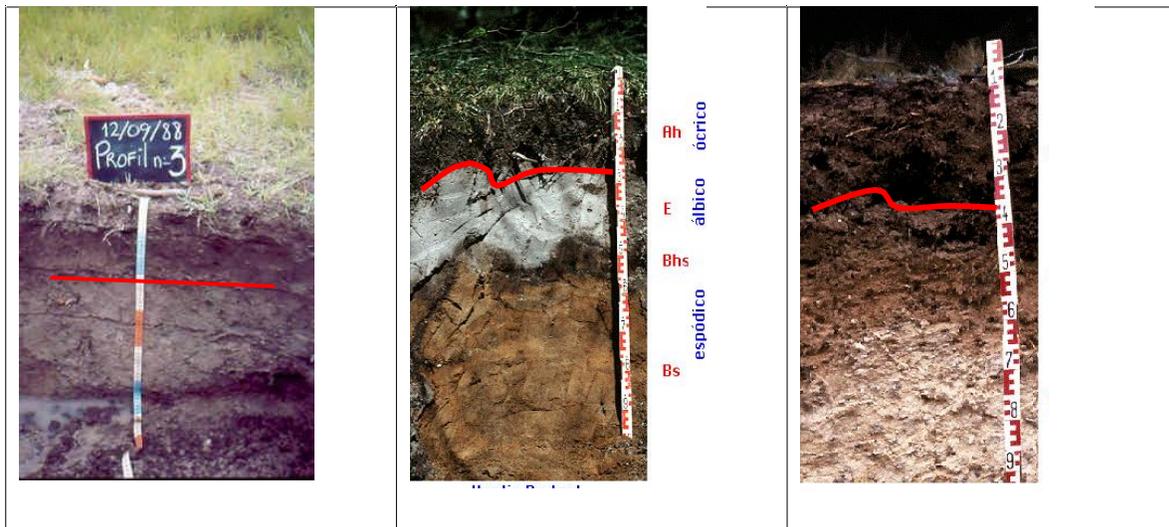


Figura 4: Horizontes (o capas) en distintos suelos. Las líneas rojas distinguen dos horizontes

a) Materia orgánica:

La materia orgánica juega un papel muy importante para la retención de humedad en el suelo, el aporte de nutrientes y la porosidad, todo esto es esencial para la vida de organismos en el suelo y para que las raíces de las plantas crezcan sin impedimentos.

Muestreo

En el perfil (hoyo) abierto, se tomará de la pared del perfil una muestra por cada horizonte o capa. En la mano, esta muestra se humedece un poco con la botella de agua (sin que chorree). Ya humedecida esta muestra se acerca a la paleta de colores para definir a que color se asemeja más. Tener cuidado de no poner la muestra de suelo sobre el papel de la paleta para no mancharlo. Una vez que se identifica el color más cercano, ver en el reverso de la paleta cual es el porcentaje de materia orgánica. Este número escribirlo en la hoja de registro (Anexo 1).

Interpretación:

Cada suelo tiene una capacidad de almacenar materia orgánica distinta, por ello es recomendable comparar los valores que se obtienen con el sitio mejor conservado y con el más degradado de cada unidad de paisaje. Con el tiempo, y con un buen manejo, se busca que los valores de materia orgánica se incrementen, hasta ser lo más parecido posible al sitio mejor conservado y alejado del sitio más degradado.

b) pH- Acidez del suelo

El pH del suelo afecta específicamente la disponibilidad de los nutrientes de las plantas. El rango de pH óptimo para la mayoría de las plantas oscila entre 5,5 y 7,0, sin embargo muchas plantas se han adaptado para crecer a valores de pH fuera de este rango.

Muestreo

En el perfil se tomarán muestras de suelo por Unidad de Paisaje para analizar pH con papel indicador² en los dos horizontes. Para hacerlo se toma una pequeña muestra de suelo de cada horizonte (o capa). En un pequeño bote (de 30-50 ml) con tapa, se llena la tercera parte con la muestra de suelo y el resto se pone agua – la más pura que se tenga, puede ser embotellada. Posteriormente se agita bien para que todo el suelo se mezcle con el agua. Luego se deja descansar unos 10 minutos. En el líquido en suspensión se introduce el papel indicador durante unos segundos luego se saca la tira de papel del agua. Posteriormente se compara el papel con la combinación de colores que aparece en la caja del papel de indicadores. Se toma la lectura de pH (Figura 5). El valor obtenido se registra en el Anexo 2.

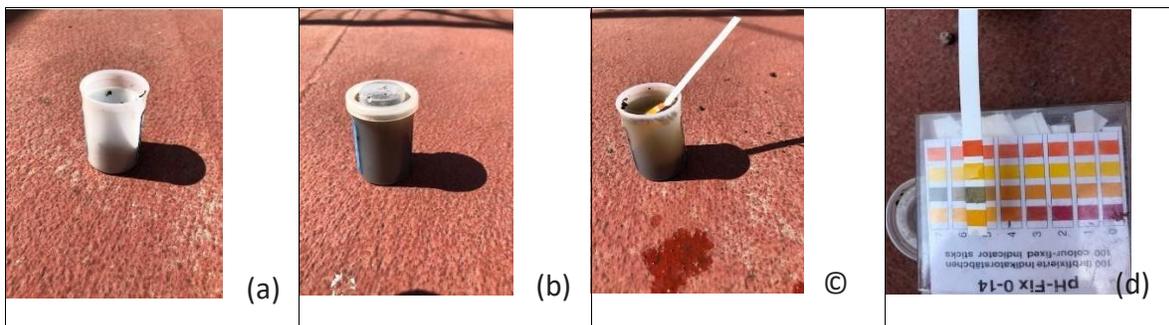


Figura 5. (a) muestra de suelo en frasco, (b) suelo y agua, (c) suelo sedimentado, papel-indicador puesto en solución, (d) comparación de papel indicador con las diferentes posibilidades

Interpretación:

El pH o la acidez del suelo determina la disponibilidad de nutrientes para las plantas. El valor se mide en un rango entre 0 y 14. El pH 7 se considera neutro y es cuando la mayor cantidad de nutrientes se encuentran disponibles para las plantas. Sin embargo, hay suelos que por su naturaleza pueden ser ácidos (pH menores a 7) o alcalinos (pH mayores a 7), por eso es importante comparar los pH con el sitio más conservado.

El pH del suelo se considera bueno cuando esté cerca del valor 7 (6.0-7.5), si los valores

² <https://www.quiminet.com/articulos/funciones-de-las-tiras-de-papel-de-ph-en-un-laboratorio-2562852.htm>

descienden menos de 6.0 o aumentan más de 7.5 entonces la disponibilidad de nutrientes disminuye y con ello empeora la calidad del suelo.

c) Densidad aparente

La densidad aparente es un indicador de la compactación del suelo. Este indicador es importante porque afecta diferentes aspectos como es la resistencia al crecimiento de raíces, el tamaño de los poros por donde debe pasar el agua y el aire, la retención y en la disponibilidad de agua. El impacto de la compactación dependerá de la intensidad del pastoreo y de la textura del suelo.

Muestreo

En la pared del hoyo (perfil) se introduce un cuchillo (o navaja) y se siguen las instrucciones del cuadro 8. La columna izquierda del cuadro explica los resultados que pueden observarse en campo al momento de introducir el cuchillo, mientras que la columna de la derecha presenta, en la parte superior, la textura dominante (la cual se obtuvo en laboratorio) y en la parte inferior se tienen los datos numéricos de la densidad aparente. El resultado puede ser un valor absoluto (ejemplo: 1.6 o bien un rango: entre 1.6 y 1.4). El valor obtenido se registra en el Anexo 3.

Interpretación:

La densidad aparente revela la cantidad de espacio poroso que tiene el suelo. Los números más elevados indican que hay pocos poros por lo que el suelo tiene poco espacio para la entrada de agua y de aire, eso dificulta el crecimiento de raíces. Estos valores típicamente se obtendrán en los sitios más compactados. Los valores más bajos muestran un suelo con buena porosidad. A lo largo del tiempo, se comparará los resultados de cada UP con sitios de referencia en buen estado de conservación y con el sitio más degradado. A mayor valor de la densidad aparente, mayor es la compactación del suelo, probablemente causado por el pisoteo del ganado.

Cuadro 8. Evaluación visual de la densidad aparente

Característica (válido para suelos secos)	Densidad aparente (g/cm ³)			Evaluación
	arenas y limos	francos	arcillosos	
El cuchillo sólo se puede introducir con mucha fuerza en la pared del hoyo. Cuando se saca la cuchilla, los fragmentos de suelo casi no se desmoronan	> 1.9	>1.8	>1.6	alta
El cuchillo sólo se introduce con dificultad 1 a 2 cm en la pared del hoyo. Cuando se saca la cuchilla, los fragmentos de suelo se desmoronan poco y sólo se pueden partir con dificultad por su dureza	1.8	1.6	1.4	mediana
El cuchillo se puede introducir en la pared del hoyo con poco esfuerzo. Cuando se saca la cuchilla, el suelo se desmorona en pocos fragmentos, los cuales pueden partirse en fragmentos más pequeños con la mano	1.6	1.4	1.2	mediana
El cuchillo se introduce en la pared del hoyo muy fácilmente, sin presión, y cuando se saca el suelo se desmorona fácilmente en muchos fragmentos	1.4	1.2	1	baja
El cuchillo se introduce en la pared del hoyo muy fácilmente, sin presión y cuando se saca el suelo se desmorona totalmente	1.2	<1.0	<1.0	baja

d) Estructura de suelos

En el suelo, la estructura va a regir la manera y facilidad con la que el agua se mueve y se retiene. Si la estructura es mala (débil y laminar), entonces el agua no se infiltra, sino que escurre pudiendo causar problemas de erosión. Una buena estructura tiene un tamaño medio, pudiendo ser granular o más grande y que tenga muchos poros.

Muestreo

En el perfil abierto, con una palita se tomará una muestra de suelos de cada horizonte (o capa) tratando de que salga lo más entera posible. Esta muestra se puede disponer sobre un plástico blanco, teniendo cuidado de no juntar las muestras de cada horizonte.

Posteriormente se tomará un terrón de una de las muestras y con cuidado se

fragmentará el terrón para observar su forma y su dureza, a partir de la siguiente clasificación (Cuadro 9 y Figura 6).

Cuadro 9. Evaluación visual de la estructura (modificado de Siebe et al. 2002)

Grado de estructura	Significado
Sin agregación	El terrón se rompe muy fácilmente y solo se ven granos simples
Débil	Cuando se rompe el terrón se obtienen muchos terrones chicos y granos simples
Moderado	Cuando se rompe el terrón se obtiene terrones pequeños, bien formados pero no muy duros y algo de grano simple
Fuerte	Cuando se rompe el terrón se obtiene terrones más pequeños bien formados y durables. Cuando estos terrones pequeños se rompen siguen viéndose terrones más pequeños. No se observa granos simples

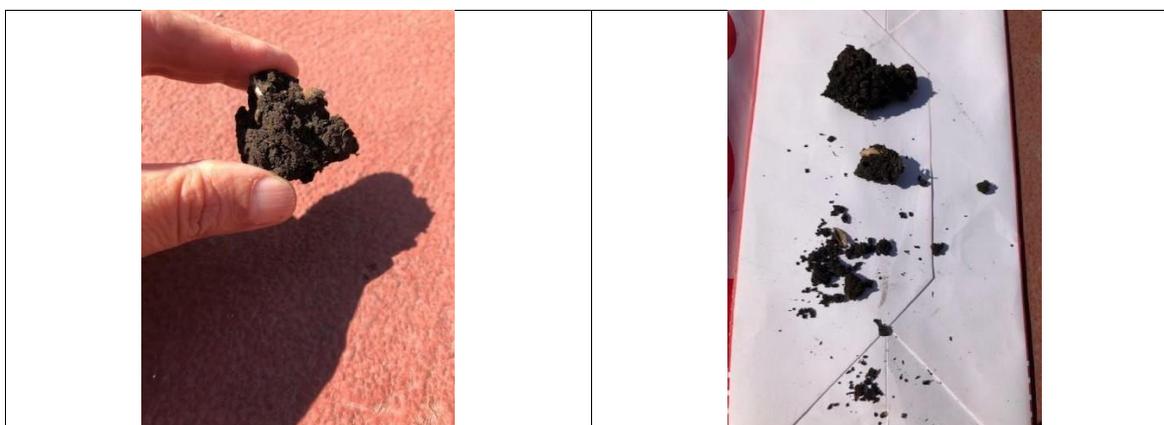


Figura 6. izq: terrón de tamaño medio y fuerte, der: grados de estructura de terrones

Formas de los terrones: las formas de los terrones nos permiten deducir la facilidad con que el agua y el aire pasan por el suelo, así como la presencia de obstáculos para el crecimiento de las raíces (Cuadro 3).

La forma más problemática es la estructura laminar, ya que dificulta el paso de agua y aire y el crecimiento de las raíces. Esta forma generalmente está asociada al pisoteo del ganado y puede llegar a formar terracetas (ver abajo).

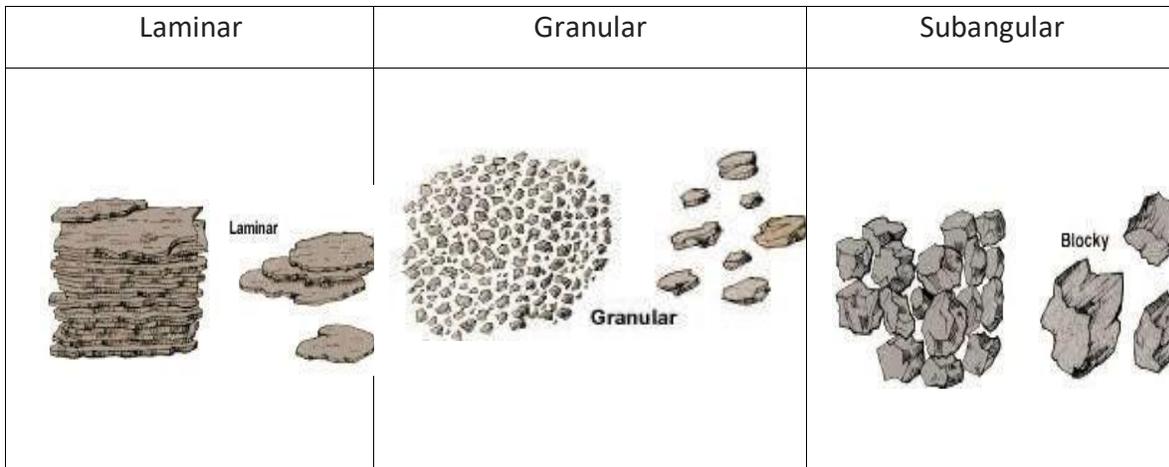


Figura 7. Principales formas de estructura (terrones)

Posteriormente se compara estos resultados con aquellos obtenidos en los sitios de referencia-conservado y degradado. Los datos obtenidos por horizonte (capa) se registrarán en la hoja del Anexo 4.

Interpretación

La estructura del suelo juega un papel importante para la actividad biológica en el suelo para regular el flujo de agua, y reciclar y almacenar nutrientes.

En superficie generalmente se tendrá una estructura pequeña en forma de grano, la cual permite una infiltración rápida del agua.

A medida que se profundice en el suelo, los terrones van a ser más grandes y estables. Sin embargo, si a cualquier profundidad los terrones tienen una forma de lámina, eso podría indicar que el suelo está compactado por el pisoteo de los animales. Asociado a esta forma de la estructura podrían verse terracetas (ver más abajo). Los terrones entre moderados y fuertes son más estables ante el impacto de la gota de lluvia, es decir que podrían erosionarse más lentamente.

En cada monitoreo anual, es importante checar que no aparezcan terrones en forma de láminas

e) Lombrices

Las lombrices de tierra se encuentran en diversos entornos, pero las variaciones estacionales y climáticas afectan su abundancia, distribución y actividad. Son más activos en primavera y otoño. La humedad del suelo, la aireación, la temperatura y la textura afectan a las poblaciones de lombrices de tierra.

Los suelos con alta capacidad de retención de agua, como los arcillosos y con materia orgánica proporcionan un hábitat ideal para las lombrices de tierra en comparación con los suelos arenosos, que tienen menor contenido de materia orgánica y capacidad de retención de agua, y se secan y alcanzan temperaturas incómodas rápidamente. Los suelos profundos son el nicho favorito de las lombrices de tierra.

Si bien el pH neutro es ideal, las lombrices de tierra pueden ajustarse a un pH de 5 a 8 y algunas especies toleran aún más suelos ácidos.

Las lombrices de tierra estimulan la descomposición de la materia orgánica. La falta de lombrices de tierra puede reducir el ciclo de nutrientes y la disponibilidad para la absorción de la planta. Además, se puede reducir el drenaje natural y la estabilidad de los agregados.

Muestreo

La época ideal para el muestreo de lombrices es en primavera u otoño. Si sólo se quiere hacer un monitoreo de las lombrices, basta con una vez al año. Si se quiere observar la respuesta de un manejo o de una restauración particular en un sitio se recomienda hacerlo dos veces al año. Asegurarse que uno de los sitios donde se haga el monolito sea el sitio más conservado de la Unidad de Paisaje.

Para el muestreo de lombrices se excava un monolito (ver Figura 5) de 25 x 25 x 30 cm que se divide en estratos de 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm de profundidad. Se recomienda hacer unos 5 monolitos por UP, separados de 10 metros entre ellos (Figura 6).

Sobre un plástico blanco se pone una bandeja donde se pondrá la primera capa de suelo. En ella, el suelo se desmorona, y luego se colectan las lombrices, se cuentan y se pesan. Luego se hace lo mismo con el segundo y tercer estrato.

Al final se obtendrá información de densidad de lombrices (número de lombrices /m²) y de biomasa (peso de lombrices /m²). Cada dato se registrará en la hoja del Anexo 5, a partir de la cual se sacarán los promedios por hoyo y por Unidad de Paisaje.

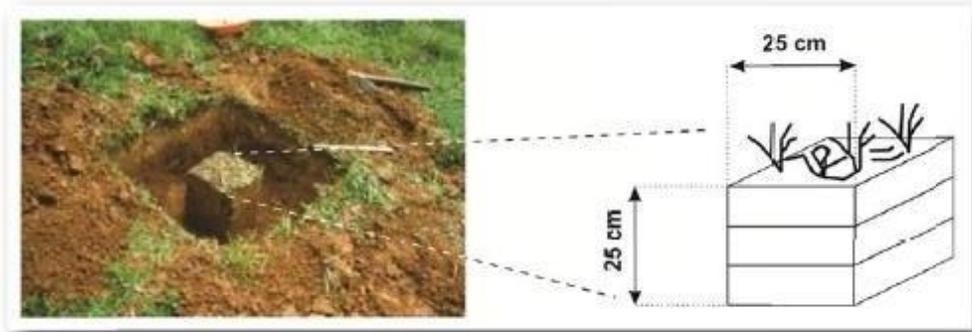


Figura 8. Monolito para estudio de lombrices (Fuente: Moreira et al. 2012)

Interpretación

La presencia de lombrices es un buen indicador de calidad de suelo, porque indica que hay materia orgánica en el suelo de la cual se alimentan y que la están reciclando. En los pastizales la biomasa de lombrices puede ser alta pero su diversidad es baja.

Las poblaciones de lombrices bajas o ausentes son un indicador de poco o nada de residuos orgánicos en el suelo o también pueden ser un indicador de temperatura alta y baja humedad del suelo que son estresantes no solo para las lombrices de tierra, sino también para el crecimiento de plantas.

Si existen pocas lombrices de tierra, comparadas con el sitio conservado, podría ser necesario romper las capas compactadas para mejorar la aireación y el drenaje, y estabilizar el suelo para protegerlo de la erosión.

f) Terracetas

Las terracetas son desniveles en forma de caminos de zigzag que se presentan sobre el suelo debido a la compactación producida por el pisoteo animal. Las terracetas representan una forma de erosión moderada, y en conjunto forman un paisaje conocido por el nombre de “pie de vaca” (Figura 9).



Figura 9. izq: terracetos, der: ladera con conjunto de terracetos, también llamada “pie de vaca”

Para la evaluación anual de estas formas se recomienda hacerla después de la temporada de lluvias.

Muestreo

Para su evaluación, se elegirá desde un inicio una parcela por unidad de paisaje con un área de 10 m². Con la ayuda de una regla o flexómetro se medirá la altura de cada terraceta, desde la base del suelo hasta la máxima altura. Esta información se registrará en la hoja de Terracetos (Anexo 6). Al mismo tiempo se realizará la misma evaluación en el sitio de referencia conservado.

Interpretación:

El dato de pérdida de suelo por hectárea se comparará con el mismo dato obtenido para el sitio de referencia conservado. Anualmente se buscará que la pérdida de suelo por unidad de paisaje disminuya y se acerque cada vez más al sitio de referencia conservado.

g) Monitoreo de calidad de suelos

Una vez analizado individualmente cada uno de las variables queda integrar esta información para tener una lectura completa de la calidad de los suelos. Para ello, se pasan los resultados del muestreo a la formato del Anexo 7 en el cual se podrá hacer una comparación de los resultados, comparándolos con el sitio de referencia conservado y evaluar la tendencia temporal. Esta información servirá para evaluar la eficiencia de las prácticas de manejo para mejorar la calidad de los suelos.

4.2 Necesidades de material de campo

- Mapa de Unidades de paisaje de cada predio
- Pala
- Pala chica
- Cuchilla (o navaja)
- Hoja de registro
- Lápiz
- Botella de agua (con pequeños agujero en la tapa)
- Paleta de colores para evaluar materia orgánica (elaborada para cada predio)
- Papel indicador de pH
- Botes de 50 ml con tapa
- Agua embotellada (para pH)
- Plástico blanco (1 m²)
- Regla (20 cm) o flexómetro
- Bandeja
- Balanza (para medición a nivel de gramos)

5. Laboratorios de suelos

A nivel nacional, la acreditación de laboratorios y procedimientos en México está a cargo de la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA). Esta acreditación reconoce la competencia técnica y confiabilidad de los laboratorios de ensayo, laboratorios de calibración, laboratorios clínicos, unidades de verificación (organismos de inspección), proveedores de ensayos de aptitud, productores de materiales de referencia y organismos de certificación para la Evaluación de la Conformidad (www.ema.org.mx).

La EMA acredita análisis, procesos, equipos y procedimientos. En ese sentido, un laboratorio puede estar acreditado para un solo equipo (p.e. cromatógrafo) pero no para otros tipos de análisis y procesos (http://consultaema.mx:75/Directorio_INV/Principal.aspx).

Algunos laboratorios ambientales que tienen ciertos procesos y equipos certificados son:

- Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. (CICY)
- Centro de Investigación Biológico del Noroeste S.C. (CIBNOR)
- Centro Nacional Agropecuario A.C.
- Facultad de Química (UNAM)

Sin embargo, los equipos y procedimientos acreditados no son necesariamente utilizados para los análisis de suelos.

Existen laboratorios de suelos que tienen certificaciones distintas a la EMA, como:

- Fertilab, que tiene acreditaciones por parte de COFEPRIS, por el programa NAPT (North American Proficiency Testing), WEPAL Programa de Intercalibración (Wageninen Evaluating Programme for Analytical Laboratories) y certificación ISO 9001-2015 (www.fertilab.com.mx).

Es necesario indicar que la acreditación funciona en los laboratorios de servicio, sin embargo, los laboratorios de investigación/enseñanza modifican los procedimientos en función de la problemática, la condición geográfica- especialmente dada la variabilidad de los suelos- el tipo de muestreo y el tipo de uso de suelo, adaptando y mejorando los procesos garantizando la exactitud y precisión.

Diversos laboratorios de investigación se han asociado formando una Red temática Nacional de laboratorios para el análisis, uso, conservación y manejo del suelo, que busca:

- (i) Estandarizar protocolos metodológicos, enfoques de medición y análisis de datos
- (ii) Disminuir el error vinculado a la determinación de carbono mediante la implementación de procesos de control de calidad en todos los análisis.

Los laboratorios de Universidades que analizan suelos en México siguen la siguiente normatividad de SEMARNAT: NOM-021-SEMARNAT 2000: que establece las especificaciones de muestro y análisis de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, a partir de sus características específicas de constitución, formación y distribución.

Cuadro 10. Laboratorios de suelos ubicados en los Estados del presente estudio

Estado	Universidad	Responsable	Contacto
Jalisco	Universidad de Guadalajara- Centro Universitario de Ciencias Biológicas	Dr. José de Jesús López Alcócer	Jose.llopeza@academicos.udg.mx (33) 37771150 ext. 33168
Chihuahua	Universidad Autónoma de Chihuahua- Laboratorio de suelos		http://www.faciatec.uach.mx/servicio/lab_analisis_suelo/ (614) 4391844
Veracruz	Universidad Veracruzana- Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias- Laboratorio de suelos	Mtra. Rocío Rodríguez Cabrera	(783) 8344350 ext.46101, 46102
	Instituto de Ecología (INECOL), Laboratorio de suelos	Dra. Sandra Rocha	Sandra.rocha@inecol.mx (228)8421800 ext. 4315
Chiapas	ECOSUR-San Cristóbal de las Casas, Laboratorio de suelos y plantas	Quim. Miguel Angel López Anaya	malopez@ecosur.mx (967) 6749000 ext. 1805

6. Ganadería regenerativa desde la perspectiva de suelo

El mantenimiento de pasturas vigorosas, nutritivas y diversas que favorezcan la calidad de los suelos debería ser el objetivo principal de un sistema ganadero regenerativo.

Un modelo simplificado de un sistema ganadero, con énfasis en factores que afectan las propiedades físicas del suelo nos permite entender los distintos componentes que interactúan entre sí y que son necesarios abordar en una ganadería regenerativa (Figura 10).

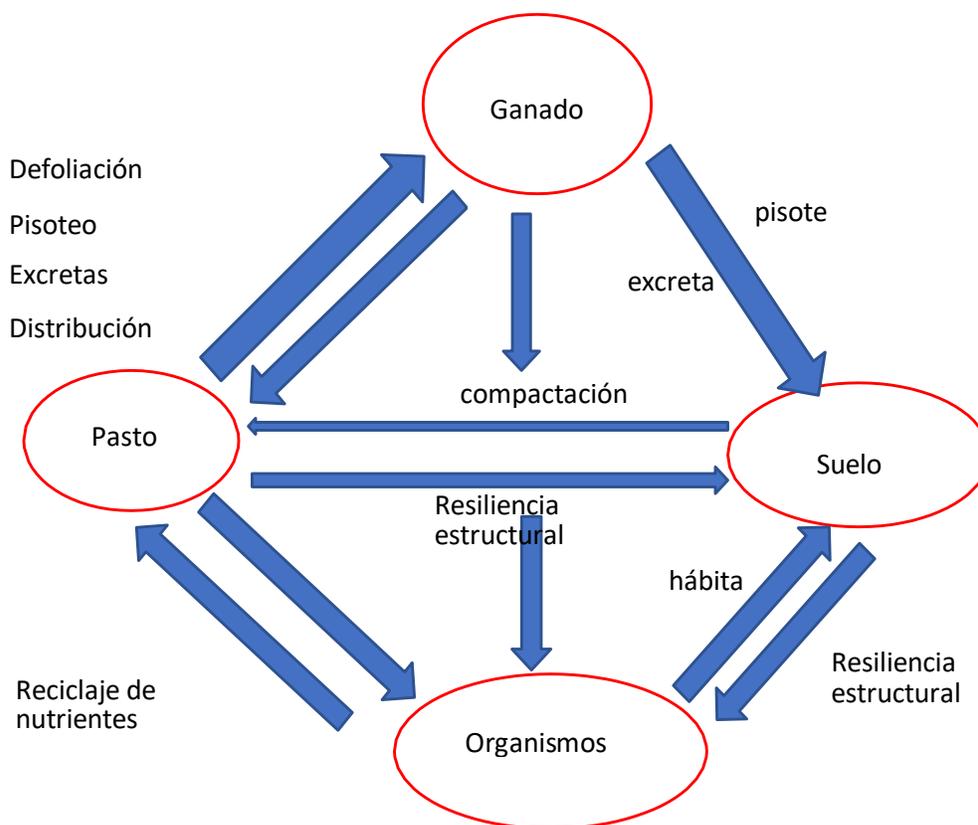


Figura 10. Interrelaciones entre el ganado, los pastos, los suelos y los organismos vivos. Adaptado de Greenwood y Mc Kenzie (2001)

El pisoteo del ganado afecta la vegetación a través de daño mecánico, la defoliación y los cambios diferenciales de especies vegetales, e indirectamente afecta el crecimiento del pasto al compactar el suelo. Sin embargo, las excretas del ganado pueden generar un impacto positivo al suelo al incrementar el contenido de materia orgánica y de

microorganismos. Por otro lado, la distribución de semillas, a través de las excretas podrían mejorar la diversidad vegetal, necesaria para transitar hacia la resiliencia estructural de los suelos. Las raíces producen macroporos en los suelos estabilizando su estructura. La biota del suelo mantiene una influencia positiva sobre las propiedades físicas del suelo, aunque el pisoteo del ganado disminuya el espacio poroso, es decir el hábitat para organismos. La presencia de excretas y la actividad de los organismos del suelo juegan un papel fundamental en el mantenimiento de las propiedades físicas del suelo, las cuales mejoran la tasa de infiltración.

En síntesis, la estructura del suelo en el tiempo es el resultado de fuerzas que de manera competitiva degradan o regeneran la estabilidad estructural del suelo.

Las estrechas interacciones entre las plantas, los suelos y los animales dentro de los sistemas ganaderos dificultan separar los efectos del pisoteo de la defoliación y el regreso de excretas (Greenwood y Mc Kenzie, 2001).

Los procesos para mantener y mejorar las condiciones físicas de los suelos después del pastoreo son aún poco entendidas (Greenwood y Mac Kenzie, 2001). El tiempo para que las propiedades físicas de los suelos se recuperen dependerá del tipo de suelo, la intensidad de la compactación, así como de condiciones climáticas y biológicas. Algunos estudios muestran que el proceso de recuperación ha sido de 2.5 años en ambientes templados a 13 años en ambientes más fríos (Gifford y Hawkins, 1978 en: Greenwood y Mc Kenzie, 2001). En ambientes tropicales secos, Ayala et al (2016) encontraron una gran resiliencia en pastizales, donde solo la compactación diferenció a los suelos con pastizales y suelos con bosques maduros. De la explicación anterior puede derivarse que:

Desde el punto de vista de los suelos, una ganadería regenerativa debe promover una resistencia a la compactación, para lo cual debe buscar el incremento de materia orgánica, biomasa microbiana y densidad de micorrizas de pasturas con la finalidad de aumentar la estabilidad de macroagregados y con ello incrementar la resistencia a la compactación.

Referencias

- Alaoui A., Caduff U., Gerke H.H., Weingartner R. 2011. A Preferential Flow Effects on Infiltration and Runoff in Grassland and Forest Soils. *Vadose Zone Journal* 10: 367-377
- Amézquita, M.C., Ibrahim, M.A. & Buurman, P. 2004. Carbon sequestration in pasture, agro forestal and silvo-pastoral systems in american tropical forestry systems. Proc. 2nd. Intern. Congress in Agroforestry Systems. Mérida, Mex. p. 61
- Arshad, M.A. y Coen, G.M. 1992. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. *American J. of Alternative Agriculture* 7: 25-31.
- Astier C. M., Maass M.M., Etchvers B.J. (2002) Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36: 605-620.
- Ayala-Orozco, B., M. Gavito, P. Balvanera, F. Mora, I. Siddique, V. Jaramillo, H. Cotler, L. Romero-Duque, Martínez-Meyer E. 2017. Resilience of soils and biochemical ecosystem properties to tropical dry forest conversion and pasture use. *Land Degradation & Development*. DOI: 10.1002/ldr.2686
- Ball C.B., Douglas T.J. 2003. A simple procedure for assessing soil structural, rooting and surface conditions. *Soil Use and Management* 19:50-56
- Batista H.D.P., de Almeida G., de Lima R., Pandorfi H., da Silva M., Rolim M. 2019 Impact of short-term grazing on physical properties of Planosols in Northeastern Brazil. *Geoderma Regional* 19: e00234
- Bone J., Head M., Barraclough D., Archer M., Scheib C., Flight D., Voulvoulis N. 2010. Soil quality assessment under emerging regulatory requirements. *Environmental International* 36: 609-622
- Burger J.A., Kelting L.D. 1999. Using soil quality indicators to assess forest stand management. *Forest Ecology and Management* 122: 155-166
- Crespo, G. 2008. Importancia de los sistemas silvopastoriles para mantener y restaurar la fertilidad del suelo en las regiones tropicales *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, vol. 42 (4): 329-335
- Cotler, H., Durán, E. y C. Siebe. 2002. Caracterización morfo-edafológica y calidad de sitio de un bosque seco caducifolio En: Ayala R. *et al* (Eds.), *Historia Natural de Chamela*. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Cui J., Askari M.S., Holden M.N. 2014 Visual Evaluation of Soil Structure Under Grassland management. *Soil Use and Management* 30: 129–138
- Cui J., Holden N. 2015. The relationship between soil microbial activity and microbial biomass, soil structure and grassland management. *Soil & Tillage Research* 146: 32–38
- Cui Z., Gao-Lin W., Z. Huang, Liu Y. 2019. Fine roots determine soil infiltration potential than soil water content in semi-arid grassland soils. *Journal of Hydrology* 578, 124023.
- Doran, J. W., and T. B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. *In: Defining and Assessing Soil Quality for Sustainable Environment*. Doran, J. W., D. C. Coleman, D. C. Bezdicek, and B. A. Stewart (eds). Soil Science Society of America
- Dumanski, J., Gameda, S. y Pieri, C. 1998. *Indicators of land quality and sustainable land*

management. The World Bank, Washington DC, USA.

- Ekschmitt K., Bakonyi G., Bongers M., Bongers T., Boström S., Dogan H., Harrison A., Nagy P., O'Donnell G.A., Papatheodorou M.E., Sohlenius B., Stamou P.G., Wolters V. Nematode community structure as indicator of soil functioning in European grassland soils. *Eur. J. Soil Biol.* 37: 263–268
- FAO. 2006. Global forest resources assessment 2005. FAO Forestry Paper 147, Rome.
- Gardi C., Tomaselli M., Parisi V., Petraglia A., Santini C. 2002. Soil quality indicators and biodiversity in northern Italian permanent grasslands. *European Journal of Soil Biology* 38: 103–110
- Geissert D., Rossignol J-P. (Coord.), 1987. La morfoedafología en la ordenación de los paisajes rurales. Conceptos y primeras aplicaciones en México. Editorial INIREBORSTOM, Xalapa, Ver. 83 p
- Ghimire R., Thapa R.V., Cano A., Acosta-Martinez V. 2019. Soil organic matter and microbial community responses to semiarid croplands and grasslands management
- Greenwood L.K., B. M. McKenzie (2001) Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 41(8) 1231 - 1250
- Hernández Chávez Marta, Sánchez Cárdenas Saray, y Simón Guelmes Leonel. (2008). Efecto de los sistemas silvopastoriles en la fertilidad edáfica. *Zootecnia Tropical*, 26(3), 319-321.
- Herrero M, Grace D, Njuki J, Johnson N, Enahoro D, Silvestri S, & Rufino MC. 2013. The roles of livestock in developing countries. *Animal*, 7(s1), 3-18.
- Herrero M, Henderson B, Havlík P, Thornton, PK, Conant RT, Smith P, Stehfest E. 2016. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate Change*, 6(5), 452–461.
- Johannes A., Weisskopf P., Schulin R., Boivin P. 2019. Soil structure quality indicators and their limit values. *Ecological Indicators* 104: 686–694
- Lima Hugo N.B., Dubeux J.R., José C.B. Santos, Mércia V.F., Mello, Alexandre C.L., Lira, Mário A. y Cunha Márcio V. (2018). Soil attributes of a silvopastoral system in Pernambuco Forest Zone. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 6(1), 15-25.
- Lobell DB, Cassman KG, Field CB. 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annu Rev Environ Resour* 34, 179–204
- Lok, S., Crespo, G.; Frómeta, E.; Torres, V.; Fraga, S. 2007. Estudio y selección de indicadores de sostenibilidad en pastizales silvopastoriles basados en *Leucaena leucocephala*-*Panicum máximum*. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, vol. 41 (4): 371-380
- McKenzie D. 2013. Visual soil examination techniques as part of a soil appraisal framework for farm evaluation in Australia. *Soil & Tillage Research* 127: 26–33
- Merrington G. 2006. The development and use of soil quality indicators for assessing the role of soil in environmental interactions. Environment Agency, Science Report SC030265
- Moreira F., E. Jeroen Huising y David E. Bignell (2012) Manual de biología de suelos tropicales. Muestreo y caracterización de la biodiversidad. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales -Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT) 350pp.

- Mueller ND, Gerber JS, Johnston M, Ray DK, Ramankutty N, & Foley JA. 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 490(7419), 254-257.
- Muñoz-Rojas M. 2018. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. *Current opinion in Environmental Science & Health* 5: 47-52
- Murgueitio ER, Chará JO, Barahona RR, Cuartas CC, & Naranjo JR. 2014. Los Sistemas Silvopastoriles Intensivos (SSPI), herramienta de mitigación y adaptación al cambio climático. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17, 501–507.
- Newell-Price J.P., Whittingham M.J., Chambers B.J., Peel J. 2013. Visual soil evaluation in relation to measured soil physical properties in a survey of grassland soil compaction in England and Wales. *Soil & Tillage Research* 127: 65–73
- Oelbermann, M., Voroney, R.P., Kass, D.C.L, Schlönvoigt, A. M. 2006. Soil carbon and Nitrogen dynamics using stable isotopes in 19- and 10- year old tropical agroforestry systems. *Geoderma* 130: 356
- Palmer, R.C., 2004. Preliminary Estimation of Soil Structural Conditions within 10 Soil Landscapes in South West England during 2002 and 2004. Final Report to Environment Agency for England and Wales, Bristol.
- Parr, J. F., R. I. Papendick, S. B. Hornick, and R. E. Meyer. 1992. Soil quality: Attributes and relationships to alternative and sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture* 7: 5-11.
- Pellant M. 2005. Interpreting indicators of rangeland health. Technical Reference 1734-6, USGS-USDA-NRCS-
- Sadegh M., Holden M.N. 2014. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. *Geoderma* (230-231): 131-142
- Safaei M., Bashari H., Reza Mosaddeghi M., Jafari R. 2019. Assessing the impacts of land use and land cover changes on soil functions using landscape function analysis and soil quality indicators in semi-arid natural ecosystems. *Catena* 177: 260–271
- Schoenholtz S.H., H. Van Miegroet, Burger J.A. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and management* 138: 335-356
- Qi, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., Gu, Z., 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma* 149 (3–4), 325–334.
- Siebe C., Jahn R., Dtahr K. 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo. *Sociedad mexicana de la Ciencia del Suelo, Publicación Especial* 4, 57 p.
- Smith WK, Cleveland CC, Reed SC, Running SW. 2014. Agricultural conversion without external water and nutrient inputs reduces terrestrial vegetation productivity. *Geophys Res Lett* 41, 449–55
- Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel V, Rosales M & De Haan C. 2009. La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones. *FAO*.
- Sun, B., Zhou, S., Zhao, Q., 2003. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on

- geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma* 115 (1–2), 85–99.
- Torres-Sallan G., Creamer E.R., Lanigan J.G., Reidy B., Byrne A.K. 2018. Effects of soil type and depth on carbon distribution within soil macroaggregates from temperate grassland systems. *Geoderma* 313: 52–56
- USDA. 2015. Soil health literature summary-Effects of conservation practices on soil properties in areas of cropland. Natural Resources Conservation Service National Soil Survey, Center USA.
- Villanueva-López Gilberto, Martínez-Zurimendi Pablo, Ramírez-Avilés Luis, Casanova-Lugo Fernando y Jarquín-Sánchez Aarón. (2014). Influence of livestock systems with live fences of *Gliricidia sepium* on several soil properties in Tabasco, Mexico. *Ciencia e investigación agraria*, 41(2), 175-186
- Wang M., Yang W., Wu N., Wu Y., Lafleur P., Lu T. 2019. Patterns and drivers of soil carbon stock in southern China's grasslands. *Agricultural and Forest Meteorology* 276–277 Zhang, B., Zhang, Y., Chen, D., White, R.E., Li, Y., 2004. A quantitative evaluation system of soil productivity for intensive agriculture in China. *Geoderma* 123 (3–4), 319–331.
- Zika M, Erb KH. 2009. The global loss of net primary production resulting from human- induced soil degradation in drylands. *Ecol Econ* 69, 310–18.
- Yong-Zhong S., Yu-Lin L., Jian-Yuan C., Wen-Zhi Z. 2005. Influences of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded sandy grassland, Inner Mongolia, northern China. *Catena* 59: 267–278
- Yu P., Han D., Liu S., Wen X., Huang Y., Jia H. 2018 Soil quality assessment under different land uses in an alpine grassland. *Catena* 17: 280-287

Anexos

ANEXO 1- Monitoreo de materia orgánica

Unidad de Paisaje:

Autor(a):

	% materia orgánica
Fecha 1	
Fecha 2	
Fecha 3	
Sitio conservado	
Sitio degradado	
Tendencia	

ANEXO 2- Monitoreo de pH

Unidad de Paisaje:

Autor(a):

	pH
Fecha 1	
Fecha 2	
Fecha 3	
Sitio conservado	
Sitio degradado	
Tendencia	

ANEXO 3- Monitoreo de densidad aparente

Unidad de Paisaje:

Autor(a):

	Densidad aparente
Fecha 1	
Fecha 2	
Fecha 3	
Sitio conservado	
Sitio degradado	
Tendencia	

Valores recomendados

Clase textural	Densidad aparente	
	Rango	Promedio
Franco arcilloso	0.77- 1.27	1.06
Arcilloso	0.43- 1.74	1.22
Franco arcillo-limoso	0.58- 1.15	0.96
Arcillo limoso	0.67- 1.23	0.9
Franco limoso	0.91- 1.14	1.02
Franco arcillo arenoso	0.78- 1.35	1.11
Franco arenoso	0.6-1.36	1.12
Arenoso	0.88- 1.22	1.1

ANEXO 4- Monitoreo de estructura

Unidad de Paisaje:

Autor(a):

Fecha:

	Estructura del suelo	
	Forma del terrón	Grado de la estructura
Fecha 1		
Fecha 2		
Fecha 3		
Sitio conservado		
Sitio degradado		
Tendencia		

ANEXO 5- Monitoreo de lombrices

Unidad de Paisaje:

Autor(a):

Fecha:

Unidad de Paisaje (UP)	Monolito	Número de lombrices en monolito	Número de lombrices /m ²	Promedio de lombrices por UP	Peso de lombrices por monolito	Promedio de lombrices por UP	Peso de lombrices (biomasa)	Promedio de peso de lombrices por UP
Planicie	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
Ladera suave con suelos profundos	1							
	2							
	3							
	4							
	5							

Para convertir el Número de lombrices por monolito a Número de lombrices /m² multiplicar por 4, seguir el mismo procedimiento para la biomasa

Ejemplo:

Número de lombrices por monolito= 13, entonces Número de lombrices /m² = 52

Peso de lombrices por monolito = 120 gr, entonces Peso de lombrices/m²= 480 gr

ANEXO 6- Monitoreo pérdida de suelo a través de terracetos

Unidad de Paisaje:

Autor(a):

Fecha:

Número de medida	Altura de terracetos (cm)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
Suma de todas las medidas	
Promedio (cm)	

Una vez registrado los datos se procederá a realizar el siguiente cálculo para estimar la cantidad de suelo que se pierde por hectárea debido a su erosión.

$$\text{Pérdida de suelos (ton/ha)} = \text{Altura promedio pedestal} * \text{Área (ha)} * \text{densidad aparente}$$

Anexo 7- Monitoreo de calidad de suelos

Unidad de Paisaje:

Autor(a):

Fecha:

Variable	Sitio de referencia conservado	Fechas de monitoreo			
		Fecha 1	Fecha 2	Fecha 3...	Tendencia
Materia orgánica (valor)					
pH (valor)					
Densidad aparente (valor)					
Estructura (tipo)					
Lombrices (número/m ²)					
Terracetas (pérdida de suelo)					

La tendencia puede registrarse como mejoría, igual, empeora