

USO DE INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO COMO ESTRATEGIA PARA PREVENIR SU DEGRADACION

Alvaro García O¹. y Diana L. Correa²

¹ *Presidente Comisión de Fertilidad de Suelos y Nutrición de Plantas, Unión Internacional de Sociedades de la Ciencia del Suelo. Correo electrónico: agarciao58@yahoo.es*

² *Candidata a Ph.D., U. Nal de Colombia Sede Palmira*

EL CONCEPTO DE CALIDAD DEL SUELO

Doran y Parkin, (1994) la han definido como “La capacidad que tiene el suelo para funcionar en los límites impuestos por el ecosistema, para preservar la productividad biológica y calidad ambiental y promover la salud vegetal, animal y humana”.

Según Lal (1994), la calidad del suelo puede ser clasificada como inherente y como calidad dinámica del mismo. La primera, es la resultante de la evolución natural del suelo determinada por los factores de formación y por los procesos específicos que les han transferido características. Mientras que la calidad dinámica del suelo, hace referencia a cambios en la naturaleza de sus características resultado del manejo y del uso que de ellos hace el hombre.

Como herramientas para la evaluación de la calidad del suelo se han establecido indicadores que facilitan la valoración de los cambios sucedidos en el suelo. Varios autores han definido los indicadores de la calidad del suelo como los procesos del suelo y propiedades que son sensibles a cambios en las funciones del suelo (Doran y Jones, 1996; Aparicio y Costa, 2007). Esto es importante para la elaboración de un método sencillo, sensible y manejable para la evaluación de la calidad del suelo (Dumanski y Pieri, 2000, Yanbing, 2009).

Los indicadores deben facilitar el entendimiento de los procesos que se lleven a cabo en el suelo y ser aplicables para la comparación de diferentes situaciones. Para ser prácticos en el manejo, tales indicadores deben suministrar información relevante sobre las condiciones físicas, químicas y biológicas de los suelos y adecuados para valorar una situación específica del funcionamiento del suelo, un servicio ecosistémico del suelo o una amenaza (Andrews et al., 2004; Zornoza et al., 2007; Cécillon, et al, 2009).

Partiendo del interés que ha suscitado desde hace algún tiempo la evaluación de la calidad del suelo, se han planteado clasificaciones de los indicadores, de acuerdo a sus atributos. El Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de los Estados Unidos (USDA, 1998), clasifica los indicadores de calidad del suelo en cuatro grupos generales: visuales, físicos, químicos y biológicos.

Otros autores ha expuesto criterios para la selección de indicadores que destacan la sencillez, practicidad y costos de su evaluación. Los indicadores deben satisfacer los siguientes criterios: (1) relacionar procesos del ecosistema con modelos de simulación, (2) integrar procesos y propiedades del suelo, (3) ser aplicables en diferentes usos de la tierra y en condiciones de campo, (4) ser susceptibles a variaciones en el manejo y en el clima (Doran y Parkin, 1994).

Lal (1994) y Nachtergaele y Licona (2009), consideran que los indicadores relacionados con el suelo deben tener como características:

- Simplicidad y mensurabilidad: fáciles de medir especialmente en condiciones de campo.

- Pertinencia y representatividad: Preferiblemente aplicables a través de diferentes escalas (temporal, sistémica y espacial).
- Relatividad y predicción: fáciles de extrapolar para predecir en suelos y eco-regiones similares.
- Versatilidad: importante para un amplio rango de propiedades y procesos.
- Facilidad de analizar, interpretar y orientados a procesos.
- Relevantes para las condiciones ecológicas.
- Utilidad para el usuario: validez, cantidad limitada, claridad en el diseño y aplicación, no redundancia, retrospectividad.

Los indicadores de calidad del suelo se basan en el análisis de diferentes características como la disponibilidad de agua y nutrientes y la resistencia a la erosión entre otras. Kosmas et al., (1999), mencionan que estas características se pueden evaluar, usando propiedades básicas como textura, material parental, profundidad, pendiente, drenaje, presencia de gravilla y estableciendo relaciones con factores como clima, material parental y topografía.

Mausbach y Seybold (1998), diseñaron una representación gráfica sobre la relación de los indicadores con el funcionamiento y la calidad del suelo. La **Figura 1** muestra como uno o más indicadores pueden representar cada función y algunos pueden estar relacionados con varias funciones del suelo. Los principales agentes de la degradación reconocidos en Suramérica son la erosión, la desertificación y la salinización.

LA EROSION

La erosión, en diferentes grados, magnitud y tipo, afecta grandes áreas en diversas regiones y, en general, su efecto es consecuencia de las actividades humanas en suelos frágiles o propensos a la misma, aunque se reconoce que también sucede naturalmente en muchas tierras como consecuencia de la combinación de condiciones fisiográficas, morfológicas y ambientales que la favorecen.

La erosión se define como el proceso de desprendimiento, transporte y depósito de los materiales de suelo. Es debida de factores activos que aportan la energía y que puede provenir del agua (erosión hídrica) o del viento (erosión eólica). La gravedad actúa facilitando el transporte de los materiales desprendidos.

La erosión causada por el agua puede ser causada por las lluvias (pluvial) o por corrientes de agua (fluvial). Las lluvias pueden causar desprendimiento de materiales de suelo cuando lo impactan y su efecto es función del grado de resistencia que este tenga al mismo. En el caso de suelos afectados por excesos de magnesio se ha observado que su resistencia al impacto de las gotas de lluvia es mínima, lo que genera pérdida de estructura, compactación y pérdida de propiedades hidrodinámicas. Como resultado, las obras de ingeniería y de adecuación de tierras tienen muy poca durabilidad.

La escorrentía, considerada como la cantidad de agua de lluvia que no infiltra y se desplaza sobre la superficie del suelo con velocidad que depende de la pendiente y de la cobertura vegetal, es responsable de los efectos visuales más impactantes. Aquí cabe anotar que cuando los impactos se producen y motivan la reacción humana el suelo ya se ha perdido.

El conocimiento del potencial de pérdida del suelo es básico para la implementación de programas que propendan por la reducción o al menos en el mantener la cantidad de pérdida del suelo actual en el tiempo y lugar y ella en función de una evaluación permanente de dicho potencial” (Gómez, 1999).

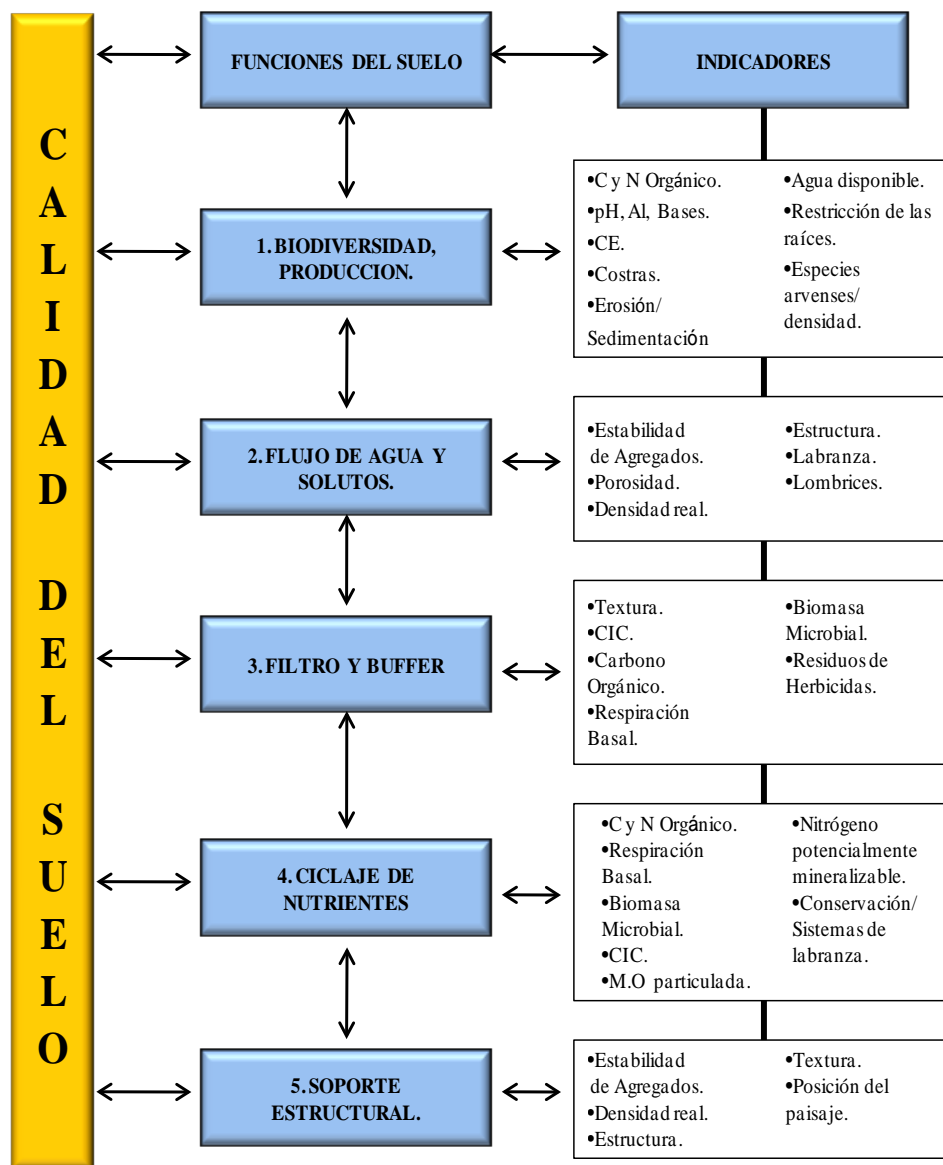


Figura 1. Representación gráfica del concepto de calidad del suelo, usando funciones e indicadores de calidad del suelo (Mausbach y Seybold, 1998).

La percolación corresponde al movimiento del agua a través del perfil del suelo con desplazamiento de sus partículas, elementos y/o compuestos. Trae como consecuencia la sustracción del medio de soporte para las raíces y la pérdida de los nutrientes que contiene proceso que se reconoce como erosión química o nutricional.

Indicadores para erosión

En Colombia se han estudiado y evaluado muchos parámetros relacionados con la erosión y sus efectos. Ruppenthal (1995), Reining (1992) Leihner, Castillo y Müller-Sämann (1997) profundizaron en el conocimiento de las causas y características de la erosión pluvial, la erosividad del clima, erodabilidad del suelo, estabilidad de agregados, rata de infiltración, presencia de óxidos de hierro y aluminio, límites de plasticidad y consistencia, expansión y contracción, relieve, régimen de humedad, pendiente, uso de la tierra, labranza, coberturas, Son importantes, además de los indicadores anteriores los Indices de Erosividad, Erodabilidad y cambios en el tiempo.

LA DESERTIFICACION

La degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y sub-húmedas secas, llamada comúnmente desertificación, constituye uno de los principales problemas ambientales del último siglo.” La degradación de la tierra significa la reducción o pérdida de la productividad biológica o económica y la diversidad en áreas de cultivo, pasturas, forestales y selvas.

En aproximación hecha por Barrow (1991), se define la desertificación, como la “degeneración” de ecosistemas en regiones semiáridas o áridas, que usualmente es medida por la pérdida de la productividad primaria y/o diversidad de especies. De igual forma, Kosmas y colaboradores (1999), afirman que la desertificación es la consecuencia de un conjunto de importantes procesos activos en ambientes áridos y semiáridos, donde el agua es el principal factor limitante de la productividad en los ecosistemas.

Barrow (1991), hace mención a los términos más utilizados para hablar sobre la degradación de tierras secas. Entre estos incluye desertificación, desertización, avance del desierto, aridización, aridificación y xerotización, aclarando que los dos primeros son utilizados para indicar el cambio a condiciones más áridas, y en algunos casos indican diferencias en el grado de degradación. Establece además, que desertificación se usa para denominar la degradación inducida por el hombre y desertización para la degradación por causas naturales. Finalmente el término más utilizado a nivel mundial y divulgado por la UNCCD, es desertificación.

Posteriormente y coincidiendo con Barrow (1991), la secretaria de la Convención de las naciones unidas de lucha contra la desertificación y sequía (UNCCD, 2000a), mediante terminología definida hizo aclaración de los términos desertificación y degradación. De esta forma, la definición oficial de la UNCCD, puntualiza que por desertificación se entiende “la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y sub-húmedas secas resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas”.

Mientras, califica “la degradación de tierras”, como la reducción o la pérdida de la productividad biológica o económica de diferentes ecosistemas, ocasionada en zonas secas, por los sistemas de utilización de la tierra, por un proceso o una combinación de procesos, incluidos los resultantes de actividades humanas y pautas de poblamiento. Entre estos procesos menciona la erosión hídrica y eólica, el deterioro de las propiedades físicas, químicas, biológicas y económicas del suelo y la pérdida de la vegetación natural.

La desertificación es un proceso complejo y en su investigación se articulan diferentes disciplinas del conocimiento. Geist y Lambin (2004), mediante un análisis de casos locales de degradación de tierras secas a nivel mundial, establecieron que la desertificación es causada por una serie de variables, de las cuales son fundamentales los factores climáticos, económicos, institucionales, políticos y el crecimiento de la población; y a nivel local estos factores condicionan la expansión de la agricultura, la ganadería y la infraestructura.

Se establece su origen y patrón de comportamiento en la combinación de factores, que es específica dependiendo de la región y la escala de tiempo. Aunque la dinámica de la desertificación puede ser monitoreada y valorada mediante la combinación de observaciones satelitales e información *in situ*, las causas de la desertificación difieren ampliamente en regiones con diferentes características climáticas y condiciones socioeconómicas, lo cual impiden su identificación precisa (Collado et al., 2002; Jabbar y Chen, 2006; Runnstrom, 2003; Yang et al., 2007, Xu et al. 2010).

Las tierras áridas, semiáridas y sub-húmedas describen áreas situadas fuera de los polos y su influencia en las cuales la relación entre precipitación anual y evapotranspiración potencial cae dentro del rango de 0,05 a 0.65. Según la Agencia Alemana para la Cooperación Económica y el Desarrollo (BMZ, 1999) de los 1750 millones de hectáreas de Latinoamérica hay 543 millones de hectáreas de áreas secas y 360 millones de hectáreas potencialmente desertificables. Se estima que más de 100 países presentan este problema y aproximadamente 1000 millones de personas en el mundo se encuentran afectadas (Reynolds et al., 2007).

En Colombia el 17% del territorio, está afectado por el fenómeno de la desertificación y al menos un 15% adicional, es susceptible al mismo. La información existente muestra que un 48% de las tierras en el país, tienen algún nivel de erosión; el 74% es susceptible a la compactación y el 90% de las áreas secas tiene evidencias de salinidad (IDEAM - MAVDT, 2003); factores estos que condicionan y alertan al país acerca de su vulnerabilidad a la desertificación.

La desertificación en Colombia, se concentra en los principales polos de desarrollo. En estos sitios donde se encuentra más del 50% de los principales asentamientos humanos, se presenta sobreexplotación del recurso suelo, por causa del uso agrícola intensivo, la minería, la explotación petrolífera y el desarrollo vial (MAVDT, 2005). A nivel nacional las áreas identificadas por su alta vulnerabilidad a la desertificación son: La Región Caribe, La Región Andina (Valles interandinos de los departamentos del Tolima, Huila y Valle del Cauca, Altiplano Cundiboyacense y Nariñense, la Zona del Alto Patía y El Cañón del Chicamocha) y La Región de la Orinoquia bien drenada de los departamentos de Meta y Guaviare (IDEAM - MAVDT, 2003).

La desertificación obedece a la interacción de diversos factores entre los que se encuentran los cambios climáticos y las actividades humanas. Las interacciones complejas de factores físicos, biológicos, sociales, culturales y económicos juegan un papel considerable: Las prácticas no sostenibles en el uso de la tierra por los habitantes de dichas regiones y los patrones de asentamiento humanos conducen a procesos de desertificación.

Hoy muchas estrategias agrícolas y sistemas de cultivo no son rentables debido a los cambios económicos y políticos y a que la población crece lo que se suma a la presión que ejercen las comunidades nómadas que tratan de asentarse. Otros factores identificados como contribuyentes a la desertificación, y que previenen el uso sostenible de los recursos naturales, son la pérdida de seguridad social y tenencia legal por quienes usan la tierra, carencia de conocimientos técnicos y factores desfavorables de la economía globalizada.

Estos desarrollos han conducido al agotamiento de los suelos, al sobrepastoreo y deforestación, poniendo en peligro la productividad natural de los recursos básicos. La desertificación reduce la productividad del suelo, la producción de alimentos, elimina las coberturas vegetales se impactan negativamente otras áreas no cubiertas por esos síntomas, causando inundaciones, salinización, deterioro de la calidad del agua, y sedimentación en ríos, riachuelos y reservorios.

Entre las consecuencias de la desertificación se tienen pérdidas económicas, degradación ambiental, inestabilidad política y desigualdad social. En la actualidad, muchos estudios y métodos investigan el rol que los factores climáticos y humanos juegan en la desertificación, sin embargo esto a nivel

macro no está muy claro, debido a la falta de métodos de valoración cuantitativos consistentes y estudios multi-escala (Archer, 2004; Wang et al., 2005; Zheng et al., 2006, Xu et al. 2010).

A pesar de tratarse de un proceso biofísico, la desertificación, tiene grandes repercusiones económicas y sociales, ya que afecta la productividad y disponibilidad de alimentos, la oferta de la calidad y cantidad de agua, la diversidad biológica, la convivencia familiar y social y la posibilidad de mejorar la calidad de vida de las comunidades involucradas. En la región del Alto Patía (Colombia), se encontró que como resultado de la desertificación, 4 de cada 5 grupos familiares, se encuentran por debajo de la línea de pobreza absoluta y tienen un índice de necesidades básicas insatisfechas (NBI) por encima del 90%, lo que las obliga a emigrar de la zona rural a la urbana para engrosar los cinturones de miseria de las ciudades y centros poblados (CRC, 2009).

La Implementación de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación y Sequía (UNCCD) (Ley 461 de 1998 expedida por el Congreso de Colombia), logró que en el año 2003 se hiciera una primera aproximación al proceso de la desertificación en el territorio nacional, la cual se llevo a cabo mediante estimación de áreas con datos preexistentes a escalas generales (IDEAM - MAVDT, 2003). Ahora se hace necesario delimitar áreas a escala más detallada, generar una línea base de indicadores estandarizados, reconocidos internacionalmente que proporcionen información y faciliten el seguimiento de los procesos y la toma de decisiones a escala regional que coadyuven a disminuir el avance de la desertificación tanto a nivel regional como local.

Indicadores de desertificación

Los indicadores de desertificación representan las manifestaciones más claras de degradación de las tierras, en donde se involucran diversas disciplinas de estudio, teniendo como base la pérdida de la calidad del suelo y sus implicaciones a nivel social y económico. Al respecto Miller (1998), menciona que el desarrollo de medidas o indicadores de la calidad del suelo, pueden ser utilizadas para determinar la salud actual del suelo, valorar el grado de deterioro y predecir el umbral de las condiciones del suelo, antes de que este o el ecosistema, alcancen el límite de deterioro ecológico o económico.

La desertificación de un área ocurre, si ciertos componentes del sistema son llevados más allá de umbrales específicos, más allá de los cuales un cambio posterior es irreversible. El cambio del clima no puede llevar a un área al estado de desertificación por sí mismo, pero puede modificar los umbrales críticos, de manera que el sistema no puede mantener su equilibrio dinámico (Kosmas et al., 1999).

Los indicadores de desertificación pueden demostrar que la desertificación avanza irreversiblemente hacia suelos infértiles. Kosmas et al., (1999), consideran que los indicadores más útiles, sin embargo, son aquellos que indican el riesgo potencial de desertificación, mientras que aún haya tiempo y oportunidad para realizar acciones de rehabilitación.

En este contexto, la calidad del suelo constituye la principal preocupación de los científicos, en la degradación de tierras secas, ya que el suelo constituye el factor integrador de los componentes biológicos, químicos, físicos y de los procesos relacionados con su entorno. La desertificación generalmente, se presenta acompañada de la degradación del suelo y la vegetación, así como por erosión hídrica y eólica, pérdida de la fertilidad del suelo y de la diversidad de especies; la desertificación frecuentemente se caracteriza por el cambio en el tipo de vegetación y en la distribución porcentual de la partículas minerales del suelo, predominando generalmente fracciones gruesas (Huang, et al., 2007).

Las metodologías establecidas para monitoreo de la desertificación, se basan en la estimación de variables relacionadas con el suelo y la vegetación. En algunos estudios se ha seleccionado la dinámica de la vegetación, como un indicador para distinguir la desertificación inducida por el hombre, de la desertificación inducida por el cambio del clima, lo que se ha logrado comparando el comportamiento de la vegetación en condiciones simuladas frente a las condiciones actuales (Evans y Geerken, 2004; Geerken y Ilaiwi, 2004; Herrmann et al., 2005; Wessels et al., 2007, 2008).

Otros estudios han evaluado diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, para evaluar el proceso de desertificación en diferentes sistemas de manejo y regiones; algunos se han enfocado en la evaluación del impacto ambiental, como emisiones de CO₂, procesos de erosión y salinización como consecuencia de la alteración del funcionamiento del suelo (Pyke et al., 2002, Amezketa, 2006, Huang et al., 2007, Maestre y Puche, 2009, Zhao et al., 2009).

A nivel mundial son muchos los programas e instituciones, avalados por la UNCCD, que se han enfocado en el desarrollo de metodologías e indicadores globales y regionales para monitoreo de la desertificación. Los más destacados son: Global Environment Facility (GEF), French Scientific Committee on Desertification (CSFD), Sahara and Sahel Observatory (OSS), Land Degradation Assessment in Drylands (LADA), Land Use Change, Impacts and Dynamics (LUCID), Land use, Land use change and Forestry (LULUCF) y MEDALUS (Desertificación y Uso del Suelo en el Mediterráneo) de la Unión Europea (Randriamarina, 2009).

La metodología utilizada por el proyecto LADA (FAO, 2001), ha permitido la valoración del funcionamiento de los sistemas en tierras secas y una aproximación al monitoreo de procesos de desertificación. El componente global de LADA, provee una línea base para valoración de tendencias globales de degradación de tierras, usando un rango de indicadores colectados a partir del procesamiento de datos satelitales y bases de datos globales, que son interpretados sobre la base de un mapa global sobre sistemas de uso de la tierra. Los principales indicadores utilizados por este proyecto son: Productividad primaria neta (NPP), uso eficiente de la lluvia (RUE), índice de aridez y riesgo de erosión (Nachtergaele y Licota, 2009).

La dinámica de las metodologías establecidas a nivel mundial para evaluación y monitoreo de la desertificación, han permitido que se estipulen indicadores globales, regionales y locales que implican variables socioeconómicas y biofísicas. A nivel global, la UNCCD, ha propuesto un set mínimo de once indicadores para monitoreo de la desertificación, a partir de los cuales se deben esquematizar las metodologías de monitoreo a nivel regional y local.

Los indicadores socioeconómicos y biofísicos propuestos anteriormente se han enfocado en dos áreas de interés para la UNCCD, el aumento de áreas con manejo sostenible y la reducción de la pobreza en áreas afectadas (Nachtergaele y Licota, 2009). Estos son:

1. Disponibilidad de agua por cápita en áreas afectadas.
2. Cambio en el uso de la tierra.
3. Porcentaje de población en áreas afectadas por debajo del nivel de pobreza.
4. Desnutrición de la infancia y/o consumo de alimentos (calorías per cápita).
5. Índice de desarrollo humano.
6. Nivel de degradación de la tierra.
7. Biodiversidad de plantas y animales.
8. Aridez.
9. Estado de cobertura de la tierra.
10. Acumulación de carbono en el suelo y en superficie.
11. Tierras bajo manejo sostenible.

Desde el punto de vista de la degradación del recurso suelo, a nivel regional y local, se usan indicadores enfocados principalmente a la evaluación del grado de cambio de propiedades del suelo, coberturas, clima y relieve, que son fácilmente determinadas a nivel de campo y con la ayuda de imágenes y cartografía. Según Kosmas y colaboradores (1999), los indicadores clave se pueden dividir en cuatro amplias categorías que definen: a) la calidad del suelo (textura, fragmentos de roca, profundidad del suelo, material parental, drenaje y pendiente), b) la calidad del clima (lluvia, índice de aridez, aspecto), c) la calidad de la vegetación (riesgo al fuego, protección a la erosión, resistencia a la sequía, cobertura) y d) la calidad del manejo y factores humanos (tipo de uso de la tierra, uso intensivo del suelo y políticas). La calidad del suelo es un factor determinante para la evaluación y monitoreo de la desertificación. La disminución de la calidad del suelo tiene un fuerte impacto adverso sobre las funciones ecológicas y ambientales de los suelos que mantienen la calidad del agua y aumentan la calidad del aire. La degradación del suelo influye en el balance de agua, la producción de biomasa, la cobertura vegetal y el microclima. La degradación del suelo lleva a la desertificación (Lal, 1998). Al respecto agrega, la restauración y mantenimiento de una alta calidad del suelo es la principal estrategia para lograr el progreso económico y el mejoramiento de la calidad ambiental. Debido a que las limitantes del suelo en zonas semihúmedas y semiáridas son diferentes de las de zonas húmedas, el mismo autor presenta un listado de indicadores relevantes para la evaluación de la calidad y sostenibilidad en estas zonas que se presenta en la **Tabla 1**.

PROCESOS DE SALINIZACION

Según García (en prensa) la salinidad, en algunas de sus manifestaciones ha sido la causa, en mayor o menor grado, de la reducción de la capacidad productiva de los suelos en muchas regiones del mundo, y aun del ocaso de muchas civilizaciones. Estudios de las Naciones Unidas indican que debido a la salinización existe hoy 1.5 veces más tierra improductiva que la que se encuentra bajo riego.

La salinidad es común en las regiones áridas y semiáridas en donde la evapotranspiración excede a la precipitación y es necesario recurrir al riego para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos. Cuando las sales solubles se concentran en el perfil del suelo, y exceden ciertos límites, se producen condiciones que afectan el crecimiento normal de las plantas; sus efectos son diversos y la intensidad de ellos depende de la cantidad y tipo de sales predominantes, de factores del suelo, del clima, del régimen de lavado y del drenaje.

Aunque las áreas afectadas por la salinización originada en la actividad humana están localizadas predominantemente en las regiones áridas y semiáridas, se las encuentra afectando vastas zonas de valles, tierras bajas, pie de monte y en áreas costeras pero también en tierras altas como en la Sabana de Bogotá en Colombia a 2.600 m de altitud, en las zonas florícolas de Ecuador, en las montañas Rocosas en los Estados Unidos a alturas variables, o a más de 5.000 m en el Tibet.

En América Latina la salinidad ha vuelto improductivas extensas regiones y amenaza muchas más. En Colombia, se estima que un 3% del total del área cultivable -3.360.000 has- tiene problemas de sales, con el agravante de que gran parte de ellas están localizadas en zonas de alto potencial para desarrollo de programas de producción intensivos con productos de alto precio en el mercado mundial, como en el caso de la Costa Atlántica en donde se encuentran más de 2.500.000 has con afecciones de diverso tipo y magnitud, o de las áreas con agricultura intensiva y tecnificada en los valles interandinos de los ríos Cauca y Magdalena, de la Sabana de Bogotá, especialmente en pasturas y cultivos de invernadero, y en Boyacá y los Llanos Orientales como resultado de las explotaciones petroleras. En Ecuador se diferencian varios tipos de problemas en las regiones con suelos de origen aluvial, como en los valles de los ríos Daule y Guayas, en las regiones próximas al Golfo de Guayaquil, en la Península de Santa Elena con efectos de salinidad, sodicidad, alta saturación de magnesio intercambiable y suelos sulfato

ácidos. En la sierras como en La Tacunga en cultivos bajo invernadero en donde se produce acumulación de sales a niveles elevados y es frecuente la toxicidad de boro como consecuencia del riego con aguas que lo contienen en exceso. En la zona de Cayambe, en Andosoles, se producen acumulaciones de sales debido al tipo y cantidad de fertilizantes usados.

Tabla 1. Indicadores de calidad y sostenibilidad para zonas semihúmedas y semiáridas. Lal,(1994).

PROCESOS	PARAMETROS	INDICADORES
SUELOS	Compactación y grado de dureza.	Resistencia de la corteza. Densidad aparente. Resistencia a la penetración. Porosidad y distribución de poros por tamaño. Infiltración. Grietas.
	Erosión del Suelo	Erosión eólica e hídrica. Cárcavas. Erodabilidad. Relación erosión – productividad. Resistencia a la pérdida de suelo.
	Estructura del suelo	Agregación y estabilidad de agregados. Distribución de poros.
	Estrés por sequía	Capacidad de almacenamiento de agua. Agua disponible. Profundidad de enraizamiento. Déficit de agua. Probabilidad de sequia estacional.
	Fertilidad del suelo	Carbono Orgánico. Disponibilidad de macro y micro nutrientes.
	Fauna del suelo	Actividad y diversidad de termitas.
	Salinización	Conductividad eléctrica. RAS. Sales totales.
	Distribución y tamaño de partículas	Pedregosidad. Textura.
AGUA	Balance hídrico	Déficit hídrico. Balance hídrico semanal.
	Calidad	Concentración y naturaleza de sales solubles en aguas subterráneas y superficiales. Sedimentos. Eutrofización.
CLIMA	Lluvias	Régimen de lluvias. Ciclos vegetativos.
	Contenido energético	Temperatura edáfica y ambiental. Evaporación.

	Vientos	Velocidad y dirección del viento, Tormentas de arena.
--	---------	--

Todas las formas de salinidad reducen la productividad de los suelos y afectan a la gran mayoría de las especies agrícolas de importancia económica para la producción de alimentos, combustibles o fibras. Esto vuelve muy necesario considerar el uso de prácticas económicas que hagan posible un manejo sostenible; para ello es necesario tener en cuenta aspectos tales como la respuesta o la capacidad de adaptación de los cultivos a la salinidad y el uso de enmiendas de bajo costo y fácil consecución tales como residuos o subproductos industriales o agrarios. Antes de iniciar los procesos de recuperación es indispensable y prioritario realizar una caracterización adecuada del problema de sales, y es de fundamental importancia la evaluación de la calidad del agua para riego con una predicción acertada del efecto posible que su uso y manejo puedan causar en el cultivo y en el suelo.

Es necesario precisar que en América Latina no se da a la salinización y problemas relacionados la trascendencia que realmente tienen. Es un hecho desafortunado del el Laboratorio de Salinidad del USDA, centro de referencia mundial en cuanto a sales en suelos y aguas y a su manejo se refiere, tardara tanto en actualizar el tradicional Manual 60 “*Diagnosis and improvement of Saline and Alkali Soils*” publicado en febrero de 1954, traducido y publicado por el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas de México en 1962. Esta circunstancia parece haber contribuido de manera decisiva a sembrar y fortalecer la idea de que en estos temas todo es conocido y las soluciones para todos los casos están dadas.

El proceso de salinización es controlada por un conjunto de factores relacionados con las condiciones ambientales (clima, hidrología), abastecimiento de agua y sistemas de control (riego, drenaje), y las prácticas de cultivo (tipo y la densidad de la cubierta vegetal y las características de enraizamiento). Estos factores afectan el equilibrio del suelo-agua y por lo tanto el movimiento y la acumulación de sales en el suelo.

En general, la salinización se desarrolla en lugares donde se favorece la presencia de sales solubles, los niveles freáticos altos, existe una alta tasa de evaporación y la precipitación anual es baja. Los modos en que estos factores se combinan varían de acuerdo con si la tierra es de riego o no, pero en cualquier caso la presencia de sales en el suelo hace que menos agua esté disponible para absorción por raíces de las plantas.

Indicadores de salinización

Hay muchos factores comunes entre la desertificación y la salinización por lo que conceptualmente se pueden usar muchos de los indicadores señalados antes en el caso de la desertificación y para la evaluación de sus efectos sobre la calidad de los suelos, sin embargo es importante considerar:

- a) El análisis del estado actual y potencial del proceso debido a las condiciones físicas y al impacto ecológico sobre los servicios ecosistémicos.

En este diagnóstico se debe realizar un análisis biofísico y sus rasgos: espaciales, geográficos, causas (clima, geomorfología, geología, cobertura, etc.), relacionar los aspectos biofísicos con las características edafológicas (físicas, químicas, biológicas) y hacer una evaluación del proceso de salinización con relación a las funciones y servicios ecosistémicos.

- b) Análisis de las causas que han dado lugar al proceso, su magnitud, los efectos ocasionados y los impactos de tipo social, económico y ambiental. Mediante el análisis de las principales variables socioeconómicas relacionadas con el proceso, de las causas, presiones y efectos que generan el proceso y evaluando los Impactos ambientales producidos (ecológicos,

sociales, culturales y económicos)

c) Análisis de indicadores de presión y estado actual del proceso.

La valoración inicial del proceso de degradación de las tierras por los procesos de salinización se debe medir por medio de indicadores que permitan establecer relaciones temporales y espaciales. Se deben seleccionar indicadores de presión y estado y formular sistemas de interpretación.

La estructura *fuerzas motrices-presión-estado-impacto-respuesta (FPEIR)* permite unir información y entender factores de presión sobre el ambiente como resultado de las actividades humanas con cambios en el estado -condición- del ambiente -tierra, aire, agua y vegetación. La FAO (2001) ha preparado ejemplos para la selección y aplicación de la estructura FPEIR para el programa de indicadores de Calidad de la Tierra (ICT).

Según la FAO (2001), se deben considerar:

1. El desarrollo de un conjunto de indicadores estandarizados para el manejo de la degradación de suelos por erosión, salinización y desertificación
2. Identificar fuentes de datos y desarrollar métodos estandarizados para análisis, agregación y aplicación de los resultados y
3. Validar y diseminar los hallazgos entre las principales instituciones responsables de la recolección de datos sobre los indicadores e identificar la capacidad institucional necesaria para establecer y ejecutar las prioridades de la tierra y los recursos naturales, las políticas y las tecnologías a nivel local, regional, nacional y global.

Para el establecimiento de los indicadores es importante tener en consideración los principios anotados por el IDB (Plan de Operaciones, 2002), ellos propusieron un conjunto de seis criterios:

- Relevancia: son valores numéricos de indicadores que representan el grado de medición directamente.
- Claridad: ambigüedad y arbitrariedad deberán ser excluidas de la medición con un indicador.
- Costo: el costo de la evaluación por indicador deberá ser relativamente bajo.
- Continuidad: deberá acompañarse la disponibilidad de información coherente, ambos de alcance histórico y regional.
- Comprensión: la definición/expresión de un indicador debe ser de comprensión sencilla e intuitivo por parte de los usuarios.
- Beneficio social: deberá ser maximizado el beneficio neto social que un indicador rinde, conforme su aplicación.

d) Identificación y elaboración de indicadores de presión, estado (Fuerzas motrices-Presión).

Los indicadores deben proporcionar información sobre el cambio de uso de la tierra, formas de tenencia, prácticas de manejo como intensidad de labranza, ausencia de medidas de conservación, distribución de la tierra, áreas en conflicto, tecnología utilizada, etc. También se deben considerar aspectos poblacionales como población urbana y rural, número de habitantes, de familias, patrón de distribución espacial de población, grupos predominantes, grupos en minoría, NBI entre otras. Finalmente se debe tener en cuenta los aspectos relacionados con ingresos y empleo, población económicamente activa, población en edad de trabajo y la información institucional y de

participación ciudadana (DNP, 1997).

Como indicadores de Estado se pueden considerar aquellos que expresen cambios en la productividad biológica (real y potencial) y los impactos de la degradación de los suelos. Los cambios en el estado pueden ser negativos con un manejo pobre y positivo con un buen manejo.

En la evaluación de la degradación por salinidad se deben usar indicadores físicos, químicos y biológicos que permitan medir la magnitud del proceso. Se pueden usar la presencia y abundancia de costras salinas, afloramientos de cristales de las sales y la apariencia de las plantas de cultivo, malezas predominantes, coloración, tamaño y presencia de planta indicadoras. Estos están relacionados con el cambio en la cobertura y uso de la tierra, cambios en las especies vegetales, datos climáticos entre otros.

Esto permite entender el qué, cómo y por qué está sucediendo la degradación. Así, por ejemplo, en el caso del distrito de riego RUT, localizado en el valle del Cauca, Colombia, la salinización progresiva se le atribuye el uso de las aguas de riego, los sistemas de fertilización y el intemperismo de las rocas aledañas a la zona plana. Pero el factor determinante del proceso es la falta de conocimiento en el manejo del agua para riego según su calidad el cual no se tuvo en cuenta desde el establecimiento del Distrito (Rodríguez, Delgado y García, 1996).

La estructura FPEIR se usa en informes sobre el estado ambiental y en revisiones de gestión ambiental regional y nacional. También, para ayudar a identificar los indicadores clave que describan más adecuadamente la forma en que los agricultores usan las tierras y medir los impactos de los distintos tipos de manejo

e) Seguimiento a los cambios en los procesos

Las formas convencionales de hacer el seguimiento de los cambios en la salinidad del suelo se basan en la observación de campo y análisis de laboratorio de los cultivos y los suelos. Los indicadores usuales incluyen: (a) presencia de malezas tolerantes a la sal; (b) patrones irregulares de crecimiento de los cultivos c) aspecto y vigor de la planta y el rendimiento, (c) la presencia de calvas salinas con y sin costras blancas y eflorescencias y presencia de materiales húmicos dispersos. d) los resultados analíticos que deben incluir la determinación de pH, la conductividad eléctrica (CE), iones en solución (cationes y aniones) e) el cálculo del porcentaje de saturación de sodio intercambiable (PSI), la relación de adsorción de sodio (RAS, el porcentaje de saturación de magnesio intercambiable (PMgI) y la relación de adsorción de magnesio (RAMg).

También es preciso contar con análisis de la calidad de agua para riego. Para la obtención de estos indicadores se debe hacer énfasis en el uso de análisis de suelos completo (intercambiables y solubles) realizados usando metodologías analíticas apropiadas para suelos alcalinos y/o calcáreos.

f) Modelación y simulación de los procesos de salinización.

La modelación y simulación permiten hacer seguimiento y realizar pronósticos sobre los cambios y efectos que se pueden presentar hacia el futuro. Por tanto su uso es indispensable en la planeación de procesos de prevención y/o recuperación.

Tabla 2. Datos a recolectar en campo y en laboratorio para evaluación de propiedades físicas, químicas y biológicas.

Determinaciones	Metodología	Cálculos a Realizar	
Propiedades físicas			
Densidad aparente (g cm ⁻³)	Método cilindro de volumen conocido (Forsythe, 1980).	$\delta a = \left(\frac{Pss (g)}{Vc (cm^3)} \right)$	<p>δa: Densidad aparente. Pss: Peso de suelo seco a 105°C. Vc: Volumen del cilindro</p>
Densidad real (g cm ⁻³)	Método del Picnómetro (Malagón y Montenegro, 1990).	$\delta r = \left(\frac{Pss (g)}{Vs (cm^3)} \right)$	<p>δr: Densidad real (sólidos). Pss: Peso de suelo seco a 105°C. Vs: Volumen de sólidos.</p>
Humedad gravimétrica (%)	Relación entre la masa de agua y la masa seca de los sólidos del suelo (Malagón y Montenegro, 1990).	$\theta w (\%) = \left[\left(\frac{Pw (g)}{Pss (g)} \right) * 100 \right]$	<p>θw: Humedad gravimétrica. Pw: Peso del Agua (Peso suelo húmedo - Peso del suelo seco a 105°C). Pss: Peso de suelo seco a 105°C.</p>
Humedad Volumétrica (%)	Relación entre el volumen de agua y el volumen total del suelo (Malagón y Montenegro, 1990).	$\theta v (\%) = \left[\left(\frac{\theta w (\%) * \delta a (g/cm^3)}{\delta w (g/cm^3)} \right) * 100 \right]$	<p>θv: Humedad Volumétrica. θw: Humedad gravimétrica. δa: Densidad aparente. δw: Densidad del agua.</p>
Distribución de agregados estables al agua. Diámetro medio Ponderado (DMP)	Metodo de Yoder (1936; modificado). Tamices 6, 4, 2, 1, 0.125 mm	$DMP = \left(\frac{\sum_{i=1}^n Mssi (\%) * Xi (mm)}{100} \right)$	<p>DMP: Diámetro medio ponderado. Mssi: Agregados del suelo retenidos en cada tamiz. Xi: Promedio del diámetro de abertura del tamiz.</p>
Análisis granulométrico. Textura	Método de la Pipeta (ICA, 1993).		
Curvas de Retención de humedad	Cilindros sometidos a presión 75 cm en Mesa de Tensión y 0.3, 1 y 15 bares en ollas y platos de presión (Malagón y Montenegro, 1990).	<p>θv (75 atm, 0.3, 1 y 15 bares):</p> $\theta v (\%) = \left[\left(\frac{\theta w (\%) * \delta a (g/cm^3)}{\delta w (g/cm^3)} \right) * 100 \right]$	<p>θv: Humedad Volumétrica. θw: Humedad gravimétrica. δa: Densidad aparente. δw: Densidad del agua.</p>
Resistencia vertical a la penetración (RV) (Kgf cm ⁻²).	Método penetrómetro de cono (Lozano, et. al, 2004).		
Resistencia de costras a la penetración (Kgf cm ⁻²).	Método penetrómetro especial para costras. DIK 5560 (Gálvis, 2005).		
Porosidad total y distribución de poros (%).	Cilindros sometidos a 75 cm de presión en mesa de tensión y 0.3, 1 y 15 bares en ollas y platos de presión (Malagón y Montenegro, 1990).	<p>$PT (\%) = 1 - \left(\frac{\delta a}{\delta r} \right) * 100$</p> <p>$Ma (\%) = [PT - \theta v 7.5 Kpa]$</p> <p>$Me (\%) = [\theta v 7.5 Kpa - \theta v 1500 Kpa]$</p> <p>$Mi (\%) = [\theta v 1500 Kpa]$</p>	<p>PT: Porosidad total. δa: Densidad aparente. δr: Densidad real. Ma: Macroporos. θv: Humedad Volumétrica. Me: Mesoporos. Mi: Microporos.</p>

Determinaciones	Metodología	Cálculos a Realizar	
Conductividad hidráulica saturada (cm h ⁻¹)	Método Permeámetro de Cabeza constante (Forsythe, 1980).	$K_s = \left(\frac{V (cm^3)}{t (min) A (cm^2)} * \frac{L (cm)}{H (cm)} \right)$	Ks: Conductividad hidráulica saturada (cm h ⁻¹). V: Volumen total de agua que paso por el cilindro. t: Tiempo total empleado. A: Area transversal interna del cilindro. L: Longitud de la columna de suelo. H: Longitud de la columna de agua.
Pérdida del suelo por erosión (Ton ha ⁻¹)	Minisimulador de Lluvia (Cobo, 1998; Campo, 2004, Rivera, 2008). Cuantificación de suelo perdido (g), recolectado en agua de escorrentía, cada cinco minutos durante media hora.	$A = R * K * LS$	A: Pérdida del suelo (Ton . ha ⁻¹ . año ⁻¹). R: Factor erosividad de las lluvias (EI30) (MJ. mm. ha ⁻¹ . año ⁻¹). K: Factor erosionabilidad o erodabilidad del suelo (Ton . ha ⁻¹ . año ⁻¹ . MJ ⁻¹ . mm ⁻¹ . ha ⁻¹ . año ⁻¹). LS: Factor longitud y pendiente del terreno.
Propiedades Químicas			
pH	Potenciómetro. Relación 2:1 (ICA, 1993).		
Aluminio intercambiable (cmol kg ⁻¹ suelo)	KCl 1N. (ICA, 1993).	$Al^{+++int} = \left(\frac{mL HCl * N_{HCl} * 25 * 100}{PM * 10} \right)$	Al ^{+++int} : Aluminio intercambiable. mL: mililitros. HCl: Acido Clorhídrico. N: Normalidad. PM: Peso de la muestra. 100: Referencia a la unidad de masa.
Capacidad de intercambio catiónico (cmol kg ⁻¹ suelo).	Método del NH ₄ OAc 1M. pH 7 (ICA, 1993).	$CIC = \left(\frac{mL NaOH * N_{NaOH} * 100}{PM} \right)$	CIC: Capacidad de intercambio cat ónico. mL: mililitros. NaOH: Hidróxido de Sodio. N: Normalidad. PM: Peso de la muestra. 100: Referencia a la unidad de masa.
Fosforo asimilable (mg kg ⁻¹ suelo).	Bray II (pH < 7); Olsen (pH >7) (ICA, 1993).	$P_{Bray II} = Lc * \frac{mL SE}{PM} * 10$ $P_{Olsen} = Lc * \frac{mL SE}{PM}$	P: Fosforo. Lc: Lectura en la curva. mL: mililitros. S.E: Solución extractora. N: Normalidad.
Conductividad eléctrica.	Extracto de saturación. Medición con conductivímetro (IGAC, 1990).		

Continuación Tabla 2.

Determinaciones	Metodología	Cálculos a Realizar	
<p>Contenido de Calcio, Sodio, Potasio y Magnesio: Intercambiables + Solubles. (cmol kg⁻¹ suelo). Contenido de carbonatos.</p>	<p>Determinación con solución extractora: Acetato de Amonio 1M, pH 7, si alcalinos o calcáreo bufferar a pH 8.5. Solubles extracción en agua (ICA, 1993). Lectura por espectrometría de absorción atómica (McKean, 1993).</p>	$E_{(Ca,Mg,Na,K)} = Lc * Vf * \frac{L}{1000} * \frac{Ve}{Va} * \frac{100}{PM} * \frac{1}{pe}$	<p>E: Cantidad del elemento determinado (Calcio, magnesio, sodio, potasio). Lc: Lectura en la curva. Vf: Volumen final (ml). Ve: Volumen del extractante agregado (ml). Va: Alicuota tomada (ml). PM: Peso de la muestra. Pe: Peso de un cmol del elemento expresado en mg.</p>
<p>Contenido de Carbono Total (g kg⁻¹ de suelo).</p>	<p>Oxidación húmeda (Walkley and Black) (ICA, 1993).</p>	$C = \left(\frac{(B - M) * N_{Sol, ferr.} * Pe * FEO * 100}{PM} \right)$ $MO (\%) = \left(\frac{L * FCC * FEO * 100}{PM} \right)$	<p>C: Carbono Orgánico. B: Lectura en blanco. M: Lectura de las muestras. N: normalidad solución ferrosa. Pe: Peso en gramos de un cmol de C. FEO: Factor de eficiencia de oxidación del C. PM: Peso de la muestra. MO: Materia orgánica. L: Lectura en la curva (C - g). FCC: Factor de conversión del carbono a materia orgánica.</p>
Propiedades Biológicas			
<p>Biomasa Microbiana - C (µg C g⁻¹ suelo)</p>	<p>Metodo Fumigación - extracción. (Vance, 1987).</p>	$Bm = \left(\frac{(B - L) * N * 0.0033 * V_1 * 10^6}{(P * V_2)} \right)$ $Bms = \left(\frac{\mu g C f - \mu g C nf}{0.33} \right)$	<p>Bm: Biomasa microbiana (µg C g⁻¹ suelo). C: Carbono. B: Lectura en blanco. L: Lectura de las muestras. N: Normalidad del sulfato ferroso amoniacal. V₁: Volumen del extracto (ml). V₂: Volumen titulado del extracto (ml). P: Peso seco de la muestra. µg C f: microgramos de Carbono de suelo fumigado. µg C nf: microgramos de Carbono de suelo no fumigado.</p>
<p>Actividad Microbial. Estimación de CO₂. (µg C g⁻¹ de suelo).</p>	<p>Método Incubación (Anderson, 1982).</p>	$Am - C - CO_2 = \left(\frac{(VB - VL) * N * Ac * FD}{(P)} \right) * 10^6$	<p>Am_C-CO₂: Actividad microbial. Carbono (µg C g⁻¹ de suelo). VB : Volumen de HCl para titulación en blanco (ml). VT : Volumen de HCl para titulación de muestra (ml). N Ac: Normalidad del ácido. P : Peso seco del suelo. FD : Factor de dilución (0.006).</p>

BIBLIOGRAFIA

- AMEZKETA E. 2006. An integrated methodology for assessing soil salinization, A pre-condition for land desertification. *Journal of Arid Environments*. 67: 594–606
- ANDERSON, J. 1982. Soil Respiration. In : *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. Agronomy monograph No 9. 2nd Edition. USA. p 831-857.
- APARICIO, V., COSTA, J.L., 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean pampas. *Soil Tillage Res.* 96, 155–165.
- ARCHER, E.R.M., 2004. Beyond the “climate versus grazing” impasse: using remote sensing to investigate the effects of grazing system choice on vegetation cover in the eastern Karoo. *Journal of Arid Environments* 57, 381–408.
- BARROW, C., J. 1991. *Land Degradation: development and breakdown of terrestrial environments*. Cambridge University Press. Great Britain. 295p.
- CÉCILLON, L., CASSAGNE, N., CZARNES, S., GROS, R., VENNETIER, M., BRUN, J., 2009. Predicting soil quality indices with near infrared analysis in a wildfire chronosequence. *Science Of The Total Environment* 407: 1200 – 1205.
- COLLADO, A.D., CHUVIECO, E., CAMARASA, A., 2002. Satellite remote sensing analysis to monitor desertification processes in the crop–rangeland boundary of Argentina. *Journal of Arid Environments* 52, 121–133.
- Cordeiro, G.G., Barreto, A.N. y Carvajal Garri, A.C.R.C. 1988. Levantamento das condições de salinidade e sodicidade de projeto de irrigação de Sao Gonçalo (2a. parte. Petrolina PE: EMBRAPA-CPATSA. Documento 54. 57 p.
- Cordeiro, G.G., and Lima Filho, J.M.P. 1995. Management of salt affected soils of the Middle San Francisco River Valley. *Proceedings of the international workshop on integrated soil management for sustainable use of salt affected soils*. Manila, Philippines. Nov. 6-10/95. pp 87-94.
- CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA (CRC). . 2009. Informe Técnico Final. Proyecto Acciones de mejoramiento socioambiental en áreas afectadas por los procesos de desertificación y sequía en el departamento del Cauca – Colombia. Popayán.
- DORAN, J.W. y JONES, A.J. (Eds.). 1996. *Methods for Assessing Soil Quality*. Soil Science Society of America Special Publication, vol. 49. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- DORAN, J. W. y PARKIN, T. B. 1994. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. and COLEMAN. *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA spec Publ 35. SSSA and ASA. Madison. WI. USA. pp 3-21.
- DUMANSKI, J., PIERI, C., 2000. Land quality indicators: research plan. *Agric. Ecosyst. Environ.* 81, 93–102.
- EVANS, J., GEERKEN, R., 2004. Discriminating between climate and human-induced dryland degradation. *Journal of Arid Environments* 57, 535–554.
- FAO. 2001. *Indicadores de la calidad de la tierra y su uso para agricultura sostenible*.

- GARCIA, A. 2010. Diagnóstico, Manejo y Recuperación de Suelos Salinos. (En prensa)
- GEERKEN, R., ILAIWI, M., 2004. Assessment of rangeland degradation and development of a strategy for rehabilitation. *Remote Sensing of Environment* 90, 490–504.
- GEIST, H. y LAMBIN, F. 2004. Dynamic Causal Patterns of Desertification. *BioScience*. Vol. 54 No. 9. Pgs. 817- 829.
- GERMAN FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (BMZ).
Combating Desertification: experience of German Development Cooperation. 44p.
- GOMEZ, E. 199. Procesos erosivos: Estrategias para su caracterización e implementación de sus prácticas básicas de control y prevención. Universidad nacional de Colombia Sede Medellín. ICNE. 154p.
- HERRMANN, S.M., ANYAMBA, A., TUCKER, C.J., 2005. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environment Change* 15, 394–404.
- HUANG, D., WANG, K., WU, W.L. 2007. Dynamics of soil physical and chemical properties and vegetation succession characteristics during grassland desertification under sheep grazing in an agro-pastoral transition zone in Northern China. *Journal of Arid Environments* 70 120–136.
- IDB. 2002. Program to Combat Desertification in South America, Document of the Inter-American Development Bank-IDB, Agreement ATN/JF-7905-RG.
- INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM) y MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL - MAVDT. 2003. Elementos de diagnóstico y recomendaciones de acción para ser incluidos en el PAN de Colombia. Fase I. Bogotá D.C., Colombia.
- JABBAR, M.T., CHEN, X.L., 2006. Land degradation assessment with the aid of geoinformation techniques. *Earth Surface Processes and Landforms* 31, 777–784.
- KOSMAS, C. , KIRKBY, M., y GEESON, N. 1999. The Medalus project – Mediterranean desertification and land use. Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities – V, 87p.
- LAL, R. 1994. Métodos y normas para evaluar el uso sostenible de los recursos suelo y agua en el trópico. USDA. SMSS Monografía técnica No 21. Departamento de Agronomía. Ohio State University. Columbus, Ohio. Trad. 96p.
- LEIHNER, D.E., M RUPPENTHAL, J.A. CASTILLO y K . MÜELLER-SÄMANN. 1997. Conservación de suelos y aguas en la Zona Andina: Hacia el desarrollo de un concepto integral.. *Publicación Ciat* 309., p: 30-41
- MAESTRE, F. y PUCHE, M. 2009. Indices based on surface indicators predict soil functioning in Mediterranean semi-arid steppes. *Applied Soil Ecology* 41: 342–350.

MAUSBACH, M. y SEYBOLD, C. 1998. Assessment of soil quality. En: LAL, R. Soil quality and agricultural sustainability. P 33. Chelsea, Michigan. Ann Arbor Press.

MILLER, F. 1998. Soil – Land degradation: Interventions for sustaining civilization. En: LAL, R. Soil quality and agricultural sustainability. P 13. Chelsea, Michigan. Ann Arbor Press.

MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL - MAVDT. 2005. Plan de Acción Nacional. Lucha contra la desertificación y la sequía en Colombia. Bogotá. Colombia. UNCCD, PNUD.137p.

NACHTERGAELE, F. y LICONA, C., 2009. The Land Degradation Assessment in Drylands (LADA) Project: Reflections on Indicators for Land Degradation assessment. In: The Future of Drylands, C. Lee & T. Schaaf (Eds.), Springer Neherlands: 27-348.
<http://www.springerlink.com/content/h666115wwlp57371>

OECD. 1993. *Renewable Natural Resources. Economic Incentives for Improved Management*. OECD, Paris. 157 p.

PYKE D, HERRICK J, SHAVER P., PELLANT, M. 2002. Rangeland health attributes and indicators for qualitative assessment. *Journal of Range Management* 55: 584-597.

RANDRIAMIARINA, D. 2009. Synthetic report regional consultations on methodologies related to the minimum set of impact indicators to measure progress in the implementation of strategic objectives 1, 2 and 3 of the UNCCD 10-year strategic plan. Consultancy report. UNCCD. Bonn. 24 p.

REINING, L. 1992. Erosion in Andean Hillside Farming. Hohenheim Tropical. Agricultural Series 1. 219p.

REYNOLDS, J.F., STAFFORD SMITH, D.M., LAMBIN, E.F., TURNER RII, B.L., MORTIMORE, M., BATTERBURY, S.P.J., DOWNING, T.E., DOWLATABADI, H., FERNANDEZ, R.J., HERRICK, .E., HUBER-SANNVALD, E., LEEMANS, R., LYNAM, T., MAESTRE, F.T., AYARZA, M., WALKER, B., 2007. Global desertification: building a science for dryland development. *Science* 316, 847–851.

RUNNSTROM, M.C., 2003. Rangeland development of the Mu Us sandy land in semiarid China: an analysis using Landsat and NOAA remote sensing data. *Land Degradation & Development* 14, 189–202.

RUPPENTHAL, M. 1995. Soil conservation in the Andean cropping systems: Soil erosion and crop productivity in traditional and forage-legume based cassava cropping systems in the South Colombian Andes . Hohenheim Tropical. Agricultural Series 3. 110 p.

SECRETARIA PARA LA CONVENCION DE LAS NACIONES UNIDAS DE LUCHA CONTRA LA DESERTIFICACION - UNCCD. 2000a. Convención de las naciones unidas de lucha contra la desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular en África. Bonn - Alemania. 71 p.

UNITES STATE DEPARTAMENT OF AGRICULTURE (USDA). 1998. Soil quality institute and national soil survey center. Soil quality information.

WANG, X., CHEN, H.F., DONG, Z., XIA, D. 2005. Evolution of the southern Mu Us desert in north China over the past 50 years: an analysis using proxies of human activity and climate parameters. *Land Degradation & Development* 16, 351–366.

WESSELS, K.J., PRINCE, S.D., MALHERBE, J., SMALL, J., FROST, P.E., VANZYL, D., 2007. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa. *Journal of Arid Environments* 68, 271–297.

WESSELS, K.J., PRINCE, S.D., RESHEF, I., 2008. Mapping land degradation by comparison of vegetation production to spatially derived estimates of potential production. *Journal of Arid Environments* 72 (10), 1940–1949.

XU, D., KANG, X., ZHUANG, D., PAN, J. 2010. Multi-scale quantitative assessment of the relative roles of climate change and human activities in desertification – A case study of the Ordos Plateau, China. *Journal of Arid Environments* 74: 498–507.

YANG, X., DING, Z., FAN, X., ZHOU, Z., MA, N., 2007. Processes and mechanism of desertification in northern China during the last 30 years, with a special reference to the Hunshadake Sandy Land, eastern Inner Mongolia. *Catena* 71, 2–12.

ZHAO, H., HUI, Y., LIAN, R., ZHONG, Y., QIANG, Y., DRAKE, S. 2009. Effects of desertification on soil organic C and N content in sandy farmland and grassland of Inner Mongolia. *Catena* 77: 187–191

ZHENG, Y.R., XIE, Z.X., ROBERT, C., JIANG, L.H., SHIMIZU, H., 2006. Did climate drive ecosystem change and induce desertification in Otindag sandy land, China over the past 40 years? *Journal of Arid Environments* 64, 523–541.

ZORNOZA, R., MATAIX-SOLERA, J. GUERRERO, C., ARCENEGUI, V., MAYORAL, A.M., MORALES, J., MATAIX-BENEYTO, J. 2007. Soil properties under natural forest in the Alicante Province of Spain. *Geoderma* 142: 334–341.