



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN
EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO
EDAFOLOGIA**

**SISTEMA DE APOYO A LAS DECISIONES GEOGRAFICAS
CON UN ENFOQUE DE CONSERVACION DE SUELOS**

GUSTAVO A. AREVALO GALARZA

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2011

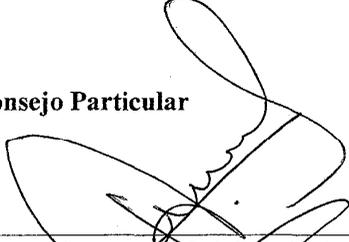
La presente tesis titulada “Sistema de Apoyo a las Decisiones Geográficas con un Enfoque de Conservación de Suelos”, realizada por Gustavo A. Arevalo Galarza, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

EDAFOLOGIA

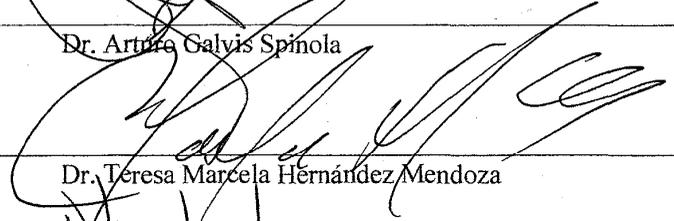
Consejo Particular

CONSEJERO



Dr. Arturo Galvis Spinola

ASESORA



Dr. Teresa Marcela Hernández Mendoza

ASESOR



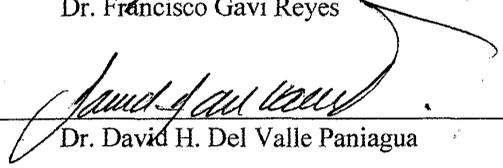
Dr. Victor Hugo Volke Haller

ASESOR



Dr. Francisco Gavi Reyes

ASESOR



Dr. David H. Del Valle Paniagua

Montecillo, Texcoco Estado de México, 12 de Agosto 2011

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por su apoyo incondicional a la juventud mexicana que apuesta y confía en el desarrollo científico de nuestro país. Gracias por su apoyo.

A la **Universidad Autónoma de Chapingo** que mantiene abiertas las puertas de la superación, para aquellos que quieren entrar, y por su apoyo siempre constante a pesar de los embates de los tiempos.

Al **Colegio de Postgraduados** por ofrecerme esta oportunidad de culminar mis estudios, y por la apertura al conocimiento. Particularmente al Postgrado de **Edafología**, donde tengo buenos amigos.

Al Dr. Arturo Galvis Spinola, por su paciencia y constante interés en mi superación, y por su apoyo siempre constante y gran disponibilidad para edificar una buena amistad. Al amigo que sabe serlo.

A la Dra. Teresa Hernández Mendoza por su apoyo siempre constante y gran entusiasmo y vocación en la vida académica; Al Dr. Víctor Volke por su interés y valiosas observaciones a este trabajo; Al Dr. David del Valle Paniagua, por su apoyo constante y gran apertura académica que acrecentó mi interés en la Inteligencia Artificial; Al Dr. Víctor Manuel Cetina por su apoyo y generosidad.

Al PhD. Francisco Gavi Reyes por su apoyo constante y amistad que perdura desde los tiempos en que el calor abrazador del desierto duranguense daba la bienvenida a los primeros estudiantes “áridos”.

Al PhD. Lenom Cajuste Bontemps, por su apoyo incondicional y disponibilidad para edificar una buena amistad. Gracias

Al PhD. Enrique Ojeda Trejo, por su amistad e interés en forjar mi aprendizaje, y señalarme los rumbos. Gracias

Al M.C. Angel Leyva Ovalle, por su amistad y apoyo incondicional en momentos cruciales

CONTENIDO

Índice de Cuadros	v
Índice de Figuras.....	vii
Índice de Fotografías	viii
Resumen	ix
Summary	x
1. Introducción	1
2. Objetivos.....	5
2.1 General.....	5
2.2 Particulares.....	5
3. Revisión de Literatura	6
3.1 Conceptos sobre la erosión	6
3.2 Causas de la degradación de los suelos	8
3.3 Que pasa en México con la Degradación de Suelos	9
3.4 Como enfrentan el problema las instituciones.....	10
3.5 Percepción de la erosión	14
3.6 Procesos de la erosión hídrica	15
3.7 Métodos para evaluar el Riesgo a la Erosión.....	17
3.7.1 Modelos predictivos matemáticos	17
3.7.2 Modelos de erosión basados en conocimiento de expertos	23
3.7.3 Comentarios sobre los modelos de erosión	24
3.8 La cobertura del suelo y el uso de la tierra.....	26

3.9 La Capacidad de Uso de las Tierras	27
3.9.1 Capacidad de uso Mayor.....	28
3.9.2 Aptitud de uso de la tierra.....	29
3.9.3 Diferencias entre Capacidad y Aptitud.....	29
3.10 Sistemas de Información Geográfica	29
3.10.1 Definiciones	30
3.10.2 Modelos de datos SIG	32
3.10.3 Funciones del SIG	33
3.11 Apoyo a las Decisiones Espaciales (geográficas).....	34
3.12 Sistemas Expertos	36
3.12.1 Estructura de un Sistema Experto	39
3.12.2 Sistemas Expertos y Sistemas de Información Geográfica.....	40
4. Materiales y Métodos	43
4.1 Descripción del área de estudio.....	43
4.2 Esquema de trabajo.....	45
4.2.1 Recopilación de datos e información.....	45
4.2.2 Evaluación del Riesgo a la Erosión	46
4.2.3 Cambios de Cobertura y Uso del suelo	52
4.2.4 Evaluación de la Capacidad de Uso de los suelos	54
4.2.4.1 Características de la clasificación.....	55
4.2.4.2 Principios básicos para la clasificación	55
4.2.4.3 Procedimientos	55

4.2.4.4 Categorías de capacidad de uso mayor de la tierra	56
4.2.5 Comparación entre Capacidad de uso y uso actual del suelo (análisis de conflictos de uso	58
4.3 Diseño del Sistema Experto	59
4.3.1 Construcción de la base de conocimientos.....	62
5. Resultados	69
5.1 Evaluación de la Erosión (RUSLE).....	69
5.1.1 Microcuenca Cilcuayo	69
5.1.2 Tendencias en el tiempo microcuenca Cilcuayo	71
5.1.3 Microcuenca Milpa Alta.....	72
5.1.4 Tendencias en el tiempo microcuenca Milpa Alta	75
5.2 Evaluación Erosión (USPED).....	76
5.3 Áreas Críticas (Hot Spot)	78
5.4 Sensibilidad de áreas críticas	79
5.5 Cambios de la cobertura y uso del suelo.....	83
5.6 Capacidad de uso del suelo.....	88
5.7 Comparación entre unidades de Capacidad de Uso y uso actual del suelo	91
5.7.1 Micro Cuenca Cilcuayo	93
5.7.1.1 Capacidad de uso	94
5.7.1.2 Conflictos de uso de la tierra en Cilcuayo.....	96
5.7.2 Microcuenca Milpa Alta.....	98
5.7.2.1 Capacidad de Uso.....	98

5.7.2.2 Conflictos de uso de la tierra en Microcuenca Milpa Alta	100
5.8 Sistema Experto (Terranova)	102
6. Conclusiones	106
7. Bibliografía	108

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Comparación de las capacidades entre un SIG y un Sistema Experto (Adaptado de Lilburne et al. 1996)	42
Cuadro 2. Estaciones meteorológicas analizadas	46
Cuadro 3. Códigos de permeabilidad y estructura del suelo en función de su textura	47
Cuadro 4. Matriz de comparación entre la Capacidad de Uso	59
Cuadro 5. Superficies (ha) de clases de erosión en tres épocas diferentes, Cilcuayo.....	71
Cuadro 6. Superficie (ha) afectada por diferentes clases de erosión hídrica, Cilcuayo (2005)....	72
Cuadro 7. Superficie (ha) afectada por diferentes clases de erosión hídrica, Cilcuayo (1997).....	72
Cuadro 8. Superficie (ha) afectada por diferentes clases de erosión hídrica, Cilcuayo (1978).....	73
Cuadro 9. Superficies (ha) de clases de erosión en tres épocas diferentes, Milpa Alta.....	75
Cuadro 10. Superficie (ha) afectada por diferentes clases de erosión hídrica, Milpa Alta (2005)	76
Cuadro 11. Superficie (ha) afectada por diferentes clases de erosión hídrica, Milpa Alta (1997)	76
Cuadro 12. Superficie (ha) afectada por diferentes clases de erosión hídrica, Milpa Alta (1979)	77
Cuadro 13. Cambios de uso del suelo, periodo 1987-1997 Milpa Alta	86
Cuadro 14. Cambios de uso del suelo, periodo 1997-2005 Milpa Alta	88
Cuadro 15. Cambios de uso del suelo, periodo 1978-1997, Cilcuayo	89
Cuadro 16. Cambios de uso del suelo, periodo 1997-2005, Cilcuayo	90
Cuadro 17. Clases de Capacidad de uso y sus superficies, encontradas en las dos microcuencas	92

Cuadro 18. Superficie (ha) de los conflictos entre el uso actual y Capacidad de uso del suelo....	94
Cuadro 19. Matriz general de conflictos entre capacidad de uso y uso actual del suelo	95
Cuadro 20. Superficies de la Capacidad de Uso Cilcuayo	97
Cuadro 21. Conflictos del uso de la tierra, microcuenca Cilcuayo	99
Cuadro 22. Superficies de la Capacidad de uso cuenca Milpa Alta	102
Cuadro 23. Conflictos del uso de la tierra, Milpa Alta	104

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de procedimientos para adquirir apoyos (CONAFOR).....	13
Figura 2. Modelos de Datos Vector y Raster (adaptado de Bolstad 2002).....	32
Figura 3 . Ubicación de microcuencas, Delegación Milpa Alta, D.F.	44
Figura 4. Distribución de obras de conservación 2007.....	45
Figura 5. Nomograma de Erodabilidad del suelo.....	48
Figura 6. Distribución de muestras de suelo.....	48
Figura 7. Procedimiento para calcular el riesgo de erosión hídrica mediante modelo RUSLE....	51
Figura 8. Esquema generalizado para calcular el riesgo de erosión/depósito, modelo Transporte (USPED).....	53
Figura 9. Núcleos principales del Sistema Experto.....	62
Figura 10. Bloques lógicos del Sistema EXSYS.....	66
Figura 11. Ventana de asignación de valores a variables entrada.....	68
Figura 12. Interface del Sistema Experto (Terranova).....	69
Figura 13 Proceso generalizado para evaluar áreas probables de ubicación de obras de conservación de suelos a nivel de cuenca.....	70
Figura 14. Tendencias del proceso erosivo en diferentes usos de la tierra.....	74
Figura 15. Tendencias del proceso erosivo en diferentes usos de la tierra, Milpa Alta.....	78
Figura 16a, b. Comparación de clases de erosión entre modelo RUSLE y USPED.....	79

Figura 17. Capacidad Transporte.....	80
Figura 18. Análisis de sensibilidad en áreas Erosión con factor (P).....	83
Figura 19. Análisis de sensibilidad en áreas Depósito con factor (P).....	84
Figura 20. Efecto del factor P con una sola obra conservacion.....	85
Figura 21. Clases de Capacidad de Uso (2 microcuencas)	93
Figura 22. Vista 3D de las cuencas Cilcuayo y Milpa Alta, Imagen Quickbird (2005) falso color	96
Figura 23. Capacidad de uso en microcuenca Cilcuayo	99
Figura 24. Conflictos del uso de la tierra, Cilcuayo	101
Figura 25. Clases de Capacidad de uso, Milpa Alta	103
Figura 26. Clases de Capacidad de uso, Milpa Alta	105
Figura 27. Etapas del Sistema Experto para ofrecer recomendaciones	108

INDICE DE FOTOGRAFIAS

Foto 1. Afectación área forestal protegida por actividades agrícolas	87
Foto 2. Ganado ovino en áreas forestales. Factor importante en erosión eólica	88
Foto 3. Plantíos de Nopal de verdura en laderas pedregosas, Cilcuayo.....	91
Foto 4. Áreas agrícolas en laderas expuestas en microcuenca Cilcuayo	98
Foto 5. Áreas nopaleras en pendientes inclinadas y manejo tradicional de maiz.....	103

RESUMEN

Las instituciones gubernamentales que administran los recursos naturales tienen una percepción distinta a la que mantiene la comunidad académica y científica en lo que respecta a la importancia de la degradación de los suelos, ya que no existen instituciones dedicadas a este recurso. Por lo que en dependencias donde se administran el agua, los bosques y selvas tienen como una tarea importante pero secundaria, la conservación y manejo del recurso suelo, así como la regulación de su uso. Aunado a lo anterior, la investigación relacionada al control, conservación y rehabilitación de los suelos principalmente agrícolas tiene un enfoque técnico tradicional, que implica la construcción de obras costosas que son parte de un bagaje enorme de experiencia acumulada durante décadas, pero que no constituyen soluciones integrales, que consideren aspectos ecológicos y/o de biodiversidad, sino que tienen un enfoque “productivista” que trata de devolver al suelo las funciones agrícolas lesionadas. La forma de enfrentar este problema por parte de las instituciones, es mediante programas de apoyo de Conservación de Suelos, existen algunos de estos que trabajan de forma sectorial y que otorgan fondos y apoyos técnicos para solventar la erosión del suelo y escases de agua. Para ejecutar estos programas se localizan áreas críticas con tasas de erosión altas y conjuntamente índices de marginación altos. Los Técnicos y agricultores seleccionan los sitios donde se construirán las obras, así como del tipo de estas. Lo anterior solo se evalúa de manera local una vez que está funcionando la obra pero no se sabe si hubo efectos laterales o en la cuenca misma.

Ante este panorama surgió la necesidad de conjuntar una serie de herramientas que fueran útiles en ubicar sitios con procesos erosión y depósito de sedimentos de forma sencilla pero efectiva. Al mismo tiempo se identificó que mucha de la experiencia acumulada en técnicos, agricultores y académicos no ha sido usada de forma ordenada, y que de manera empírica sus decisiones llevan a soluciones inmediatas pero que a mediano plazo se desconoce su impacto y eficiencia. Así que se considero oportuno y factible diseñar y construir un Sistema Experto que conjuntara y ordenara el conocimiento de los profesionales en el ramo y así conformar un Sistema que Apoyara las Decisiones Geográficas de manera sistemática, y que fuera posible cuantificar el efecto de las obras a nivel de cuenca. Se logro conjuntar la experiencia de expertos tanto técnicos de campo, académicos y agricultores de experiencia y conjuntamente con un sistema de información geográfica fueron capaces de identificar sitios críticos que al ser evaluados mediante el modelo de erosión, los valores de este proceso disminuyeron en un 25% afectando positivamente otros sitios críticos de la cuenca.

Por lo anterior podemos ver un sinnúmero de herramientas que están disponibles pero que hace falta validarlas, también la gran disponibilidad de información geográfica hace atractiva la idea de construir sistemas integrales que puedan resolver problemas específicos. Sin duda los Sistemas que Apoyan las Decisiones son herramientas útiles que son auxiliares en la enseñanza y capacitación de técnicos y agricultores, ya que el conocimiento de expertos se captura y perdura en el tiempo. Además estas herramientas obligan a los investigadores a generar modelos adaptados a nuestras circunstancias.

SUMMARY

Government agencies in Mexico that manage natural resources have a different perception to one kept by academic and scientific community, regarding the importance of soil degradation as there are institutions dedicated to this resource. As given in units where water woods and forests are as important but secondary task conservation and management of soil resources and regulating their use. Added to this, the control related research conservation and rehabilitation of mainly agricultural land has a traditional engineering approach which involves the construction of expensive works that are part of an accumulation of enormous experience summed over decades but solutions are not integral to consider ecological and or biodiversity, but have a focus "productivity" out returning to the ground injured agricultural functions. The way to tackle this problem by institutions is by supporting programs for Soil Conservation here are some of those who work on a sectoral basis and provide funds and technical support to solve the soil erosion and water scarcity. To run these programs you should locate critical areas with high erosion rates and high levels of marginalization which come together. Technicians and farmers select the sites where works are constructed and the type of these. This is evaluated only locally once the work is running but it is unknown whether there are side effects or in the basin itself.

Against this background the need arose to put together a series of tools that were useful in locating sites with erosion and deposition processes of sediments in a simple but effective way. At the same time it is known that much of the accumulated experience of technicians, farmers and academics has not been used in an orderly fashion and that their decisions are empirically immediate solutions to medium term but their impact is unknown and unefficient. So they consider it appropriate and feasible to design and build an expert system and ordered that combines the knowledge of professionals in the field and thus form a system that supports the geographical decisions systematically, and it was possible to quantify the effect of the works basin level. They combine the experience of achieving both technical field experts, academics and farmers experience and together with a geographic information system were able to identify critical sites when evaluated by the erosion model, the values of this process decreased by 25 % positively affecting other hotspots in the basin.

Therefore we can see a number of tools that are available but need to be validated also the widespread availability of geographic information make attractive the idea of building systems which can solve specific problems: No doubt the decisions support systems are useful tools that are auxiliary to teaching and training of technicians and farmers, as expert knowledge is captured and endures over time. In addition, these tools require researches to build models adapted to our circumstances.

1. INTRODUCCION

La erosión del suelo pone en riesgo la seguridad alimentaria, la productividad del suelo, la calidad del agua superficial, la belleza estética del paisaje y el balance ecológico global. El reconocimiento mundial de la erosión como un problema en las pasadas décadas atrajo la atención de técnicos y científicos, y se han llevado a cabo cientos de eventos donde se proponen diversas soluciones al problema, ya sea a nivel mundial, nacional, o local. Las inversiones en estos esfuerzos son pequeños comparados con las inmensas inversiones en trabajos de ingeniería civil que ayudan a reparar los daños causados por la erosión.

En México no se percibe al recurso suelo como un elemento clave para el sustento de la vida humana, muestra de esto es el hecho de que no existe una dependencia gubernamental que se avoque a este recurso ya que se han concentrado en el cuidado y conservación de los bosques y el agua. Pero de alguna forma por muchos años se han hecho evaluaciones de la degradación de este recurso. Por ejemplo en 2002, la SEMARNAT, preparó un Mapa de la Evaluación de la Degradación del Suelo a escala 1:250'000. Esta escala sirvió como base para conocer los diferentes tipos de degradación de suelos y sus posibles causas. En este estudio se encontró que los tipos de degradación más dominantes son, la degradación química por declinación de la fertilidad el suelo (17%), la erosión hídrica del suelo (10%), la erosión eólica del suelo superficial (9%) y la degradación física debida a la compactación del suelo (4%). Y que las causas más importantes de este deterioro son las actividades agrícolas y el sobrepastoreo. Ante este panorama, las instituciones gubernamentales en México han puesto en marcha diferentes programas para atacar el problema de erosión hídrica provocada por diferentes agentes. Así tenemos por ejemplo, el Programa de Agricultura Sostenible y Reversión Productiva (PASRE); el Programa de Conservación, Restauración y Reforestación (PROCOREF), coordinado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y SAGARPA tiene el Programa de Conservación y Uso Sustentable del Suelo y Agua (COUSSA), en estos se ejercen recursos económicos y técnicos regularmente con la finalidad de contrarrestar los problemas ya descritos. En estos programas se promueve la adopción de prácticas de conservación, prevención y restauración de suelos, así como las mejores prácticas agrícolas. La mecánica de operación para llevar a cabo las prácticas necesarias se basa en la iniciativa de los productores para solicitar los

medios económicos y técnicos que puedan resultar en la construcción de las mejores obras dentro de su predio.

Estos programas de conservación del suelo y agua deberían ser los fundamentos de una agricultura sustentable, donde un elemento clave es hacer una buena selección de medidas que disminuyan la erosión principalmente de tierras de vocación forestal y agrícola. Los programas pretenden promover acciones tradicionales de conservación de suelos, como regulación del uso del suelo, incentivar manejos adecuados de cultivos y la construcción de obras de conservación, y restauración de suelos. Teóricamente la selección de prácticas apropiadas está apoyada en los patrones de uso del suelo, topografía y tipos de suelos, así como también factores sociales y económicos, además de manuales de obras y prácticas donde se describen los procedimientos técnicos para el cálculo de dichas obras, pero no de manera detallada. Los mecanismos de selección de áreas prioritarias de algunas dependencias, se basan en los resultados del estudio de degradación de suelos a nivel nacional realizado por la SEMARNAT, (SEMARNAT-Colegio Postgraduados, 2002), ubicando sobre este las cuencas a este mismo nivel, y dentro de estas a los municipios que cumplan con requisitos de superficie afectada principalmente por erosión hídrica, procesos de deforestación, y niveles de marginación altos, estas características les dan el estatus de prioritarias. Lo anterior no significa que haya un enfoque de cuencas, y que por lo tanto los recursos destinados a las obras se apliquen a los sitios con mayor influencia hidrológica y/o áreas degradadas con fuerte influencia regional.

Una vez asignados los recursos se distribuyen a los productores solicitantes y de manera conjunta con los técnicos asignados se localizan los sitios y obras a construir, bajo los criterios de los dueños de las parcelas, y las recomendaciones de los técnicos asignados, que mantienen una fuerte tendencia a hacer decisiones empíricas producto de la experiencia en cuanto a que obras construir, el número de ellas y su ubicación. Por lo que el impacto de las obras a nivel cuenca no se conoce, y por lo tanto los procesos de erosión hídrica con fuerte impacto sobre el ciclo hidrológico no se logran entender en el contexto regional. De esta forma se hace necesario desarrollar herramientas analíticas que permitan a técnicos y planeadores hacer evaluaciones y análisis de los procesos erosivos y proponer planes de conservación de suelos apropiados que sean amigables, rápidos y confiables.

Existen muchas herramientas de análisis y cuantificación de la erosión en un contexto geográfico. Solo que usarlos en forma individual suele dificultar la manipulación de los datos e integrar los resultados entre herramientas, y así obtener la información necesaria que apoye la toma de decisiones en un lapso corto de tiempo y con costos bajos. Por lo que en los últimos años se han desarrollado Sistemas que apoyan las decisiones en un contexto espacial (geográfico) y que integran herramientas de análisis geográfico, modelos matemáticos, bases de datos, y sistemas inteligentes para resolver problemas específicos.

Por lo anterior se propuso realizar en este trabajo construir un Sistema Espacial de Apoyo a las Decisiones (SEAD), que integrara una serie de herramientas que ayudaran en primer término a evaluar el riesgo a la erosión a nivel regional que no ofreciera valores absolutos de erosión, y que no fuera oneroso en cuanto a adquirir parámetros físicos de difícil adquisición, sino que fuera capaz de generar patrones de Erosión/Deposito que son mas útiles en los procesos de planeación, que valores de flujos de masa que son mas usados en el diseño de obras. Encontramos que el modelo USPED (siglas en inglés, Unit Stream Power Erosion/Deposition) cumple con estas características. Este modelo se basa en elementos topográficos como el gradiente de la pendiente, la orientación de estas, las áreas de acumulación de los sedimentos, la curvatura del terreno (formas de la pendiente) y la curvatura tangencial, los cuales son utilizados para calcular la fuerza del flujo y definir las áreas de Erosión/Deposito. Además puede ser utilizado desde un Sistema de Información Geográfico.

Por otro lado, realizamos una evaluación del riesgo a la erosión mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (siglas en inglés, RUSLE) con modificaciones en el factor topográfico, evaluando el área de captación pendiente arriba y no la longitud de la pendiente. Este procedimiento comparativo fue para mostrar la representatividad de los resultados de ambos modelos, y aplicabilidad para este estudio.

Para ambos casos se evaluó la erosión en tres fechas diferentes (1979, 1997 y 2005), que sirvieron de marco espacio-temporal comparativo.

Otro elemento importante a integrar en el SEAD, fue un Sistema Experto que almacena conocimiento semi estructurado relacionado con las decisiones que toman técnicos e investigadores en la selección de obras de conservación y su ubicación dentro de un contexto

local y regional. Ya que los procesos cotidianos que realizan estas actividades, se llevan a cabo bajo un estricto método intuitivo no ordenado y empírico. Así que el SEAD se compone de un Sistema de Información Geográfica (SIG) que realiza los cálculos de la erosión, y se generan las áreas críticas utilizando como información entrante, un modelo de elevación digital corregido, de alta resolución horizontal (5 – 20 m), mapa de suelos con valores de erodabilidad, mapa de cobertura vegetal y uso del suelo y registros de lluvia diaria para estimación de escurrimientos superficiales. Los resultados son utilizados en el Sistema Experto que analiza los valores de sitio (pendientes, vegetación, tipos de suelos, etc) de las áreas críticas mediante las reglas lógicas construidas a partir de la base de conocimientos, para ofrecer alternativas de obras de conservación y / o practicas vegetativas, las cuales se regresan al SIG en forma de mapas que se utilizan nuevamente para calcular el riesgo de erosión. De esta forma se puede evaluar en que proporción las propuestas de manejo impactan en la cuenca.

Finalmente, se hizo necesario tener un antecedente histórico de cómo se fueron dando los cambios en el uso del suelo y la disminución de la cobertura vegetal, conjuntamente se requiere saber cuál es la capacidad de los suelos para soportar los usos actuales. Todo significo una forma de diagnóstico regional, que sirva como sustento sólido a los programas de conservación de suelos. Ya que los planes de conservación de suelos tienen un enfoque de producción y no se consideran las interrelaciones sistémicas que ocurren en una cuenca y hacen que la conservación de los suelos no signifique exclusivamente la restauración y rehabilitación del suelo, como cuerpo natural sino de los elementos bióticos y abióticos del paisaje. Algunos procesos de degradación de tierras afectan a sólo un recurso natural: suelos, agua, vegetación; sin embargo, dada la naturaleza interactiva de los ecosistemas siempre ocurren cambios asociados a los otros recursos. La evaluación de la Capacidad de Uso de los suelos, tuvo la finalidad de conocer el nivel de aptitud y compararlo con los usos actuales, y distinguir las áreas con usos no apropiados (conflictos de uso del suelo).

2. OBJETIVOS

2.1. General

Construir un Sistema Espacial que Apoye las Decisiones para seleccionar obras de conservación de suelos y prácticas de manejo a nivel de cuenca y que sea una herramienta útil en el proceso de planificación en el sector forestal.

2.2. Particulares

- a). Utilizar el modelo USPED que evalúa el riesgo a la erosión mediante algoritmos que generan patrones de desprendimiento/depósito del suelo a nivel de cuenca
- b). Determinar las Áreas Críticas (Hot Spot) tanto de erosión como de depósito a nivel de cuenca, mediante los enfoques de “expertos” y estadística espacial.
- c). Construir un Sistema Experto (SE) que evalúe el esquema semi estructurado de hacer decisiones al seleccionar obras de conservación de suelos y prácticas de manejo, que de manera empírica y cotidiana realizan tanto campesinos interesados como técnicos expertos de campo.
- d). Evaluar los cambios espacio-temporales de cobertura/uso del suelo en tres fechas diferentes, en las microcuencas de Milpa Alta y Cilcuayo en el Distrito Federal, con la finalidad de identificar los agentes de dichos cambios, y sus efectos en el proceso erosivo
- e). Identificar la Capacidad del uso de los suelos bajo condiciones de pendientes complejas, y compararla con el uso actual y así reconocer los patrones de conflicto en el uso de los recursos naturales de la región.
- f). Utilizar las Áreas Críticas para asignarles tanto el tipo de obras de conservación de suelos/prácticas vegetativas como los valores correspondientes a los factores de manejo y cobertura del suelo (Factor P y C) recomendadas, y evaluar su efecto mediante el modelo USPED y así generar escenarios de manejo *ad hoc*.

3. REVISION DE LITERATURA

3.1. Conceptos sobre la erosión

La erosión del suelo puede ser definida como el desprendimiento y translocación de partículas del suelo y que son movidas por el agua y el viento desde sus lugares originales a nuevos sitios de depósito. La erosión del suelo es comúnmente reconocida por formas de incisiones y depósito de la superficie del suelo. La palabra erosión es derivada de la palabra latina *erosio*, que significa “*roer más allá*”. Algunos ejemplos de rasgos de erosión hídrica incluyen arrastre superficial, canalillos, cárcavas y deslizamientos (Nill *et al.*, 1996, Laflen y Roose 1997). Además de la lluvia y el viento que pueden causar erosión, esta la intensificación del uso del suelo, labranza, construcción de estructuras, sobrepastoreo, uso de la tierra no regulado y la deforestación.

La evolución del suelo es constante bajo condiciones propicias, pero con lapsos que fluctúan de cientos a miles de años requeridos para la formación de algunos centímetros. Este largo periodo hace que se considere al suelo como un recurso natural no renovable.

En general, las tasas de erosión son más altas en suelos desprovistos de vegetación y cultivados pero varían para suelos de países poco desarrollados de 30 a 40 ton/ha/año y para los desarrollados es en promedio de 12 a 17 ton/ha/año (Pimentel y Kounang, 1998; USDA, 1994; y Barrow, 1991). En pastizales el promedio es de 6 ton/ha/año sin embargo en pastizales sobrepastoreados puede llegar a 100 ton/ha/año (LAL, 2003). Incluso las tasas más bajas de erosión exceden la tasa promedio de formación de suelo de 1.0 ton/ha/año, (la tasa de formación de suelo de material parental en suelos de los horizontes A, E, B (Bennet, 1939). En terrenos forestales se requiere un mínimo de 60% de cobertura forestal para prevenir la erosión del suelo (Singh y Kaur, 1989). Las tasas de erosión en terrenos relativamente planos y forestales varían entre 0.001–2 ton/ha/año, en regiones con cobertura vegetal normal varían entre 1 a 5 ton/ha/año (Pimentel y Kounang, 1998; Rosse, 1988; y Bennet, 1939). El proceso de erosión se intensifica en áreas con pendiente, donde más de la mitad del suelo contenido en el agua desplazada por las gotas es removido hacia abajo de la pendiente.

En suelos cultivados con pendientes mayores a 12% se pierden hasta 221 ton/ha/año comparado con un suelo con 1 % de pendiente donde solo se pierden 3 ton/ha/año (Pimentel y Kounang,

1998). En zonas tropicales con pendientes de 11 a 20% se pierden más de 400 ton/ha/año. En los suelos de áreas forestales que se incorporan a la agricultura y a la ganadería, la erosión reduce los rendimientos del 12 al 65% (Frye *et al.*, 1982; y Dregne, 1987). La erosión por agua y por viento afecta la calidad del suelo por la reducción de la tasa de infiltración, capacidad de retención de humedad, nutrientes, materia orgánica, biota y la profundidad del suelo (Kendall y Pimentel, 1994). Cuando existe erosión, la cantidad de escurrimientos se incrementa, disminuyendo la cantidad de agua disponible en el suelo. Un suelo moderadamente erosionado absorbe de 10 a 300 mm menos agua por hectárea que un suelo no erosionado o entre el 7 y el 44% de la lluvia total (Wendt y Burwell, 1987). En los trópicos la erosión reduce la infiltración hasta en un 93% (Lal, 1976).

Sin embargo, en todos los ecosistemas, los suelos cumplen con importantes funciones de las cuales se derivan servicios ambientales indispensables para el sostenimiento tanto del ecosistema como de la vida humana. La función más conocida es la de soporte y suministro de nutrientes a las plantas. De ahí que la degradación del suelo esté considerada como el mayor problema ambiental que amenaza la producción mundial de alimentos (PNUMA 2000) y una de las principales amenazas para el desarrollo sostenible de los terrenos agrícolas (Castillo 2004). No obstante, el suelo cumple con otras funciones igualmente trascendentes, como la de constituir un medio filtrante que permite la recarga de los acuíferos, afectando directamente en la calidad del agua. Asimismo constituye el medio donde se realizan ciclos biogeoquímicos necesarios para el reciclaje de los compuestos orgánicos. Como resultado de este proceso, se estima que el contenido de carbón almacenado en el primer metro del suelo es 1.5 veces mayor a aquél acumulado en la biomasa (Sombroek *et al.* 1993), constituyendo la tercera fuente más importante de carbono (Lal 1999).

Este secuestro de carbono en el suelo, reduce su liberación a la atmósfera como CO₂, uno de los principales gases “invernadero” responsables del cambio climático (Kern y Johnson 1993).

De acuerdo a sus características, el suelo funciona también como hábitat para miles de organismos desde células microscópicas a pequeños mamíferos y reptiles, manteniendo una amplia biodiversidad. En estos ecosistemas, se reconoce cada vez más la importancia del suelo antrópico en las zonas urbanas como soporte para sus áreas verdes y para la recarga de acuíferos (Huinink 1998).

La importancia de los suelos para el sostén de la vida humana ha sido reconocida durante el último medio siglo con la aparición de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y de decenas de otras instituciones internacionales y nacionales, que año tras año alertan sobre la degradación y sus repercusiones en el mantenimiento de la biodiversidad, la mitigación de la pobreza y la seguridad alimentaria. Estas características y funciones de los suelos determinan que la conservación de este recurso debe buscar el mantenimiento y la recuperación de su calidad, entendida como la capacidad para funcionar dentro de los límites naturales, para sostener la productividad de plantas y animales, mantener la calidad del aire y del agua y sostener la salud humana (Karlen *et al.* 1997).

3.2. Causas de la degradación de los suelos

EL deterioro físico puede ser el inicio de un proceso de erosión hídrica, que a su vez ocasiona un deterioro químico, como la pérdida de la fertilidad. La degradación de suelos es multifactorial ya que incluye factores ambientales y socio-económicos. Rara vez es un solo factor el que desencadena un problema de degradación. Si bien es cierto que en algunos paisajes los suelos pueden ser más erosionables o la precipitación más erosiva, en prácticamente todos, el factor preponderante recae en las actividades antropogénicas. En general, todo uso de la tierra, que modifica el tipo y la densidad de la vegetación original y/o que dejan al descubierto la superficie del suelo, propicia su degradación. El efecto agresivo de la lluvia inicia cuando la vegetación es removida. Esto deja al suelo desnudo y expuesto a la acción de la energía cinética de las gotas de lluvia (Morgan 1986). Luego, en función de las características del suelo (de textura, estructura y contenido de materia orgánica, principalmente) y del relieve, se presentan alteraciones en la capacidad de infiltración del suelo, propiciando el escurrimiento superficial, causante de la erosión hídrica.

Entre las principales actividades humanas que inducen la degradación de suelos en el campo se encuentra el sobrepastoreo, el crecimiento poblacional, constituyen una enorme presión de uso sobre los recursos naturales.

Lo anterior conlleva a la construcción de infraestructura y la urbanización son importantes; la primera afecta en los patrones de drenaje y la segunda al cubrir, impermeabilizar y anular las funciones del suelo

Otro de los aspectos menos mencionados en la literatura especializada y que, sin embargo, juega un papel preponderante en los problemas de degradación de suelos, se relaciona con el impacto de las políticas públicas. Tradicionalmente, en los países de América Latina, la instauración y ejecución de dichas políticas se rigen por el beneficio económico y político que éstas pueden proporcionar; rara vez se evalúa su efecto definitivo sobre la estabilidad del medio ambiente y el capital natural. Aunado a ello, se deben considerar los cambios jurídicos, los subsidios a determinados cultivos y prácticas, los créditos rurales, la discontinuidad sexenal en las políticas públicas y el divorcio casi constante entre los programas y las acciones ejecutados por las distintas instituciones del Estado. Así, muchos de los programas establecidos en México, como son el apoyo a la ganadería, monocultivos con alto consumo de agroquímicos y la intensa deforestación, han originado y acentuado muchos de los problemas de degradación de suelos.

3.3. Que pasa en México con la degradación de suelos

Desde hace más de 50 años se han realizado diversas evaluaciones para analizar la degradación de suelos en México. Estas estimaciones indican que entre 70% y 98% de la superficie nacional presenta evidencias de erosión. Esta divergencia es resultado del manejo de conceptos y metodologías diferentes. Según el último estudio de degradación de suelos, En evaluaciones recientes, en México se presentan suelos degradados por la acción humana en 45% de su territorio, principalmente por actividades agrícolas seguida de las agropecuarias.

Los procesos responsables del 87% de esta degradación son: la erosión hídrica, la erosión eólica y la pérdida de fertilidad del suelo. Las causas de la degradación son: el cambio de uso del suelo para fines agrícolas y el sobrepastoreo (17.5% en ambos casos). La deforestación (7.4%) y la urbanización (1.5%). Todas estas causas tienen una importante relación con la reducción de la cubierta vegetal (SEMARNAT-Colegio de Postgraduados, 2002).

El costo económico ha sido evaluado de manera general dando cifras importantes a nivel país. Sólo para dar una idea, Magulis (1992) valora el efecto de la erosión hídrica en el sitio (considerando la pérdida de productividad de soya, maíz, sorgo y trigo) con montos que alcanzan los mil millones de dólares, mientras McIntire (1994) calcula que el costo por erosión hídrica sólo en el cultivo de maíz varía entre 2.7 a 12.3 del PIB del año 1988. Sin embargo, los

programas para disminuir la degradación de suelos consideran montos económicos muy por debajo de estas cifras. Al revisar las principales causas de la degradación de suelos en México podemos apreciar el impacto sobre este recurso que ocasionan las actividades agropecuarias, ya que constituyen la causa de la degradación de más del 77% de suelos a nivel nacional.

3.4. Como enfrentan el problema las instituciones

En los últimos años, se ha acentuado la degradación de los suelos, a pesar de los esfuerzos de las instituciones gubernamentales. Una de las causas de esta situación es como perciben estas instituciones el concepto de la conservación de los recursos naturales en general, y del suelo, en particular (Hudson 1991; Biot *et al.* 1995).

Por ejemplo para hacer *conservación*, se deben hacer dos acciones, primero, *la evaluación sistemática de la conservación y posteriormente la planificación de la conservación* estos son dos campos distintos de la ciencia de la conservación que a menudo son confundidos. La evaluación sistemática de la conservación es la identificación técnica, a menudo computarizada, de áreas de prioridad para la conservación. La planificación de la conservación está compuesta por una evaluación sistemática de la conservación aunada a procesos para el desarrollo de una estrategia de implementación y colaboración de grupos de interés. En la literatura de biología de la conservación abundan los estudios que analizan los productos de las evaluaciones (e. g., técnicas de selección de áreas). Sin embargo, esta información por sí sola no puede derivar en acciones de conservación efectivas; informa a la planificación de la conservación. Son raros los ejemplos de cómo traducir los resultados de evaluaciones sistemáticas en conocimiento y luego utilizarlo para “hacer” conservación.

En México durante las últimas décadas, los programas de conservación de suelos han pasado por varias etapas, señal de que hay evolución del concepto de la conservación de suelos. A éstas Biot *et al.* (1995) las denominan las fases “clásica”, “populista” y “neoliberal”, otorgándoles diferentes premisas que han ido evolucionando, desde una perspectiva centralizada para dar soluciones ambientales a agricultores, bajo un modelo conservador y paternalista, sin consideraciones de orientación al mercado, ni enfoque de género con un enorme énfasis en las prácticas mecánicas de conservación de suelos. Posteriormente, el enfoque fue de abajo hacia

arriba (*bottom-up*) para dar soluciones socio-políticas a agricultores que preferían realizar sus acciones de manera comunal, mediante evaluaciones rurales rápidas.

El último rumbo se caracteriza por una toma de decisiones ejercida mediante políticas de mercado y derechos de propiedad, pensando en dar solución principalmente a problemas económicos y políticas gubernamentales inadecuadas.

Sin querer otorgar a los programas realizados por las distintas instituciones gubernamentales una de estas fases, podemos sin embargo encontrar rasgos y situaciones comunes de varias de ellas en los programas de conservación y rehabilitación de suelos en México.

Además de la dificultad inherente que representa mantener una coherencia espacial cuando los enfoques de los programas son distintos, y a veces contradictorios, existen elementos técnicos y sociopolíticos que pueden dificultar la elaboración, ejecución y el éxito de los planes de conservación de suelos (Cotler *et al.* 2004).

Uno de ellos es el énfasis productivo y local de la mayoría de estos programas. Es decir, que la conservación de los suelos no se realiza para mantener al suelo como cuerpo natural, recuperando la mayoría de sus funciones, sino que todo el esfuerzo está centrado en el suelo como medio de soporte y suministro de nutrientes a las plantas en tierras productivas, importantes desde el punto de vista económico pero no siempre desde una perspectiva ambiental, por ejemplo que las acciones también actúen para mejorar las funciones amortiguadoras del suelo.

Otro punto que dificulta la funcionalidad de los programas es el de incorporar a la población en la ejecución de estos programas, para lo cual hay que conocer y entender sus motivaciones e incentivos, en el entendido que las decisiones para adoptar prácticas de conservación están fuertemente influenciadas por políticas gubernamentales, por el poder adquisitivo, costo de oportunidad, derechos de propiedad sobre la tierra a conservarse, entre otros. Los programas de conservación de suelos están elaborados pensando en las consecuencias más visibles (pero no por ello las más importantes). Las consecuencias a escala regional, nacional o global de la degradación de los suelos son pocas veces tomadas en consideración. Por ejemplo al seleccionar a los agricultores que se beneficiaran de algunas obras de conservación, estos tienen prioridad de seleccionar tanto los sitios donde se construirá, como el tipo de obra, considerando como factor decisivo las áreas que a su juicio y del técnico pueden ser rehabilitadas, claro sin un análisis integral de cuencas.

La experiencia ha mostrado que de manera regular el gobierno Federal invierte millones de pesos para combatir el terrible problema de la erosión del suelo, y los procedimientos oficiales para realizar esta enorme tarea es mediante procedimientos de selección geográfica y socio-económica que permiten a las autoridades direccionar los recursos y aplicarlos a agricultores interesados que deseen atacar la degradación de sus parcelas.

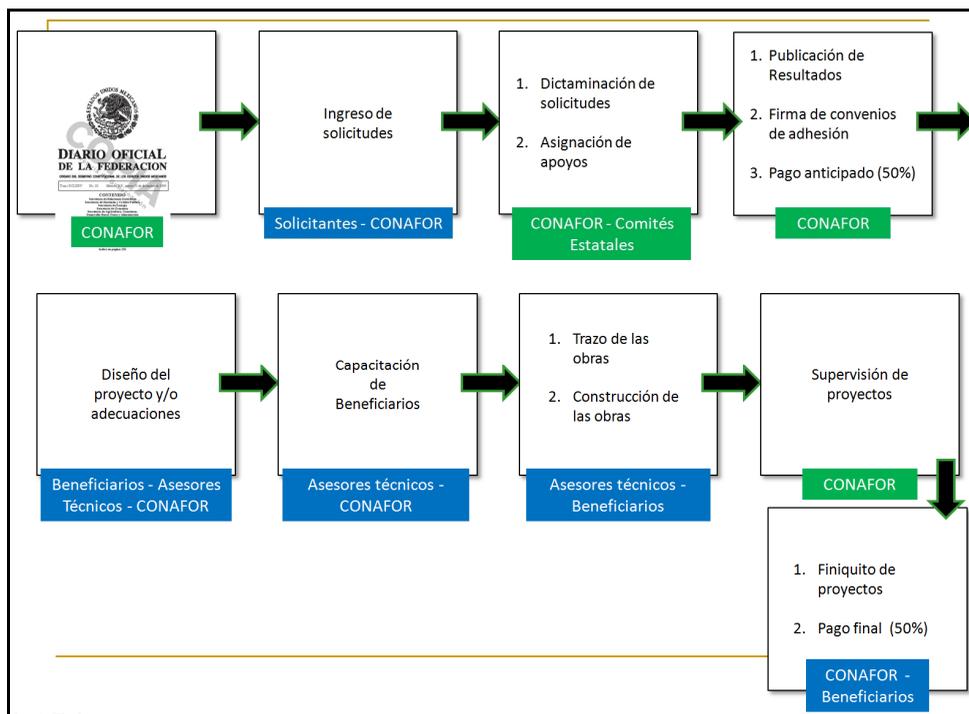
Sirva de ejemplo la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), la cual generó un procedimiento cartográfico para encontrar las áreas potenciales susceptibles de apoyo, y que posteriormente se convierten en áreas prioritarias.

El procedimiento se presenta de manera resumida:

- **Selección de los tipos de vegetación factibles:** vegetación secundaria, Arbórea, arbustiva y herbácea
- **Selección de los tipos y clases de degradación:** Se seleccionó la degradación del suelo ocasionado por el hombre, Se utilizan todos los tipos de degradación para considerar el universo nacional. Se utilizan las claves asociadas a Erosión hídrica.
- Posteriormente se agrega la información de microcuencas
- Se determina el grado de afectación por microcuenca, y estas son viables si esta es afectada en más del 30% de su superficie

Para encontrar las áreas prioritarias, se deben cumplir los siguientes criterios: El porcentaje de afectación de la microcuenca (>30%), Coincida con las áreas potenciales del año inmediato anterior, la demanda de apoyos se ajuste a los ofrecidos, que este cercano a viveros, áreas con mayor riesgo a la deforestación, zonas con alta y muy alta marginación y áreas que sean identificadas en estudios regionales u ordenamientos ecológicos.

La siguiente figura muestra los pasos que deben seguir los interesados a fin de recibir los apoyos económicos y técnicos. Es importante resaltar que es obligatorio contratar los servicios de técnicos especializados quienes apoyaran a los agricultores seleccionados en las actividades de selección de obras (visitas campo), determinar cuáles serán las que cumplan con los objetivos planteados en el diseño.



Fuente: CONAFOR, Gerencia Conservación de Suelos, 2011

Figura 1. Diagrama de procedimientos para adquirir apoyos (CONAFOR)

La asesoría técnica de prestadores de servicios debe culminar con la finalización de obras, que serán verificadas en inspecciones. Cabe mencionar que la CONAFOR frecuentemente lleva a cabo evaluaciones de los programas del año inmediato anterior, y el objetivo que se persigue es cuantificar si las obras cumplieron con los objetivos planteados en su diseño y ejecución.

Los resultados de dichas evaluaciones muestran en términos generales que la eficiencia de las obras para disminuir los escurrimientos, está entre el 50 y 75%, no siendo así para aquellas que están diseñadas para disminuir la erosión, su eficiencia es del 25 a 50% (CONAFOR-Evaluación Externa, 2005, 2006, 2007, 2009). Lo anterior nos puede dar algunos visos de que la ubicación de sitios para realizar las obras no es del todo adecuada, y tampoco la selección de obras y su dimensión. Estas decisiones se realizan a nivel parcelario, y no a escala de cuenca (regional). De acuerdo a comunicación personal con técnicos asesores de estos programas, la selección de los sitios es en base a rasgos erosivos superficiales muy marcados (cárcavas, canalillos) y la selección de obra está en función a los criterios del técnico que se basa en su experiencia, o por ciertas preferencias y necesidades tanto de los agricultores de la zona, como por la de los técnicos.

Estas decisiones pudieran afectar drásticamente la funcionalidad de la cuenca al realizar decisiones no documentadas y cuantitativas acerca de los procesos erosivos predominantes en el área de estudio, y desencadenar procesos negativos al obstruir flujos superficiales clave y forzar a los escurrimientos hacia nuevas direcciones que pudieran ser más vulnerables y desatar eventos extraordinarios de avenidas contundentes y generar inundaciones severas, o sedimentación de cuerpos de agua y sistemas de drenaje urbano.

Por ello es trascendental contar con evaluaciones de riesgo de erosión y sedimentación que sirvan de apoyo a técnicos y tomadores de decisiones para otorgar apoyos a las áreas prioritarias que realmente lo necesiten, pero en función a los procesos hidrológicos importantes y considerando también los aspectos ambientales y sociales.

3.5. Percepción de la erosión

En el contexto local de algunos pueblos enclavados en cuencas en la parte central de México, se les pregunto si reconocían la erosión laminar y la de inter canalillos, y que si para ellos estas formas de erosión eran peligrosas. Muy pocos conocían estas formas de degradación y la mayoría si identifico que las cárcavas son la representación más evidente de la erosión, por lo que las cárcavas son el objetivo principal de los programas de conservación. Mientras que la pérdida de suelo mediante erosión laminar e inter canalillos no se conocen sus efectos, y más bien algunas veces ha sido encubierta en otros contextos, como el sobre-uso del suelo, sequia o desertificación (Kiome y Stocking, 1995). Por esto se hace necesario hacer cuantificaciones de la erosión en forma de mapas ya que estos son una forma de expresar los tipos de erosión, su extensión y su grado de afectación y logran ser una herramienta útil para dirigir los recursos hacia las formas de control y manejo. De este modo por ejemplo un agricultor puede conocer si su propiedad se ve afectada y en qué proporción y que formas de control realizara. Por otro lado los residentes de una población dentro de una cuenca estarán interesados en conservar algunos de los recursos que tengan una influencia directa con la erosión, o emprender acciones que detengan algún proceso que pueda terminar en un desastre. Finalmente una autoridad regional podrá estar más interesada en la conservación ambiental de toda una región.

3.6. Procesos de la erosión hídrica

De acuerdo a Rose (1988) la erosión del suelo causada por el agua es resultado de cuatro procesos: desprendimiento por el impacto de las gotas de lluvia, transporte por las gotas de lluvia, desprendimiento por fuerzas cortantes del flujo del agua y transporte por escurrimiento superficial (erosión laminar, inter canalillos, canalillos, y cárcavas).

En si la erosión inicia con el rompimiento de los agregados en componentes individuales. Un agregado del suelo se puede considerar como un conjunto que naturalmente ocurre de partículas orgánicas e inorgánicas combinadas de tal forma que las fuerzas internas de estas tienen la capacidad de mezclarse internamente. El rompimiento de los agregados del suelo es causado particularmente por las propiedades internas de los agregados del suelo y particularmente por el impacto de la lluvia (Lal, 1988). Características internas importantes es la cementación coloidal de las arcillas, las cuales se entretajan y unen las fracciones de limo y arena juntas. Esta teoría electro-kinética de floculación aplica no solo a las partículas de arcilla, sino también a otros grupos de materiales coloidales encontrados en los agregados del suelo., por ejemplo hidróxidos de hierro y aluminio que tienen una carga positiva neta y otras partículas orgánicas.

Existen dos fuerzas que actúan sobre los agregados de acuerdo a Farres (1980) estas causan el rompimiento de un agregado del suelo por el impacto de la lluvia. Primero, una vez que las gotas de lluvia golpean un agregado del suelo parte del agua es salpicada y otra porción es absorbida por el agregado del suelo. El agua absorbida desestabiliza el estatus electro-kinético y electro-químico del agregado reduciendo la fuerza de los puentes dipolares originales del agua uniendo la arcilla a otros componentes de los agregados. Por lo que se reduce las fuerzas internas de estos. Otra distorsión a los agregados es causada por la entrada de moléculas de agua en la red cristalina de los minerales arcillosos. Esto causa una expansión y contracción en el mineral arcilloso. Un proceso similar ocurre en las sustancias orgánicas. Adicionalmente el agua reemplaza el aire que ocupan los microporos, pero el aire queda atrapado no encontrando escape por lo tanto se incrementa la presión interna y finalmente explota el agregado. Esta descripción causa el colapso de los agregados del suelo y es considerado el mecanismo el cual envuelve el rompimiento de los agregados y la subsecuente erosión del suelo.

Cuando las gotas de lluvia caen producen un cráter en el agua debido al impacto del golpeo de gotas. Las gotas de agua producen chorros de agua los cuales salpican radialmente desde los ejes

centrales de las gotas que caen (Reeve, 1982). Los flujos de chorro teóricamente se mueven a velocidades cercanas a los 70 m/s, de acuerdo a Eppink y Stroosnijder, 1994 citado por Okoth, P., 2003). En sus mediciones experimentales las velocidades van desde 30 m/s. Estos chorros causan un salpicamiento de las partículas del suelo alrededor, las cuales algunas veces van en suspensión y son llevadas por los flujos de agua en el proceso erosivo. Algunas de las partículas pueden formar un sello en la superficie del suelo o pueden fluir dentro de los poros resultando en un “atascamiento” del flujo interno del suelo. Ambos procesos resultan en un decremento drástico de la tasa de infiltración y consecuentemente en un incremento del escurrimiento superficial.

El incremento de la velocidad lateral del chorro es el resultado de que inicialmente se tengan altas presiones de las gotas lo que es responsable del desprendimiento del suelo (Ghadiri y Payne, 1977). Los flujos de chorro ejercen grandes fuerzas cortantes sobre la superficie del suelo y pueden causar compresión y formación de grietas sobre las micro- irregularidades de la superficie del suelo. El flujo de chorro incrementa grandemente la susceptibilidad del suelo a fallas de tensión y se cree que es el proceso más dañino en el proceso de desprendimiento del suelo por impacto de la lluvia.

En cuanto al proceso de transporte, mencionaremos a la turbulencia, un fenómeno de explosión y barrido durante el flujo, el cual es la mejor explicación de por qué las partículas se elevan en una corriente de fluido. La velocidad de flujo no es igualmente distribuida sobre la profundidad del flujo. En un flujo laminar, la velocidad incrementa al cuadrado de la profundidad desde el fondo del flujo (Horton *et al.*, 1934) lo que significa que la capa de agua superficial es mucho más rápida que la que está cercana al suelo. Esto crea turbulencia mediante remolinos en forma de “herradura” que empujan hacia adelante los flujos superficiales más rápido, y crea una alta inestabilidad en el sistema de tal forma que causa un colapso en el sistema de flujo. Este colapso produce alta turbulencia, la cual es responsable de que se eleven las partículas en la corriente de agua. Este proceso cíclico y continuo ayuda a las partículas del suelo a elevarse y ser transportadas en un flujo de masa de agua en forma de erosión.

Dependiendo del tamaño de la partícula, estas pueden ser arrastradas o laminadas sobre la superficie del suelo como una plataforma de carga que las levanta en el flujo y son transportadas en suspensión. En el flujo laminar poco profundo la velocidad es pequeña. Sin embargo, la

pérdida de suelo es incrementada por la energía suministrada por el golpeteo de las gotas de lluvia.. El impacto de las gotas causa turbulencia en el flujo. Las partículas son lanzadas y luego asentadas, y nuevamente se lanzan hasta que son llevadas a los canalillos. Mutchler y McGregor (1983) encontraron en sus experimentos que la máxima pérdida de suelo ocurrió en flujos con profundidades de 2 mm.

Estas descripciones del proceso erosivo nos muestran las fuerzas físicas que están involucradas en las interacciones entre gotas de lluvia y suelo. Lo que nos sugiere que muchas de las prácticas de conservar y/o rehabilitar el suelo procuran disminuir las velocidades de escurrimientos, atrapar sedimentos, incrementar los contenidos de humedad. Pero en la mayoría de las ocasiones las prácticas vegetativas son solo auxiliares a las obras de conservación y no se consideran como actividades primarias para reducir o contrarrestar los efectos del impacto de las gotas de lluvia. Por otra parte la implementación de prácticas vegetativas o agroforestales implican en muchas ocasiones más conflictos en su establecimiento ya que pueden disminuir el área de cultivo y son indicativos de un emergente cambio en el uso de la tierra.

3.7. Métodos para evaluar el Riesgo a la Erosión

3.7.1. Modelos predictivos matemáticos

El desarrollo de modelos matemáticos para estimar la pérdida de suelo inicio con Zingg (1940) quien relaciono la perdida de suelos con la longitud de la pendiente y a su gradiente. Smith (1941) incluyo factores que tuvieran relación entre la pérdida de suelo, los cultivos y prácticas de conservación. Musgrave (1947) añadió el factor de lluvia, lo que produjo la ecuación de Musgrave. Finalmente la colección de datos y el análisis de 10,000 parcelas anuales en 49 localidades llevo a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) cuyos autores fueron Wischmeier y Smith (1978) . Donde esta ecuación hasta nuestros días es una herramienta básica para la conservación del suelo en la nación americana y otros países. La famosa ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Donde A es la pérdida media anual del suelo en ton/ha. R es la erosividad de la lluvia y es calculada desde cartas de precipitación de lluvias erosivas durante un periodo de 22 años y representan la erosividad media anual para ese periodo. El factor K es la erodabilidad del suelo, e indica la susceptibilidad a las fuerzas erosivas y da la cantidad de pérdida de suelo por unidad erosiva. Los factores L, S, C y P son expresados como relaciones de la pérdida de suelo sobre una parcela unitaria.

La USLE fue diseñada para predecir la pérdida anual de suelo en las formas de erosión laminar y en canalillos a nivel de parcela. El modelo es una ecuación agrupada y no considera la depósito ni predice la producción de sedimentos. La USLE estima la erosión desde pendientes moderadas y texturas de suelo medias. Por lo que su uso puede ser inexacto en pendientes muy inclinadas y texturas o arcillosas o arenosas, y en regiones donde las fuerzas erosivas son principalmente desde flujos superficiales (Robinson, 1979). Esta ecuación ha tenido fuerte influencia en los investigadores y por lo tanto ha sido modificada varias veces y han aparecido por ejemplo la Ecuación Universal Modificada de Pérdida de Suelo (MUSLE) y la ecuación revisada de pérdida de suelo (RUSLE).

Williams (1975) y Foster y Meyer (1975) desarrollaron la MUSLE, y lo que solamente ajustaron fue el factor R de la USLE, introduciendo además un factor de escurrimiento hidrológico. Todas las demás características de la USLE quedan igual.

La RUSLE (Renard *et al.*, 1991) incluye mejoras como el uso de un mapa de iso-erodantes para el oeste de Estados Unidos basado en el análisis de datos de más de 1000 localidades. También fueron modificados los factores R obtenidos desde la parte este de la nación americana, donde en pendientes planas se presentan grandes tormentas intensivas. Los datos de erodabilidad a nivel mundial también son incluidos, y el uso de una ecuación que ofrece estimaciones útiles de K como una función del diámetro promedio de las partículas del suelo.

Otro modelo muy usado es el Programa de Predicción Hídrico (WEPP) desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos mediante Lane y Nearing (1989) este es un modelo de simulación continuo que se elaboro para reemplazar la USLE como un instrumento legal de conservación de suelos en los Estados Unidos de América. Aquí se integran otros

modelos determinísticos, y de predicción espacial de la erosión. Este modelo es subdividido en varios componentes, de clima, hidrología, suelos, erosión y depósito. Este también es un modelo agrupado que es aplicado a nivel parcelario en áreas arriba de 250 ha sin canales permanentes. Existe una versión de este modelo a nivel cuenca y que es usado en pastizales con grandes flujos concentrados.

El modelo EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) fue desarrollado por Williams *et al.* (1990). Este fue creado para evaluar las medidas de manejo abarcando décadas incluso cientos de años si es necesario. El modelo utiliza datos diarios y monitorea continuamente las salidas que son de corta duración al igual que el contenido de agua. El área de drenaje considerada en este modelo es de alrededor de 1 ha debido a que suelos y manejo se asumen sean homogéneos. En cuanto a las estimaciones de humedad en sentido vertical en el suelo, solo se puede subdividir este en 10 capas máximo.

EUROSEM es el Modelo Europeo de Erosión del Suelo y fue desarrollado por Morgan *et al.* (1991, 1992) es un modelo que se basa en eventos simples para predecir la erosión del suelo desde parcelas y cuencas pequeñas. Se puede usar para evaluar el riesgo a la erosión y los efectos de las medidas de protección al suelo.

CREAMS (Chemical, Runoff and Erosion From Agricultural Management Systems) fue desarrollado por Knisel *et al.* (1980) y diseñado para planificar prácticas de manejo. El modelo matemático ayuda a la evaluación de la contaminación no-puntual en parcelas. Una parcela es definida como una unidad de manejo que tiene un simple uso del suelo, suelos relativamente homogéneos, lluvia espacialmente uniforme y prácticas de manejo simples.

CREAMS tiene cuatro submodelos: hidrológico, erosión, nutrientes y pesticidas. También incluye módulos que estiman la evapotranspiración y la percolación para realizar balances hidrológicos.

SLEMSA es el Modelo que Estima la Pérdida de Suelo en Sud África, fue desarrollado por Elwell y Stocking (1982) y ha sido usado cuando hay poco dinero y datos disponibles. Trabaja igual que el USLE, sin el factor P.

ANSWERS (Areal NonPoint Watershed Environment Response Simulation) lo desarrollo el grupo de investigadores de la Universidad de Purdue (Beasley, *et al.*, 1980) su objetivo es predecir el efecto del uso de la tierra, manejo y prácticas de conservación o estructuras, sobre la calidad y cantidad de agua para cuencas agrícolas y no-agrícolas mayores a 10,000 ha.

USPED (Unit Stream Power Erosion/Deposition) Modelo de erosión y depósito basado en la unidad de fuerza de corrientes

Un concepto que está siendo usado cada vez más en la modelación de la erosión es la unidad de fuerza de corriente (Yang, 1972). Este concepto incorpora la influencia de la complejidad del terreno, en especial en sitios con alta pendiente en combinación con una representación real de amplio rango de las propiedades del suelo y cobertura superficial. El modelo de erosión y depósito basado en la unidad de fuerza de flujo. (USPED) predice la distribución espacial de la erosión, y tasas de depósito para flujo permanente superficial bajo la condición de exceso de lluvia uniforme. USPED asume que los procesos de erosión se producen con una capacidad de transporte límite. Para este caso, la tasa de flujo de sedimento $qs(r)$ a capacidad de transporte de sedimentos $T(r)$, (Julien y Simons, 1985) se expresa como:

$$|qs(r)| = T(r) = Kt(r) * |q(r)|^m * (\sin \beta(r))^n$$

Donde $q(r)$ es el flujo de agua, $Kt(r)$ es el coeficiente de transportabilidad, m y n son constantes que dependen del tipo de flujo y de las propiedades del suelo. Dentro de una formulación del modelo en 2 dimensiones (2D) el flujo de agua y de sedimentos es representado con un campo de vector bivariado $q(r)=q(x,y)$, $qs(r)=qs(x,y)$ y la tasa de depósito y erosión neta ($D(r)$) es estimada como una divergencia del flujo de sedimentos (Mitasova, 1997, 1999, 2000):

$$D_{(r)} = \nabla * q_{s(r)} = \nabla \cdot [T_{(r)} * s_{(r)}] =$$

$$K_{t(r)} * i \left\{ [\nabla * A_{(r)} * s_{(r)}] * \sin\beta - A_{(r)} * [k_{p(r)} + k_{t(r)}] \right\}$$

Donde $s(r)$ es la unidad de vector en dirección de la pendiente más inclinada, $kp(r)$ es la curvatura del perfil (*curvatura en dirección de la pendiente más inclinada*) y $kt(r)$ es la curvatura tangencial (*curvatura en dirección perpendicular de la gradiente*). El trabajo experimental con esta ecuación es todavía insuficiente como para determinar los valores estándares de las constantes de la ecuación utilizadas en el modelo USPED, por lo tanto el uso de los parámetros de la ecuación de RUSLE ha sido incorporado en la aproximación de los impactos del suelo y cobertura y para obtener una buena aproximación de la erosión neta y depósito. Nosotros asumimos que se puede estimar la tasa de flujo de sedimento a una capacidad de transporte de sedimentos como sigue:

$$T(r) = R * K * C * P * A_m * (\sin\beta)^n$$

Donde $R \approx i^m$, $K * C * P \approx Kt$, $L * S = A(r)^m * (\sin\beta)^n$, y $m = 1.6$, $n = 1.3$ para una condición en la que prevalece la erosión en surcos. Para una condición prevaleciente de erosión laminar las constantes, $m = n = 1$. Luego la erosión y depósito neta (E_d) son estimadas como un cambio en la tasa del flujo de sedimento expresada por la divergencia en el flujo de sedimentos:

$$E_d = \text{div} (T_{(r)} * S) = \frac{\partial (T_{(r)} * \cos \alpha)}{\partial x} - \frac{\partial (T_{(r)} * \sin \alpha)}{\partial y}$$

Donde α [grados] es el aspecto de la superficie de elevación (o dirección del flujo menos la dirección de gradiente). Avances en tecnologías geo-espaciales han estimulado el desarrollo de un amplio rango de herramientas para evaluar y manejar la erosión del suelo dentro de las cuencas. Importantes avances en el control de la erosión se han hecho, sin embargo, quedan problemas significativos que resolver, como el control de la sedimentación de cauces y sistemas de suministro de agua, el transporte de contaminantes y el costo de algunas técnicas de manejo,

especialmente para áreas severamente disturbadas. Mientras que el conocimiento substancial ha sido ganado mediante métodos particulares de control de sedimentos así como por estrategias de manejo de cuencas con efectos promedio en el espacio geográfico, la capacidad de hacer predicciones precisas en interacciones complejas en el paisaje entre procesos de erosión y métodos de manejo. Determinando áreas más efectivas para el diseño e implementación de prácticas de conservación (i.e. selección de proyectos que protegen más suelo o benefician mas superficie por cada peso invertido) que requieren una representación espacial detallada (1 - 10 m de resolución) en un área así como modelos que sean capaces de simular los efectos de variables con condición espacio-temporal sobre el transporte de sedimentos. Mientras que muchas de las herramientas existentes modelan variables de carácter espacial y temporal como la cobertura del suelo y la lluvia, pero en cuanto al cambio de la topografía causada por los procesos de sedimentación y erosión son usualmente descuidados.

Las predicciones de cambios en elevación de la superficie debida a la erosión y depósito han sido el foco de atención de los geomorfólogos (Willgoose et al. 1991, Tucker et al. 2001) mediante la simulación de la evolución del terreno en largos periodos de tiempo (cientos de años) y con la ayuda de bajas resoluciones espaciales, comparado con lo que se hace en el proceso de planeación de control de sedimentos.

Cambios de elevación en periodos cortos son el objetivo principal de los investigadores con datos de alta resolución, por ejemplo para la modelación de riachuelos (Favis-Mortlock et al. 1998). Los cambios en elevaciones pueden ser un componente importante de la funcionalidad de algunas medidas de prevención de la erosión, tal como los cercos protectores. Pero estos también pueden tener un efecto negativo en el control de sedimentos, ya que pueden acelerar la sedimentación de cuerpos de agua y represas, y también pueden desviar los flujos.

Modelos de elevación digital de alta resolución (1-5 m) son ahora muy comunes para grandes extensiones de terreno, además de existir grandes capacidades de análisis computacional, estos recursos proveen oportunidades para incorporar el concepto de cambio del terreno en la modelación de combinaciones complejas de medidas de control de erosión y sedimentación a nivel de cuenca. En este artículo se presenta una propuesta de modelación del terreno mediante modelos de elevación digital que servirán de apoyo para generar información espacial de las

características de los procesos de erosión/depositación con el objetivo de ubicar áreas críticas (hot spot) donde establecer las mejores practicas de manejo y conservación del suelo.

3.7.2. *Modelos de erosión basados en conocimiento de expertos*

En los últimos diez años los Sistemas Expertos (SE) se han utilizado de manera intensiva en resolver problemas de índole ambiental. Entre estos problemas, esta la erosión del suelo que es un proceso que requiere de un conocimiento profundo de los diferentes aspectos que lo producen de parte de los profesionales que toman decisiones. Los SE ayudan a reducir el esfuerzo y tiempo en este proceso.

Las serias consecuencias de la erosión y depósito del suelo son bien conocidos. Actualmente la eficiencia de las medidas de mitigación para reducir el impacto de la erosión del suelo y sedimentación en el ambiente y en cuerpos de agua es poco conocida.

Una falta de técnicos experimentados en definir las mejores prácticas de conservación y la gran cantidad de información necesaria que se tiene que analizar para decidir qué tipos de obras, donde establecerlas y en cantidad deben hacerse, son situaciones que se han resuelto mediante procedimientos de localización cartográfica generalizada a nivel regional y por medio de intuiciones pragmáticas basadas en experiencias empíricas, que en la mayoría de las ocasiones son rebasadas por necesidades, preferencias y razones políticas locales.

El desafío para coleccionar datos, procesarlos, analizarlos y reportar los resultados pueden ser realizados conjuntando una serie de tecnologías de la información y computacionales.

Un ejemplo es el mapa del oeste de Europa elaborado por un grupo de expertos (De Ploey, 1989) quienes delinearon áreas donde de acuerdo a su juicio, los procesos de erosión fueron importantes. La limitante del método es que el autor no ofrece una definición clara de los criterios por la que dichas áreas fueron definidas (Yassoglou *et al.*, 1998).

Otra aproximación usada es el de establecer una puntuación factorial (Morgan, 1995). Un ejemplo es la evaluación de riesgo a la erosión de la región del Mediterráneo CORINE. El análisis está fundamentado en una puntuación factorial para erodabilidad del suelo (4 clases),

erosividad (3 clases) y ángulo de la pendiente (4 clases). Las puntuaciones son multiplicadas, resultando en una calificación combinada que representa el riesgo a la erosión.

Otro método basado en la opinión de expertos se realizó para toda Francia (Montier, *et al.*, 1998) y se procedió a calificar los siguientes factores: cobertura del suelo (9 clases), susceptibilidad del suelo a encostramiento (4 clases), ángulo de la pendiente (8 clases) y erodabilidad (3 clases). Un rasgo interesante de este método es que toma en cuenta los diferentes tipos de erosión que se presentan en áreas agrícolas, viñedos, y montañas. De esta manera, la interacción entre suelo, vegetación, pendientes y clima son considerados en alguna medida.

3.7.3. *Comentarios sobre los modelos de erosión*

Una amplia variedad de modelos están disponibles para evaluar el riesgo a la erosión. Estos pueden ser clasificados en diferentes formas. Por ejemplo hay modelos que trabajan en la dimensión temporal, y son diseñados para predecir pérdida anual de suelo por periodos largos, mientras que otros predicen solamente para simples tormentas (basados en eventos). Alternativamente una distinción puede ser hecha entre modelos agrupados que predicen la erosión de manera puntual, y otros que son espacialmente distribuidos. Otra división práctica es entre modelos empíricos y los que se fundamentan en procesos físicos. La selección de un modelo en particular depende grandemente del propósito al que se pretenda usar y la disponibilidad de datos, tiempo y dinero.

Varios problemas surgen cuando aplicamos modelos cuantitativos a escala regional. Primero, la mayoría de los modelos de erosión fueron desarrollados a una escala de parcela o lote experimental, lo cual significa que están diseñados para ofrecer estimaciones a nivel puntual. Cuando estos son aplicados a grandes extensiones, los resultados tienen que interpretarse con mucho cuidado. Por lo tanto no podemos esperar que obtengamos resultados precisos de erosión. También debemos asegurarnos de cuáles son los procesos que el modelo considera. Por ejemplo la USLE fue desarrollada para predecir la erosión entre canalillos, canalillos y laminar. Por lo tanto este modelo no trabajara bien en áreas donde el tipo predominante de la erosión sea en cárcavas, dejando fuera también áreas con movimientos de masa al igual que deslizamientos de tierra.

También a escala regional es casi imposible determinar los datos de entrada del modelo (parámetros de vegetación y suelo) directamente de campo. Usualmente los parámetros del modelo son aproximados cuando se asignan desde mapas de suelos o vegetación. En general sin embargo, esto produce valores de parámetros que son menos precisos que los resultados obtenidos de un muestreo de campo. Debido a todo esto, los valores de erosión obtenidos son relativos, pero generalmente son más seguros que valores absolutos.

Esto no es necesariamente un problema, siempre y cuando uno se asegure que los resultados del modelo nos den una visión amplia del patrón general de las diferencias relativas, más que nos ofrezcan tasas de erosión exactas absolutas. Debido a esto la disponibilidad de los datos de entrada es la consideración más importante cuando seleccionamos un modelo de erosión a escala regional. Tampoco tiene sentido usar modelos sofisticados si los datos de entrada no están disponibles. Se puede correr este tipo de modelos asumiendo ciertas variables y parámetros como constantes. Sin embargo los resultados pueden ser probablemente menos seguros que los resultados obtenidos con simples modelos que demanden menos datos de entrada. Otro aspecto a considerar es la propagación de incertidumbre a través del modelo con los datos de entrada, se deberá tener cuidado de no usar modelos sobre parametrizados cuando la calidad de los datos de entrada es pobre.

Quizás el mayor problema con la modelación de la erosión es la dificultad de validar las estimaciones producidas. A escala regional, generalmente no existen datos para comparar las estimaciones con datos actuales de erosión.

En cuanto a los métodos basados en la experiencia, hay un problema en los resultados ya que son afectados por la manera en que las puntuaciones son definidas. Con respecto a esto, cuando se realizan clasificaciones de las variables (ejemplo, clases de erosión) se pierde información, y los resultados del análisis pueden depender fuertemente de los límites de clase y del número de clases. Por otra parte a menos que algún tipo de peso se otorgue de manera individual a los parámetros dándoles el mismo a todos, lo cual no es realista. Otro aspecto con los pesos es que si buscamos valores reales se dificulta mucho la tarea. Finalmente la calificación factorial produce clases de erosión cualitativas, donde su interpretación es difícil.

3.8. La cobertura del suelo y el uso de la tierra

El Territorio tiene múltiples funciones económicas, ecológicas y culturales, y los usos de la tierra son el resultado de las acciones y decisiones humanas. Mucha investigación se ha conducido en el tema de cambio en el uso/cobertura de la tierra. Estos estudios tienen su origen en diferentes disciplinas, y han resultado en infinidad de metodologías y modelos. El termino *cobertura* denota los objetos naturales y artificiales sobre la superficie de la tierra. Esto está estrechamente relacionado con el termino *uso de la tierra* lo cual se refiere al porque y como la gente la trabaja y como la vegetación y suelos son afectados durante este proceso. Los cambios en el uso/cobertura de la tierra alteran las funciones del sistema terrestre modificando: Los ciclos bio-geo-químicos, el balance de la radiación y la complejidad ecológica. Además, tiene efectos acumulativos de largo alcance a nivel global, tales cambios pueden tener profundas implicaciones ambientales a nivel regional, tales como la reducción de la productividad de la tierra, debido a la degradación del suelo, problemas de contaminación de suelo y agua, reducción de la biodiversidad, y abatimientos de los mantos acuíferos.

Por lo anterior, un mejor entendimiento de las dinámicas en el uso de la tierra y el agua, hará posible proponer alternativas viables, y que sirvan de base para tomar decisiones más informadas. Las actividades humanas, emergen de una multiplicidad de objetivos sociales, y que son considerados la fuente inmediata de los cambios en la cobertura de la tierra. Para entender estos objetivos sociales uno debe analizar las fuerzas motoras subyacentes que motivan y restringen las actividades humanas.

Básicamente hay dos direcciones de investigación para tener un mejor entendimiento de esta casualidad entre actividades humanas y cambio en el uso de la tierra. La primera está basada en términos del “espacio” donde nosotros analizamos los patrones de cambio de uso de la tierra y su relación con los factores sociales y económicos. El segundo está basado en el factor “social”, donde se analizan los procesos de comportamiento (costumbres locales/ programas políticos) y de toma de decisiones del uso de la tierra, y que con frecuencia se conectan a un contexto espacial.

La modelación del proceso erosivo del suelo usa datos históricos de uso de la tierra, y esto ofrece una oportunidad única para estudiar los impactos de dichos cambios en el actual uso de la tierra sobre las tasas de erosión y las descargas de sedimentos. En este contexto, recientes cambios en

el paisaje inducidos por decisiones políticas y económicas son parte de la información compleja necesaria para desarrollar los planes futuros de las cuencas. Especial atención debe darse a la distribución espacial de estos procesos y su asociación con las condiciones ambientales locales, la utilización de la tierra y la producción agrícola. Este conocimiento es crucial para tomar decisiones efectivas en el manejo de la tierra, la mitigación de los procesos de degradación y la optimización de la estructura del paisaje para un desarrollo sustentable.

3.9. La Capacidad de Uso de las Tierras

Según la definición que ofrece el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), menciona que la Capacidad de Uso de las Tierras es un *“sistema que agrupa suelos principalmente sobre la base, de su capacidad para producir cultivos comunes y pastos sin que se deteriore en un largo periodo de tiempo”*. Esta evaluación requiere de un análisis complejo de numerosas características de la misma tierra que permitan diferenciar la capacidad de la tierra para usos específicos.

La importancia para clasificar las tierras estriba en buscar el mejor uso posible mediante conocer sus capacidades y sus limitaciones, además se pueden obtener predicciones confiables en cuanto a su capacidad productiva, también se pueden establecer actividades de manejo pertinentes que tengan como objetivos el reducir la degradación y mejorar o mantener los niveles productivos.

El método más conocido para la clasificación de la Capacidad de Uso es el generado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Klingebiel y Montgomery-USDA, 1961) que es un sistema categórico que, en su versión original, utiliza criterios cualitativos. La inclusión de un suelo en una clase se efectúa de una manera inversa, es decir, no buscando de forma directa la idoneidad, sino su grado de limitación respecto de un parámetro en función de un uso concreto. Para clasificar un suelo se utilizan un conjunto de características. En un principio Klingebiel y Montgomery utilizaron unos que definen la capacidad productiva (intrínsecos: profundidad del suelo, textura/estructura, permeabilidad, pedregosidad, rocosidad, salinidad, manejo del suelo; extrínsecos: temperatura y pluviometría) y otros que valoran la pérdida de productividad (pendiente del terreno y grado de erosión). Pero los distintos autores que han utilizado este método han ido cambiando los parámetros diferenciadores según sus necesidades (se han introducido valores de materia orgánica, pH, grado de saturación,

capacidad de cambio de cationes, carbonatos). Además es frecuente que en su aplicación se introduzcan criterios cuantitativos (se obtienen medidas de cada uno de los parámetros y a cada clase se le asignan unos intervalos de cada parámetro).

En esta clasificación se consideran cinco sistemas de manejo agrícola: laboreo permanente, labores ocasionales, pastos, bosques, reservas naturales. Se trata de un sistema que busca la producción máxima con mínimas pérdidas de potencialidad. Se establecen tres niveles de clasificación: clases, subclases, y unidades. Se definen 8 clases con limitaciones de utilización crecientes desde la I (la mejor) a la VIII (menos apta).

Este sistema aunque es amplia aplicación, reside en él la restricción de su uso en sistemas agrícolas temporaleros de subsistencia y en laderas pronunciadas. Ya que fue diseñado para agricultura intensiva de alta tecnología.

Por lo anterior es necesario llevar a cabo métodos realistas a la situación del país. T.C.Sheng, (1981) desarrollo un método para evaluar la capacidad de las tierras en condiciones de labranza de ladera, este método maneja el concepto de Capacidad de Uso Mayor de la tierra que clasifica en cinco categorías de C1 a C5.

Los dos métodos clasifican las tierras tomando en cuenta las potencialidades y limitaciones de los suelos. Esta última es aceptada por la FAO y aplicable a países de Latinoamérica en zonas montañosas, clasificando las tierras por su capacidad de uso mayor bajo ciertos parámetros de evaluación.

Por lo anterior es necesario definir algunos conceptos para hacer más entendible el proceso de clasificación, y sus alcances.

3.9.1. Capacidad de uso Mayor.

En esta propuesta se entiende por capacidad de uso de la tierra, la capacidad potencial natural de una determinada clase de tierra para prestar sosteniblemente a largo plazo determinados bienes o servicios, incluyendo los de *protección y ecológicos*. La clasificación y evaluación de los suelos son fundamentales para el ordenamiento territorial y la planificación económica de cualquier región y utilizar técnicamente las tierras con vocación agropecuaria, forestal, para una ejecución de proyectos, como agroindustriales y otros planes de desarrollo del sector agropecuario.

La clasificación de tierras según su capacidad de uso, se basa en los efectos combinados de clima y las características permanentes de los suelos. Capacidad productiva de la tierra, limitaciones en el uso de la tierra, riesgos de dañar el suelo y requerimiento de manejo de los suelos. Esta clasificación, une a los suelos basándose en rasgos del terreno superficial y en las propiedades de los suelos que pueden ser evaluadas por observación y al tacto, clasificándolos en tres categorías: clases, subclases y unidades.

3.9.2. Aptitud de uso de la tierra

La aptitud de uso de la tierra se refiere a la capacidad de ésta para su aprovechamiento bajo una categoría o tipo de utilización (cultivo específico, tipo de ganado, o especie forestal de interés), desde el punto de la producción agropecuaria y /o forestal, en condiciones naturales.

3.9.3. Diferencias entre Capacidad y Aptitud

La capacidad se refiere a las clases generales de utilización de la tierra, en vez de sistemas específicos de utilización de tierras (tipos de utilización de la FAO), por los cuales hablamos acerca de aptitud de unidades de tierra. Por lo tanto no podemos esperar realizar reportes detallados acerca de utilización y manejo de tierras en una clasificación de la capacidad. (Rossiter, 1998)

*Tierra **contra** Suelo*

Se define tierra como un área de la superficie terrestre cuyas características incluyen todos los atributos de la biosfera razonablemente estables o reduciblemente cíclicos, ya sea encima o debajo de dicha área; incluyendo aquellos de la atmósfera, el suelo, la geología subyacentes, la hidrología, las poblaciones de plantas y animales y los resultados de la actividad humana pasada y presente; en la medida que estos atributos ejerzan una influencia significativa en su uso. (FAO, 1985).

3.10. Sistemas de Información Geográfica

Todos los días nos enfrentamos a situaciones que requieren de relaciones espaciales o geográficas y del espacio mismo para actividades cotidianas. Los sistemas de información Geográfica (SIG)

evolucionaron como un medio para ensamblar y analizar diversos datos espaciales. Dichos sistemas evolucionaron desde hace siglos en cuanto a la construcción de mapas y la compilación de datos.

El primer SIG fue el Sistema de Información Geográfica Canadiense (CGIS), diseñado a mediados de la década de 1960 como un sistema de medición cartográfico computarizado. El CGIS fue desarrollado por Roger Tomlinson y sus colegas del Inventario Canadiense de Tierras. Este proyecto pionero dio la entrada a mucha tecnología y ahí se acuñó el nombre de SIG. El rápido desarrollo de poderosas computadoras llevó a una aceleración en el uso de los SIG. En las décadas de 1970 y 1980 algunos sistemas evolucionaron para reemplazar los cálculos cartográficos manuales. La producción factible de sistemas estuvo disponible a finales de la década de 1970. Pero los SIG realmente iniciaron a despegar a principios de la década de 1980, cuando el precio de las computadoras bajaron a un nivel que la industria de software pudiera sostener con aplicaciones efectivas a costos no tan altos. El mercado de software de SIG continuó creciendo, el costo de las computadoras siguió bajando y se incrementó su poder.

3.10.1. Definiciones

Existen muchas definiciones para los SIG, pero en todas estas se reconoce que los datos espaciales son únicos debido a que su localización geográfica es un importante atributo de actividades, políticas, estrategias, y planes. Por lo que se presentan algunas de estas definiciones: Por ejemplo Ducker (1979) menciona que un SIG “es un caso especial de sistemas de información donde la base de datos consiste de observaciones de rasgos, actividades o eventos distribuidos espacialmente, los cuales se pueden identificar en el espacio como puntos, líneas, o áreas. Un sistema de información geográfico manipula datos relacionados con estos puntos, líneas y áreas y recuperarlos y hacer consultas y análisis ad hoc.

Por otro lado Star y Estes (1990) definen el SIG como “un sistema de información que está diseñado para trabajar con datos referenciados por coordenadas geográficas o espaciales. En otras palabras, un SIG es tanto un sistema de base de datos espacialmente referenciados con capacidades específicas, así como también por un conjunto de operaciones para trabajar con dichos datos.

Las definiciones cambian un poco su sentido en función de las capacidades en hardware y software que iban integrándose en el mercado. Vemos el caso de Burrough y McDonnell (1998), que definieron el SIG “como un conjunto poderoso de herramientas para almacenar y recuperar a voluntad, transformar y desplegar datos espaciales desde el mundo real para un propósito específico”

De la misma manera podemos analizar la siguiente definición, Clarke (2001) que dice que un SIG “es un sistema automatizado para la captura, almacenaje, recuperación, análisis, y despliegue de datos espaciales”.

Hay quien añadió elementos importantes como la siguiente. Davis (2001) que define el SIG “una tecnología computarizada y metodología para coleccionar, manejar, analizar, modelar y presentar datos geográficas para un amplio rango de aplicaciones”

Worboys y Duckham (2004) definieron de esta manera, “un sistema de información que permite capturar, modelar, almacenar, recuperar, intercambiar, manipular, analizar, y presentar datos geográficamente referenciados”

Más recientemente Longley *et al.* (2005) definieron el SIG así “es una clase especial de sistema de información que da seguimiento no solo de los eventos, actividades, y cosas, sino también donde estos eventos, actividades y cosas suceden o existen”

Los SIG constan de seis componentes principales (Zeiler 1999, Longley *et al.* 2005):

Personas: Es el más importante, ya que debe saber cómo desarrollar procedimientos y definir las tareas para que trabaje el SIG. El personal puede con frecuencia superar las deficiencias en otros componentes del SIG, pero no lo contrario.

Datos: Son completamente críticos para el SIG, contiene tanto datos geográficos como atributos. La disponibilidad y precisión de los datos afectan los resultados de las consultas y análisis.

Hardware: Son los dispositivos con los que el usuario interactúa para llevar a cabo las operaciones SIG. Estos suelen ser, la computadora, digitalizador, escáner, impresoras, etc. Las capacidades de estos dispositivos afectan la velocidad de proceso, facilidad en su uso.

Software: Este incluye no solo el sistema del SIG sino también sistemas de bases de datos, dibujo, estadísticos, análisis de imágenes y otros.

Procedimientos: Se requieren métodos bien definidos y consistentes para producir resultados correctos y reproducibles.

Red: La red permite una rápida comunicación e intercambio de información digital: El internet ha sido el vehículo para intercambiar y hacer aplicaciones de SIG.

3.10.2. Modelos de datos SIG

El mundo real es muy complejo para modelar, de tal forma que solo áreas específicas sean seleccionadas para incluirlas en una aplicación de SIG. Una vez que el área de estudio se selecciono, lo que sigue es seleccionar los rasgos que son relevantes para nuestra aplicación. La idea es que hagamos una abstracción del mundo real para lo cual usamos modelos simplificados, de tal forma que podamos describir y representar aspectos seleccionados del mundo real en una computadora. Por lo que se tienen dos modelos de datos para SIG:

Modelo de Datos Vector: Las bases de este modelo es suponer que el mundo real puede ser dividido en elementos claramente definidos (rasgos) donde cada elemento consiste de un objeto identificable con su propia geometría de puntos, líneas o áreas. Los datos vectoriales representan las formas de los rasgos en una forma precisa y compacta mediante un conjunto ordenado de coordenadas con atributos asociados. Puntos (estaciones meteorológicas) son registradas con un solo par de coordenadas, las líneas (carreteras) como una serie de pares de coordenadas ordenadas, los polígonos (parcelas) como una o mas segmentos de línea que cierran para formar un polígono. Los modelos vectores son particularmente útiles para representar y almacenar rasgos discretos tal como edificios, o parcelas.

Modelo de Datos Raster: En este modelo el mundo real es representado como una superficie que es dividida en una malla regular de celdas. Las coordenadas x,y de al menos una esquina de la malla son conocidas. Estos modelos son útiles para almacenar y analizar datos que son continuos a través de un área. Cada celda contiene un valor que puede representar una membrecía de una clase o categoría, una medición o un valor interpretado. Los datos raster incluyen imágenes y cuadrículas (grids). Las imágenes tales como imágenes de satélite y fotografías aéreas, o imágenes escaneadas, son frecuentemente usadas para generar datos en un SIG. Los Grids

representan datos derivados y son frecuentemente usados para analizar y modelar. Ellos pueden ser creados desde puntos muestreados o convirtiendo datos vectoriales a raster.

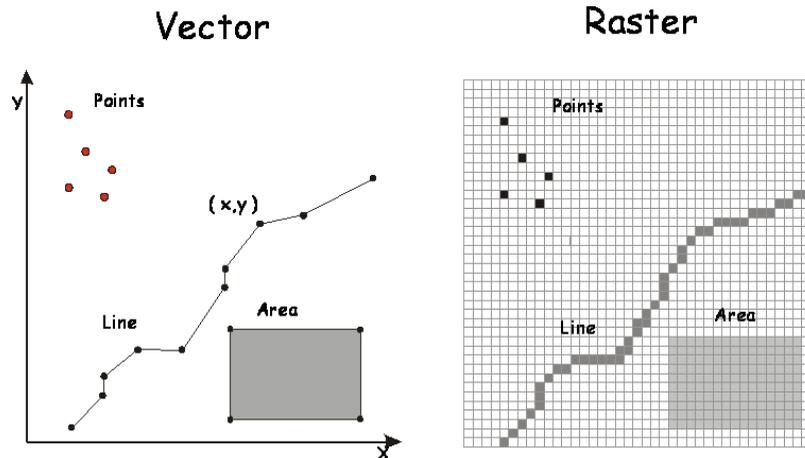


Figura 2. Modelos de Datos Vector y Raster (adaptado de Bolstad 2002)

3.10.3. Funciones del SIG

Cualquier SIG debe ser capaz de hacer seis operaciones fundamentales para encontrar soluciones a problemas geográficos. Estas funciones son: capturar, almacenar, consultar, analizar, desplegar y salida de resultados. (Zeiler 1999, Bolstad 2002).

Captura de Datos: Las bases de datos geográficas son costosas y llevan mucho tiempo construirlas. El SIG debe ofrecer un método eficaz de introducir datos geográficos como atributos al sistema. Debe tener métodos de captura sencillos y versátiles.

Almacenaje de Datos: Se utilizan dos modelos básicos usados para almacenar datos geográficos: vector y raster, el sistema debe ser capaz de almacenar estos tipos de datos.

Consulta de Datos: Deberá contener los métodos para encontrar rasgos específicos basados en su localización o atributos. Las consultas son creadas con declaraciones o expresiones lógicas, y son usadas para seleccionar rasgos en el mapa y sus registros en la base de datos.

Análisis de Datos: El análisis geográfico implica la utilización de muchas capas y se requiere hacer una serie de pasos para lograr un resultado. El SIG debe ser capaz de analizar relaciones

geográficas entre múltiples conjuntos de datos para responder preguntas y resolver problemas. Hay muchos tipos de análisis geográfico. Los dos tipos comunes de análisis geográfico se describen a continuación:

- *Análisis de Proximidad*. Utiliza la distancia entre rasgos para responder a preguntas como: Que proporción de determinado cultivo esta dentro de los 500 m de un pozo?
- *Análisis Sobreposición (Overlay)*. La integración de diferentes capas involucra un proceso llamado sobreposición. Funciona juntando una o más capas de diferentes temas.

Despliegue de Datos: Mediante el uso de simbologías. Para muchos tipos de operaciones de análisis geográfico, el resultado final es mejor visualizado y entendido como un mapa, gráfico o reporte.

Salida de Datos: El intercambio de resultados de su labor geográfica es una de las justificaciones primarias para gastar recursos en un SIG. Obtener los productos en forma de mapas, gráficos y reportes en un formato de amplia distribución, es muy deseable.

3.11. Apoyo a las Decisiones Espaciales (geográficas)

Toda acción que es generada por las personas o de manera natural tiene un efecto geográfico y puede ocurrir en cualquier lugar. Las decisiones espaciales son parte del diario acontecer de individuos y sociedades. La forma en que hacemos decisiones esta influenciada por localización, al seleccionar lugares donde vivir, donde divertirse, donde comprar, etc. Las organizaciones no distan mucho de cómo lo hacemos nosotros como individuos, ellos toman en cuenta las realidades de la organización espacial cuando seleccionan un sitio, o seleccionan una estrategia para algún desarrollo, manejo de infraestructuras para la transportación (Jankowski y Nyerges 2001). Hacer decisiones espaciales es un proceso altamente complejo para seleccionar entre alternativas para lograr un objetivo o un conjunto de estos bajo muchas restricciones. Esto puede ser un proceso estructurado donde los problemas a resolver sean mediante soluciones estándar, o también un proceso no-estructurado con problemas que impliquen un procedimiento de solución no muy claro. Incluso problemas semi-estructurados donde se combinen soluciones estándares y

juicios individuales. Todos estos procedimientos generalmente involucran voluminosas cantidades de datos espaciales, conocimiento estructurado y no-estructurado, y juicios y evaluaciones humanas. Por lo tanto hacer decisiones espaciales implican retos multi faceticos, ya que no solamente se necesitan requerimientos técnicos, sino que también sociales, económicos, ambientales y políticos.

Malczewski (1999) definió las características principales de los problemas para hacer decisiones espaciales:

- Hay un gran número de alternativas de decisión
- Los resultados o consecuencias de las alternativas de decisión son espacialmente variables
- Cada una de las alternativas es evaluada en base a múltiples criterios
- Algunos de los criterios pueden ser cualitativos, mientras que otros cuantitativos
- Típicamente hay más de un hacedor de decisiones (o intereses de grupo) involucrados en el proceso
- Los hacedores de decisiones tienen diferentes preferencias con respecto a la importancia relativa de la evaluación de criterios y consecuencias de la decisión
- Las decisiones son frecuentemente rodeadas por incertidumbre

Para resolver estos problemas complejos, usualmente se requiere el uso de información integral e inteligente, un dominio específico del conocimiento y medios efectivos de comunicación (Leung 1997). Aunque los SIG y los Sistemas Expertos (SE) han jugado papeles importantes en resolver problemas de decisión espacial, cada una de estas herramientas tiene sus limitaciones. Por ejemplo el SIG es una formidable herramienta que tiene capacidades de análisis para manipular cantidades enormes de datos geográficos. Sin embargo, tiene capacidades limitadas para incorporar las preferencias del hacedor de decisiones y la heurística en el proceso de resolver el problema. Los SE son capaces de direccionar el análisis heurístico, no cuentan con las capacidades de manejar datos y conocimiento espaciales que son cruciales para el análisis espacial.

Las limitaciones inherentes en ambas tecnologías han llevado a los investigadores a sugerir que el proceso de hacer decisiones es mediante la integración de ambas tecnologías.

Considerar a los SIG como una herramienta que apoya las decisiones, nos lleva a pensar que capacidades principales tiene para cumplir con este objetivo. Estas se pueden describir de la

siguiente manera: Los SIG describen problemas y relaciones espaciales; almacenan y manejan grandes cantidades de datos espaciales que son heterogéneos y complejos; se valen de modelos de datos geográficos para estructurar la información disponible, y ofrecen facilidades para desplegar y manipular datos espaciales.

El proceso de hacer decisiones considera tres etapas según el contexto de Simon, y se presentan a continuación: *Inteligencia* (es un problema o una oportunidad de cambio?), *Diseño* (cuales son las alternativas?), y *Selección* (cual alternativa es la mejor?). De acuerdo a esto Malczewski (1999) concluyo que: Los SIG comercialmente disponibles se enfocan solamente en la primera fase del proceso de hacer decisiones, ya que tienen la capacidad de integrar, explorar, y presentar información en una forma entendible para los que toman decisiones.

Añade que los SIG disponibles tienen capacidades limitadas para apoyar las fases de diseño y selección. Y concluye que estos sistemas tienen un ambiente de modelación estático y por lo tanto se reduce su alcance como herramienta que apoya a las decisiones, especialmente en el contexto de problemas que involucran decisiones colaborativas.

Es claro que los SIG aunque cuentan con herramientas de análisis geográfico poderosas, no cuentan con la funcionalidad de modelación analítica, y tienen un bajo nivel de inteligencia en términos de representación y procesamiento del conocimiento (Fisher 1994).

3.12. *Sistemas Expertos*

Estos sistemas se están convirtiendo rápidamente en la vanguardia de la Inteligencia Artificial. Esta tecnología a evolucionado al punto de que su desarrollo e implementación está siendo bien entendido y factible en muchos ámbitos.

Un Sistema Experto (SE) es un programa de computadora que incorpora la experticia de uno o más expertos dentro de un área de conocimiento y aplica este conocimiento para hacer inferencias útiles para el usuario del sistema. Firebaugh (1988) definió los sistemas expertos como “programa de computadora que pueda asesorar, analizar, categorizar, comunicar, consultar, diseñar, diagnosticar, explicar, explorar, pronosticar, formar conceptos, identificar, interpretar, justificar, aprender, gestionar, monitorear, presentar, recuperar, agendar, probar y tutorear. Estos SE abordan problemas que normalmente requieren especialistas humanos para su solución”.

Los SE llevan a cabo tareas de hacer decisiones mediante razonamiento usando reglas específicas que han sido evaluadas por expertos en su dominio que sean verdaderas. Estas serán las reglas más adecuadas para problemas mal estructurados.

Es reiterativo en este tema de sistemas expertos los conceptos de tareas o problemas mal estructurados o semi-estructurados. Doukidis (1988) explica estas diferencias, y se refiere a que las tareas semi-estructuradas pueden ser entendidas al conocer cuales son las estructurados y las no-estructurados. Las tareas estructuradas son repetitivas y rutinarias bajo un procedimiento definido. Estas tareas rara vez necesitan un supervisor. Las decisiones en estas situaciones están bien entendidas y se les han otorgado a los trabajadores o han sido automatizadas.

Las tareas no-estructuradas son aquellas que no cuentan con un procedimiento para llevarlas a cabo. Pueden ser tareas nuevas que se conozca poco o nada su procedimiento o muy complejas. Un supervisor enfrenta estos problemas no-estructurados a través de su amplia experiencia, juicio subjetivo y algunas veces por inspiración.

Estos problemas no pueden ser formulados con precisión. Finalmente las tareas semi-estructuradas son decisiones donde el juicio del supervisor a la larga no es adecuado, quizás por el tamaño o complejidad del problema. Por otro lado, los modelos matemáticos/analíticos son también insuficientes debido a suposiciones simplificadas inherentes a estos. Además el supervisor y la computadora trabajan juntos.

Para poder construir un Se requiere del apoyo de “Expertos”, pero quienes son estos?

Un experto es una persona que tiene un conocimiento especial, juicio acertado, experiencia y métodos, que le permiten aplicar estos talentos para dar soluciones o recomendaciones a problemas específicos.

Su trabajo consiste entonces en ofrecer su conocimiento acerca de cómo hacer cierta tarea que un sistema pueda llevar a cabo. El experto conoce cuales son los hechos mas importantes y entiende el significado de las relaciones entre estos. En si la definición de un experto no es estándar, pero hay algunas características que distinguen a los expertos. Primero, debe ser capaz de resolver un problema y lograr un desempeño significativamente mejor que el promedio. Segundo, los expertos son relativos. Un experto en un tiempo o lugar diferentes dejan de ser expertos.

Los expertos cuentan con experticia que les ayuda a resolver problemas y a explicar el fenómeno o proceso, típicamente los expertos humanos son capaces de hacer lo siguiente:

- Reconocer y formular el problema
- Resolver el problema rápido y bien
- Explicar la solución
- Aprender de la experiencia
- Reestructurar el conocimiento
- Romper las reglas si es necesario
- Determinar la relevancia
- Es consciente de sus limitaciones

Pero como una persona se hace experta? y como se hace de “la experticia”, para entender esto hay que definir este concepto.

Experticia: Un conocimiento específico que pertenece a un experto y que es extensivo para desempeñar una tarea específica. El nivel de la experticia determina el rendimiento de la decisión. La experticia es frecuentemente adquirida, mediante entrenamiento, la lectura o experiencia de adquirida en la práctica. Esta incluye conocimiento explícito, tal como teorías aprendidas en libros o lecciones, y un conocimiento implícito ganado de la experiencia. A continuación veremos qué tipos de conocimiento existe:

- Teoría acerca del dominio del problema
- Reglas y procedimientos con respecto al dominio del problema
- Reglas (heurística) acerca de qué hacer en una situación o problema determinado
- Estrategias globales para resolver estos tipos de problemas
- Meta conocimiento (conocimiento acerca del conocimiento)
- Hechos acerca del área problema

Los expertos que cuentan con las características arriba mencionadas son capaces de hacer más rápido su trabajo y de mejor calidad que los no expertos. La experticia tiene las siguientes características:

- Es asociada con un alto grado de inteligencia, pero no necesariamente con las personas más inteligentes
- La experticia es usualmente asociada con una vasta cantidad de conocimiento
- Los expertos aprenden de sus éxitos y sus errores
- El conocimiento del experto está bien almacenado, organizado y rápidamente se puede recuperar de un experto
- Los expertos pueden llamar patrones de su experiencia (excelente memoria)

3.12.1. Estructura de un Sistema Experto

Los sistemas expertos cuentan con dos tipos de ambientes: un **ambiente de desarrollo** y el **ambiente de consulta** (runtime). El ambiente de desarrollo es usado por un SE como un constructor de componentes y coloca el conocimiento en la base de conocimientos. El ambiente de consulta es usado por no-expertos para obtener ese conocimiento y sus recomendaciones.

Los tres principales componentes que aparecen en casi todo SE es **la base de conocimientos, el motor de inferencias** y la interface del usuario. Un SE que interactúa con los usuarios puede también contener los siguientes componentes:

- Subsistema de adquisición de conocimiento es la acumulación, transferencia y transformación de la experticia para resolver el problema desde los expertos o fuentes de conocimiento documentadas, que van a un programa de computadora para construir o expandir la base de conocimientos. Las fuentes potenciales del conocimiento incluyen, expertos humanos, libros de texto, documentos multimedia, bases de datos, reportes de investigación. Adquirir el conocimiento de los expertos es una tarea compleja que con frecuencia origina cuellos de botella en la construcción del SE. Típicamente la ingeniería del conocimiento ayuda al experto a estructurar el problema para interpretar e integrar respuestas a preguntas, trazar analogías, contrastes y trayendo a la luz dificultades conceptuales.
- Conocimiento base contiene conocimiento relevante necesario para entender, formular y resolver problemas. Esto incluye dos elementos básicos: 1) hechos, tales como la situación del problema y la teoría del área problema, 2) heurística especial o reglas que direccionan el uso del conocimiento para resolver problemas específicos.

- Motor de inferencias es el cerebro del SE es donde se lleva a cabo el control de la estructura o donde se interpretan las reglas. Este componente es esencialmente un programa de computadora que ofrece una metodología para razonar acerca de la información en la base de conocimientos y formular conclusiones. También ofrece dirección acerca de cómo usar la base de conocimientos.
- Interface de usuario contiene un procesador de lenguaje para comunicar de manera amigable entre el usuario y la computadora. Puede ser mediante la aproximación pregunta-respuesta o a veces suplementada con menús electrónicos.
- Espacio de trabajo es un área de memoria de trabajo junto a las bases de datos para la descripción del problema actual, donde se especifica la entrada de datos o para registrar hipótesis intermedias y decisiones. Hay tres tipos de decisión que pueden ser registradas sobre el espacio de trabajo: un plan (como atacar el problema); una agenda (acciones potenciales listas para ejecutar), y una solución (hipótesis candidatas y caminos alternativos de acción que el sistema ha generado)

3.12.2. Sistemas Expertos y Sistemas de Información Geográfica

Las capacidades distintivas de los SE son: Manejar datos imprecisos, incompletos y conocimiento inexacto; aprovechar los conocimientos en el momento adecuado; explicar y justificar las razones que llevan a una conclusión, y cambiar o ampliar el conocimiento con relativa facilidad.

Por lo tanto podemos usar técnicas de representación del conocimiento para caracterizar dominios de la toma de decisiones, usar métodos heurísticos para generar y evaluar opciones de decisión, aplicar inferencia y razonamiento para explicar y justificar las decisiones.

La relación de los SE y los SIG inicia a finales de la década de 1980. Desde entonces se han construido muchos sistemas expertos para resolver problemas de selección de sitios que dependen fuertemente del juicio y experiencia de las personas. Estos sistemas han usado conocimiento simbólico con la finalidad de construir un entendimiento humano de los problemas para evaluar y seleccionar estos sitios. Debido a que el conocimiento simbólico no es muy

adecuado para describir la naturaleza espacial en la selección de sitios, los Sistemas Expertos no cuentan con un mecanismo que deriven a soluciones basadas en el conocimiento espacial (o conocimiento acerca de características posicionales y topológicas) en los diferentes sitios. Por lo que el conocimiento del espacio geográfico es fundamental para llegar a un razonamiento espacial en el proceso de toma de decisiones en la selección de sitios (Jia 2000). Desafortunadamente, sistemas expertos actuales no pueden manejar el conocimiento espacial. Ya que no tienen un método adecuado para codificar y representar a la naturaleza espacial del conocimiento.

Además no pueden enfrentar procesos que los SIG hacen y tienen, como el manejo de localizadores y acciones de referencia geográfica que son cruciales en las decisiones espaciales.

Zhu y Healey (1992) afirmaron que la tecnología de sistemas expertos por si sola no basta para hacer el soporte de toma de decisiones ya que tiene las siguientes limitaciones:

- Se requieren grandes volúmenes de datos espaciales. Estos datos principalmente residen en el SIG y no en el SE. El sistema experto no cuenta con las facilidades para manipular a gran escala conjuntos de datos.
- Los sistemas expertos se concentran en el razonamiento simbólico y no proveen buenas capacidades aritméticas. Sin embargo siempre son requeridas estas operaciones.
- Tampoco cuentan con capacidades de manipulación de datos tales como zonas buffer y sobreposición las cuales son únicas e importantes para el análisis espacial.
- No ofrecen facilidades para representar datos espaciales y visualizarlos

Lilburne et al. (1996) menciono que el conocimiento del dominio representado en un sistema experto, junto con los datos espaciales encontrados en un SIG pueden proveer un ambiente de apoyo a las decisiones en la cual los usuarios son guiados hacia un sistema integrado. Fisher (1994) afirmó que ya no había dudas de que los sistemas expertos son fundamentales en la construcción de una nueva generación de SIG inteligentes.

Moore (2000) señaló que la razón por la que este enfoque tiene un gran alcance en el futuro, es que los SIG sin el elemento de inteligencia tienen una oportunidad limitada para resolver efectivamente problemas de apoyo a las decisiones espaciales en un ambiente complejo e impreciso.

Cuadro 1. Comparación de las capacidades entre un SIG y un Sistema Experto (Adaptado de Lilburne et al. 1996)

Sistemas Información Geográfica	Sistemas Expertos
Adecuado para problemas estructurados y cuantitativos	Adecuado para problemas no-estructurados y cualitativos
Usa representación de objetos con geometría primitiva (puntos, línea y polígono)	Usa símbolos
Integra datos	Integra conocimiento
No es fácil manejar datos incompletos	Maneja conocimiento y datos incompletos
Capacidades espaciales	Capacidades no espaciales
Soporta grandes volúmenes de datos	No soporta bien grandes cantidades de datos
Resultados no fáciles de explicar	Resultados fáciles de explicar
No puede representar y manejar conocimiento	Puede representar y manejar conocimiento
No hay capacidades de razonamiento e inferencia	Funciona con un motor de inferencias
Maneja algoritmos	Oportuno
Variedad en mostrar resultados mapas/gráficos	No tiene capacidades cartográficas
Puede hacer operaciones geométricas eficientemente	No puede realizar con eficiencia operaciones geométricas y aritméticas

Análisis de la revisión de literatura: Si bien el estudio de los procesos erosivos en el mundo es muy amplio y hasta profundo, es innegable el hecho de que hasta en países desarrollados no se ha podido detener de manera significativa este proceso de degradación de los suelos. Vemos acciones paliativas de parte de gobiernos “preocupados” que pretenden combatir los daños producidos por malas políticas públicas en la legislación de usos del suelo, y medidas poco efectivas de conservación de los bosques. En nuestro país y otros de Latinoamérica el recurso suelo no se le ha otorgado la importancia debida, y por lo tanto su cuidado y manejo por parte de las autoridades es casi nulo. Vemos un gran interés de parte de la comunidad académica y de investigadores en el desarrollo de herramientas que cuantifican los procesos erosivos y técnicas de modelación menos onerosas. Conjuntar estas herramientas en sistemas integrados, ya es una realidad en múltiples disciplinas de la ciencia del suelo.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Descripción del área de estudio

Situada al sur del Distrito Federal la delegación de Milpa Alta tiene una superficie de 283.75 km², una de las más extensas del Distrito Federal (la 2^a después de Tlalpan); sin embargo, dos terceras partes de su territorio son montañosas, con alturas que varían entre los 2,300 y los 3,600 metros sobre el nivel del mar; en el resto de la delegación hay estrechos valles y declives suaves. Esta situación origina que en la demarcación se tengan definidas 4 Microcuencas: Cilcuayo, Tláloc, Río Milpa Alta y Río San Gregorio.

Se consideró como unidad de estudio la microcuenca, y se eligieron dos de ellas: Milpa Alta y Cilcuayo, en el Distrito Federal, tienen una superficie de 6,967.18 y 6,575 ha, respectivamente (ver figura). En términos generales el clima que se presenta en las microcuencas de acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1988), es C(w₂) (w) que es templado sub húmedo con lluvias en verano y una temperatura media anual de 14.4° C y una precipitación anual de 878.9 mm. La distribución térmica es poco variante, y se caracteriza por temperaturas frescas durante todo el año.

Los dos tipos de suelos predominantes son derivados de cenizas volcánicas y pertenecen al orden de los Litosoles (76%) y Feozem (21%).

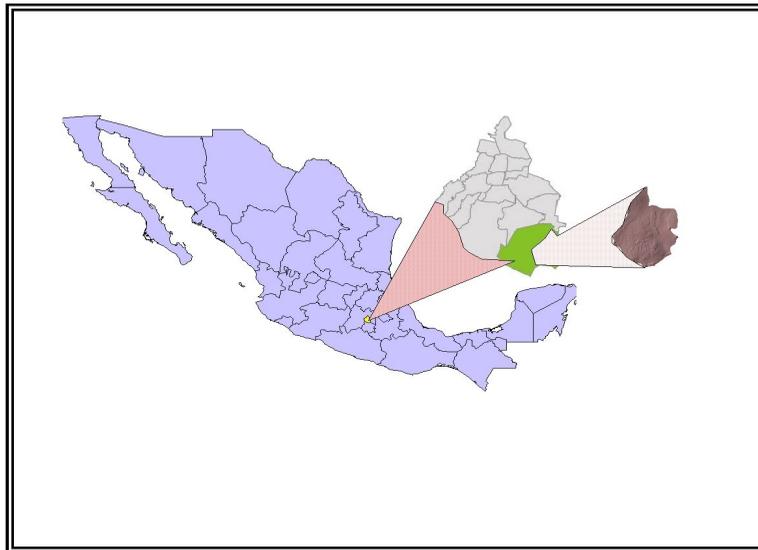


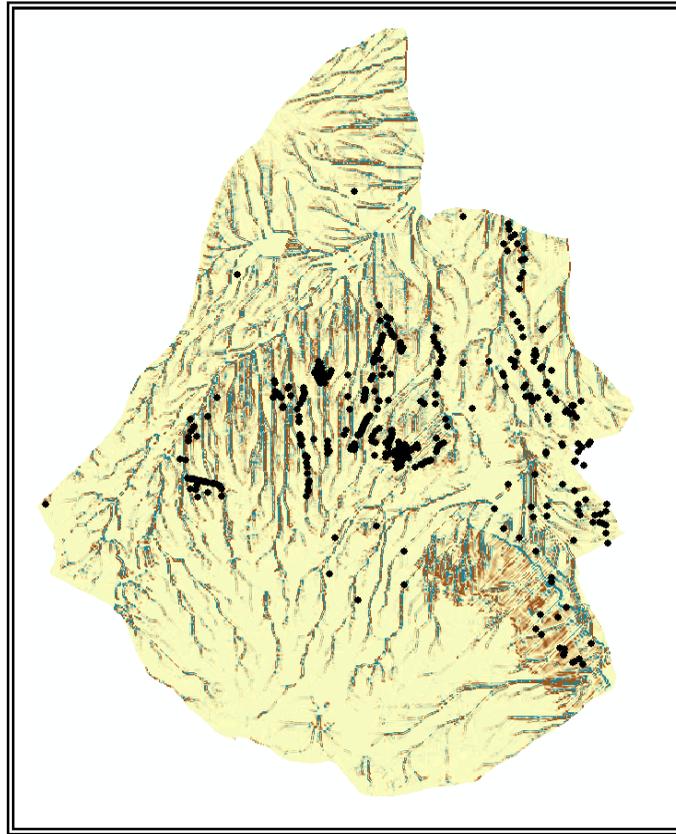
Figura 3 . Ubicación de microcuencas, Delegación Milpa Alta, D.F.

Estas microcuencas son de interés técnico debido a que están consideradas dentro del “Área de Suelo de Conservación” de acuerdo al estudio de Ordenamiento Ecológico del Territorio (2000).

También este estudio reporta que debido a los procesos de crecimiento de la mancha urbana, y la pérdida de zonas con vegetación natural mediante la deforestación se han acelerado los procesos erosivos del suelo. Además la delegación está catalogada por el INEGI (2001) con un Alto grado de Marginación y de acuerdo con Bolvitnik (2002) ocupa el primer lugar en términos de “Pobreza” dentro del Distrito Federal. Dentro de las delegaciones que tienen un área rural, Milpa Alta es la que registra mayor actividad agrícola, ya que aportan el mayor porcentaje de la producción agrícola en la entidad (67.7%), aunque tiene serias limitaciones en cuanto a apoyos técnicos y económicos, las distintas instituciones han apoyado desde 1983 con proyectos de conservación de suelo y agua.

El Ordenamiento Ecológico del Territorio (2000) evaluó el proceso erosivo del suelo y mostró que la Delegación Milpa Alta presenta una Muy alta (> 200 ton/ha/año) y Alta susceptibilidad (50-200 ton/ha/año), en áreas agrícolas donde se produce avena y maíz y en las inmediaciones de áreas boscosas con pastoreo libre.

Las dos microcuencas son todavía objeto de interés en cuanto a construir obras de conservación de suelo y agua. En el año 2007 se llevaron a cabo algunas de estas obras (ver figura) y es preocupante que tanto las acciones de ubicación de obras como la cantidad y tipo de estas no estén regidas por criterios técnicos sólidos, o sustentadas en evaluaciones precisas de los procesos erosivos.



Fuente: COMISION RECURSOS NATURALES, D.F., 2008

Figura 4. Distribución de obras de conservación 2007

4.2. Esquema de trabajo

El trabajo se dividió en varias etapas que cubrieron las siguientes actividades:

4.2.1. Recopilación de datos e información

Se requirió de la cartografía escala 1: 50,000 publicada por el INEGI, con proyección cartográfica en UTM (Universal Transversal Mercator), y con el sistema de referencia WGS 1984. Las temáticas usadas son: Curvas a nivel (20 m), edafología, uso y cobertura del suelo del INEGI (Series I, II 1978, 1997) y OEIDRIUS (Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable, 2005), hidrología superficial y limites de microcuencas (SARH, 1978).

Se realizo la colección de datos meteorológicos de las estaciones con influencia en el área de estudio, con las siguientes variables: temperatura máxima, mínima, media, precipitación y evaporación, con registros de 15 años o más.

Cuadro 2. Estaciones meteorológicas analizadas

CLAVE	ESTADO	NOMBRE	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
9014	D.F.	COL. SANTA URSULA COAPA	-99.117	19.3	
9026	D.F.	MORELOS 77 (IXTAPALAPA)	-99.083	19.367	
9032	D.F.	MILPA ALTA, MILPA ALTA	-99.017	19.183	2420
9034	D.F.	MOYOGUARDA (XOCHIMILCO)	-99.1	19.283	
9041	D.F.	SAN FCO. TLALNE., XOCHIMILCO	-99.117	19.2	
9042	D.F.	SAN GREGORIO ATLAP, XOCHIMILCO	-99.05	19.25	2259
9044	D.F.	SAN LORENZO (MILPA ALTA)	-99.033	19.183	2662
9045	D.F.	SANTA ANA (MILPA ALTA)	-99	19.167	
9052	D.F.	UNIDAD MODELO IXTAPALAPA	-99.117	19.367	2259
9054	D.F.	SAN FELIPE 169 G. ANAYA	-99.167	19.367	2240
9058	D.F.	VERTEDOR MILPA ALTA	-99.017	19.183	2455
9072	D.F.	TEPEPAN (ESC.EAG), XOCHIMILCO	-99.05	19.25	2259
15020	EDO. MÉX.	CHALCO, CHALCO	-98.9	19.267	2280
15039	EDO. MÉX.	JUCHITEPEC, JUCHITEPEC	-98.867	19.1	2860
15050	EDO. MÉX.	LOS REYES, LA PAZ	-98.983	19.367	2245
15094	EDO. MÉX.	SAN LUIS AMECA	-98.967	19.183	2450
15141	EDO. MÉX.	T.AGROP.32 TLALPITZAHUC	-98.9	19.25	2200
15257	EDO. MÉX.	CICITEC, MILPA ALTA	-98.933	19.133	2150
15268	EDO. MÉX.	IXTAPALUCA, IXTAPALUCA	-98.867	19.317	2620

La segunda etapa fue derivar variables. Para calcular la erosión con los modelos de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), y la Capacidad de Transporte (USPED) se requiere de las siguientes variables:

4.2.2. Evaluación del Riesgo a la Erosión

Factor de erodabilidad del suelo (K).

Para calcular la erodabilidad del suelo, se uso la ecuación del nomograma generado por Wischmeier citado por Mannaerts (1999):

$$K=(1/7.594)*[(2.1*10^{-4}*(12-OM)*M^{1.14}+3.25(s-2)+2.5(p-3)]/100$$

Donde:

K = Factor de erodabilidad del suelo [t./ha.MJ*ha/mm*hr]

OM = Materia orgánica [%]

S = Código de la estructura del suelo

P = Código de permeabilidad

M = Producto de las fracciones del tamaño de las partículas primarias ó (% limo + % arena muy fina)*(100 - % arcilla)

Cuadro 3. Códigos de permeabilidad y estructura del suelo en función de su textura

Textura clase	Permeabilidad código	Conductividad hidráulica saturada [mm/hr]	SCS Grupo Hidrológico de suelo
Arcilla, franco arcilloso	6	<1	D
Arcillo arenoso, franco arcillo limoso	5	1-2	C-D
Franco arcillo arenoso, franco arcilloso	4	2-5	C
Franco limoso, franco	3	5-10	B
Areno francoso, franco arenoso.	2	10-60	A
Arena	1	>60	A

A continuación se muestra un ejemplo del uso del nomograma para calcular el factor K

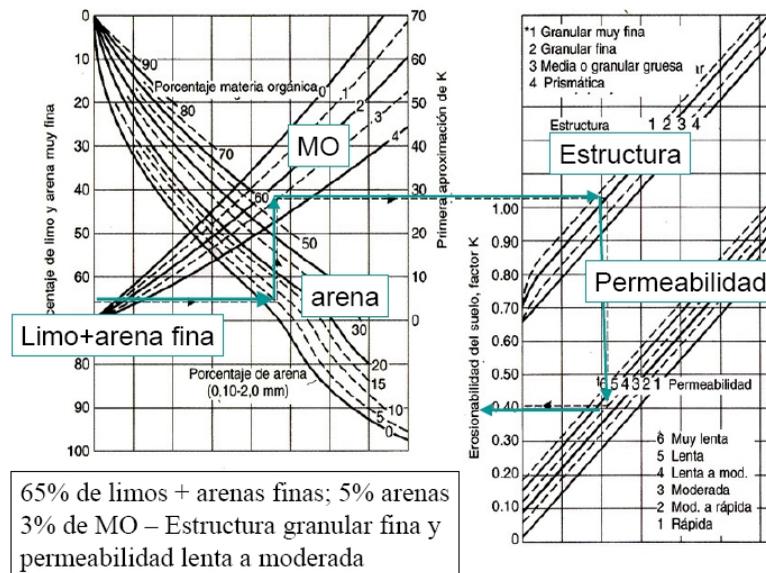


Figura 5. Nomograma de Erodabilidad del suelo

Lo anterior fue apoyado mediante un muestreo de suelos donde se determinaron análisis físicos de Textura con el método de Day modificado, y la separación de arenas por serie de tamiz (mallas diámetros de 60, 140 y menores de 140) por el método de gravimetría.

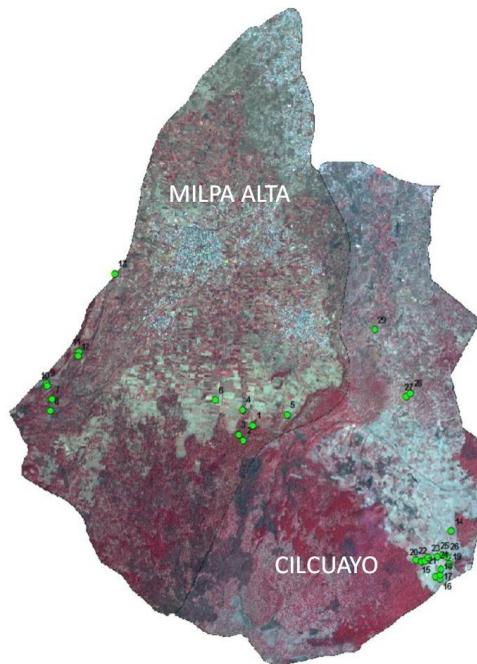


Figura 6. Distribución de muestras de suelo

El criterio del muestreo fue en áreas que mostraban evidencias visuales de erosión hídrica laminar y en canalillos.

Factor de cobertura del suelo (C).

Mediante el mapa de uso y cobertura del suelo del 2005, se derivó la variable de cobertura del suelo, y el factor C de la ecuación universal revisada. El factor C está basado en el concepto de desviación standard, siendo el standard un área bajo condiciones de barbecho con cultivo limpio. El valor de C para condiciones Standard es 1. Los demás valores se obtuvieron de tablas, de acuerdo al tipo de cultivo, etapa fenológica y labores de cultivo.

Factor Topográfico (área de concentración)

Las variables que se necesitan para calcular la unidad de fuerza de las corrientes, se derivan a partir de un modelo de elevación digital (MED), de preferencia con una resolución espacial horizontal entre 5 y 20 m.

Se construyó el MED a partir de las curvas de nivel (20 m) mediante procesos de interpolación espacial, con tamaño de pixel de 20 m. La interpolación se realizó mediante algoritmos diseñados previamente en el sistema de información geográfica GRASS, los cuales muestran consistencia en la predicción de valores de alturas, pero también en la identificación de áreas de depósito y corrientes de agua. Lo cual permite tener modelos de elevación que representen con más claridad los cambios topográficos y su relación con las condiciones hidrológicas superficiales.

A partir del MED, se pueden derivar las siguientes variables topográficas:

Pendientes (inclina): Pendientes en grados

Aspecto (orienta): Orientación pendientes en grados (0 – 360)

Flujo Acumulado (fluacu): Numero de pixeles con la misma dirección de flujo

Área de Captación Pendiente Arriba (flutopo): Superficie de Captación de Flujo

Como ya mencionamos, el factor LS de la ecuación RUSLE no es aplicable a nivel de cuenca, ya que fue diseñado para escala parcelaria, lo cual restringe su cálculo en un Sistema de Información Geográfico. Como uno de los objetivos es hacer un análisis comparativo entre los modelos RUSLE y USPED, es que se hizo una sustitución en el cálculo del factor Longitud de la Pendiente conservando los principios que le dieron origen, por el factor Área de Captación Pendiente Arriba, el cual permite conocer mejor la concentración del flujo en grandes superficies, y se obtiene fácilmente. Su expresión de cálculo dentro de un Sistema de Información Geográfico es el siguiente:

$$(([\text{fluacu}] * \text{tamaño pixel} / 22.1) . \text{Pow}(0.6)) * ((([\text{inclina}] * 0.01745) . \text{Sin}) / 0.09) . \text{Pow}(1.3)$$

Una vez obtenido este factor topográfico se realizó la operación multiplicativa con los factores R, K, y C y obtuvimos el riesgo a la erosión en ton/ha/año. A continuación se muestra el procedimiento generalizado para calcular el riesgo a la erosión mediante el modelo RUSLE.

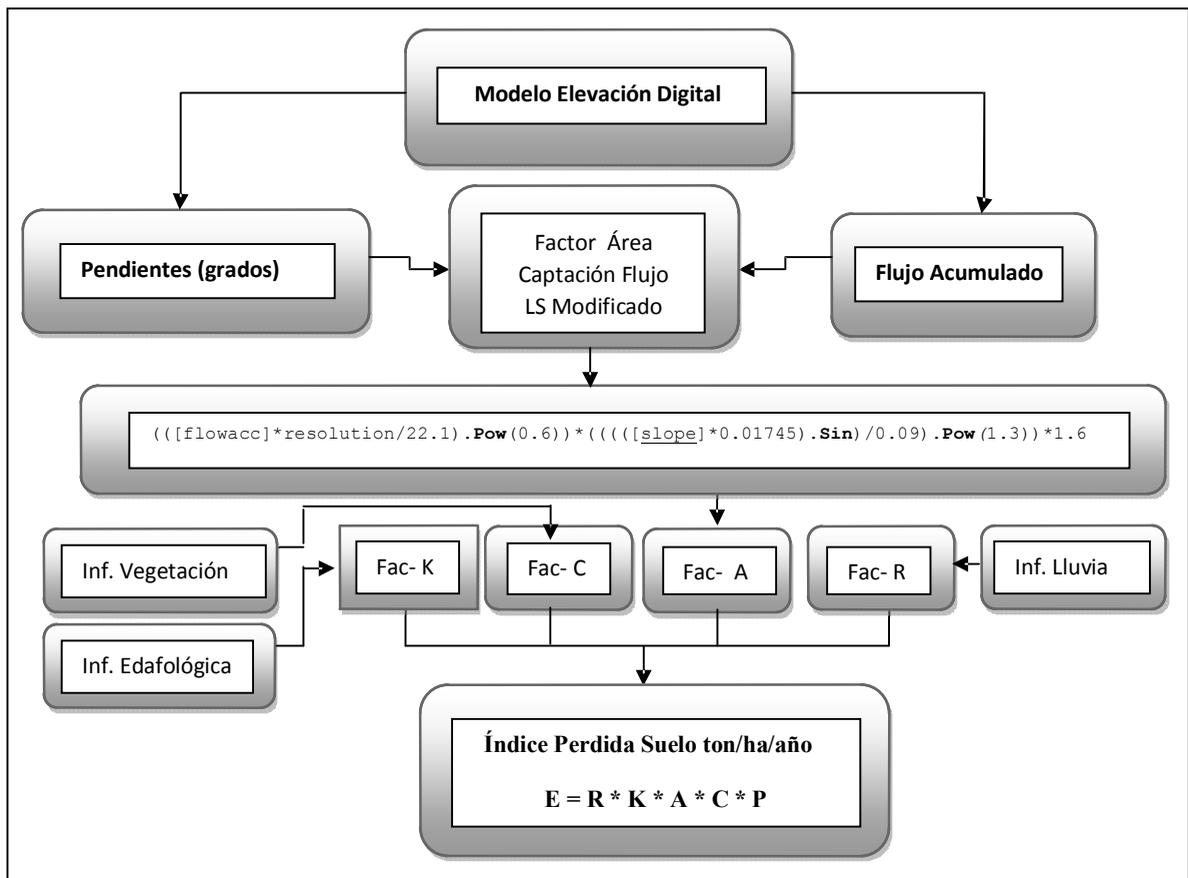


Figura 7. Procedimiento para calcular el riesgo de erosión hídrica mediante modelo RUSLE

Por otro lado, para el modelo USPED se requiere calcular la unidad de fuerza de la corriente, que se expresa de la siguiente forma:

$$T = (A)^m (\text{sen } \beta)^n$$

La Fuerza de la Corriente se conoce a partir del *Área de Captación Pendiente Arriba*, que sustituye al concepto de *Longitud de la Pendiente (LS)*. Para poder calcularlo de manera cartográfica se utiliza una calculadora para mapas dentro del sistema ArcGis, mediante la siguiente expresión:

$$\text{Pow}([\text{fluacu}] * \text{tamaño pixel} , 1.6) * \text{Pow}(\text{Sin}([\text{inclina}] * 0.01745) , 1.3))$$

Una vez que se ha calculado la Fuerza de la Corriente, se utiliza la ecuación de *Capacidad de Transporte*, que se representa de la siguiente forma:

$$T = R K C P A^m (\text{sen } b)^n$$

Para ello se requieren un valor de Intensidad de lluvia (constante), el factor de erodabilidad del suelo (K), la cobertura del suelo (C) y área de captación pendiente arriba (A). Para ello se utiliza la siguiente expresión de cálculo:

$$A = [\text{flutopo}] * [\text{kfac}] * [\text{cfac}] * \text{rfac}(\text{cte}) * \text{Cos}(\text{([orienta]} * (-1)) + 450) * .01745)$$

$$B = [\text{flutopo}] * [\text{kfac}] * [\text{cfac}] * \text{rfac}(\text{cte}) * \text{Sin}(\text{([orienta]} * (-1)) + 450) * .01745)$$

Con estas expresiones podremos saber cuál es la intensidad del transporte considerando las características de la erodabilidad del suelo, cobertura y rugosidad del suelo mediante la vegetación y cultivos, manteniendo un exceso de agua constante.

Para conocer los patrones de distribución e intensidad de los procesos de erosión y depósito en un sentido bidireccional se requiere calcular la curvatura de gradiente (forma de pendientes) y la curvatura tangencial (curvatura perpendicular a la pendiente principal) donde valores negativos de esta curvatura representan áreas divergentes y los positivos áreas con flujos convergentes.

Y se calculan de la siguiente forma:

Inclina [Ax], Orienta [Ax] y Inclina [By], Orienta [By]

Para cada intensidad de transporte se le calcula su pendiente y su orientación de pendientes. Posteriormente se hace la derivación calculando el coseno de las pendientes principales y la tangente de las superficies verticales que son perpendiculares a la pendiente principal, mediante las siguientes expresiones:

$$Dx = \text{Cos}(\text{([Ax_orienta]} * (-1)) + 450) * .01745 * \text{Tan}(\text{[Ax_inclina]} * .01745)$$

$$Dy = \text{Sin}(\text{([By_orienta]} * (-1)) + 450) * .01745 * \text{Tan}(\text{[By_inclina]} * .01745)$$

$$\text{Erosion} = Dx + Dy$$

Esta formulación bidimensional conjunta el análisis de los flujos en el sentido de las pendientes y los flujos que son tangenciales a estas. Por lo tanto estos cálculos nos podrán indicar cuál es la distribución de la erosión/deposito, ya que estos procesos están controlados tanto por la profundidad del flujo superficial como por la geometría local del terreno. Por lo tanto esta formulación bivariada demuestra que la aceleración local del flujo en ambas direcciones

(gradiente y tangencial) juegan un papel igual de importante en la distribución espacial de la erosión y depósito.

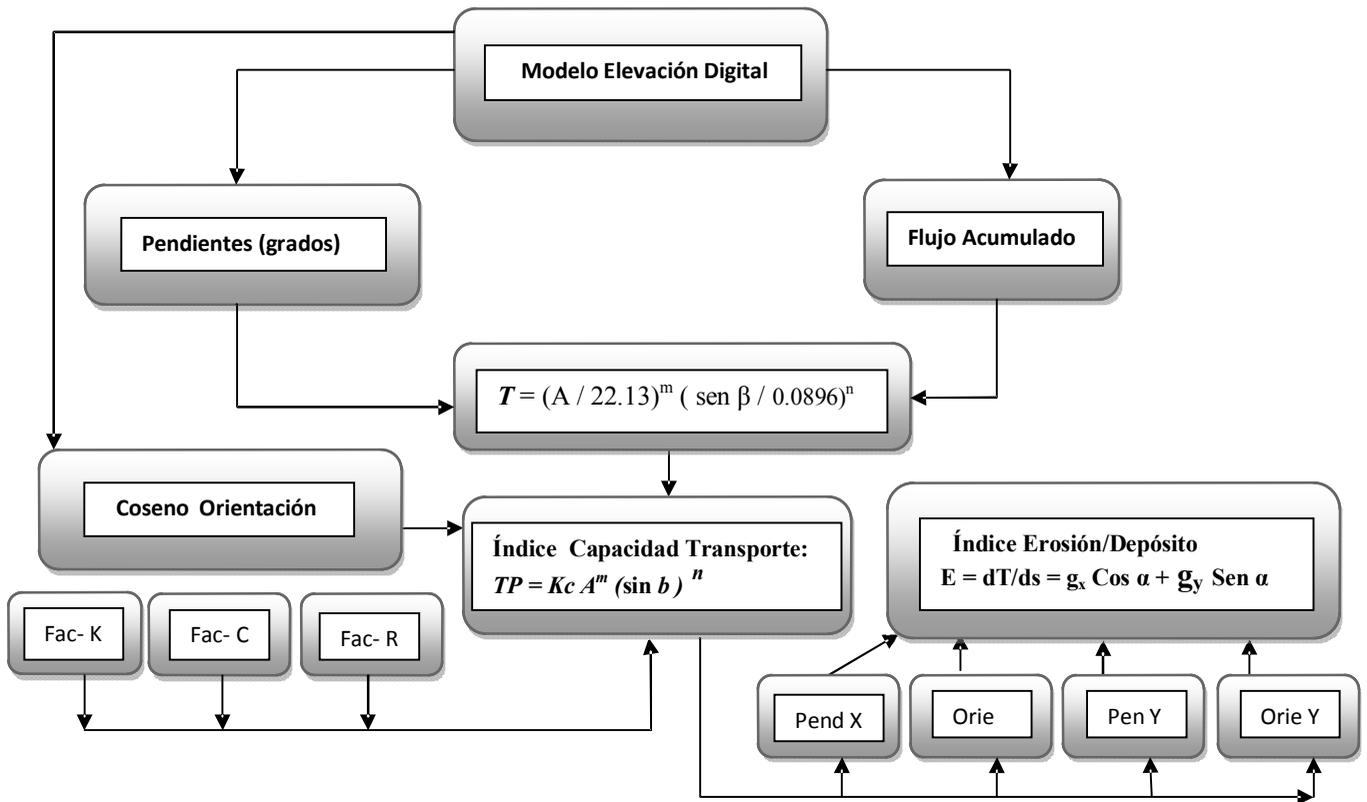


Figura 8. Esquema generalizado para calcular el riesgo de erosión/dépósito, modelo Transporte (USPED)

4.2.3. Cambios temporales de Cobertura y Uso del suelo

En la búsqueda de antecedentes relacionados con evaluaciones relacionadas con la degradación del suelo y los cambios en la cobertura del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal, no hay antecedente alguno. Por lo que fue necesario realizar un análisis retrospectivo de como la cobertura del suelo (vegetación) y los cambios en el uso de la tierra (patrón de cultivos) en un periodo de 27 años han afectado la intensidad y patrón espacial de la erosión del suelo.

Para llevar a cabo este análisis se uso la información cartográfica de Uso del Suelo y Vegetación del INEGI (Series I, II 1978, 1997). Y la de OEIDRIUS (Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable, 2005) donde las claves de uso y cobertura vegetal se homogeneizaron para reducir la confusión entre clases.

Como información de apoyo se analizó la imagen de satélite QuickBird del año 2005 en falso color, la cual se clasificó para verificar las clases existentes y que nos ofreciera un patrón más detallado, se utilizó el sistema ERDAS que es un programa especializado en realizar procesamiento digital de imágenes.

El procedimiento fue el siguiente:

El primer paso es calcular el índice NDVI. Este índice se calcula con la siguiente expresión matemática:

$$NDVI_i = (NIR_i - RED_i) / (NIR_i + RED_i)$$

Donde

$NDVI_i$ es el valor del índice para el pixel i ésimo de la imagen,

NIR_i es el valor del pixel i ésimo en la banda del infrarrojo cercano, y

RED_i es el valor del pixel i ésimo en la banda del rojo.

Como este índice es un parámetro normalizado (Normalized Difference Vegetation Index), los valores se ubican dentro del intervalo $[-1, 1]$; siendo los valores mayores a cero los que corresponden a áreas con vegetación. Es importante recalcar que de manera ocasional y esporádica, existen algunos objetos que tienen una huella espectral similar a la de la vegetación y consecuentemente este índice no es capaz de diferenciarlos, siendo ésta condición una desventaja del uso de este índice y por lo tanto de la metodología. Sin embargo, son pocos los casos donde se presenta dicha situación.

Una vez calculado el índice se procede a usar esta información para separar los datos relacionados con la vegetación del resto de la imagen. Se utiliza una mascarilla que se construye mediante una instrucción en donde se tome solamente en cuenta los datos cuyo NDVI sea mayor a cero. Esta simple operación amplifica la separabilidad del espacio de rasgos, simplificando el proceso de identificación y separación de objetos representados en la nube de datos de la imagen. Por esta razón es innecesario expandir la nube de datos mediante una reconversión de escala de 0 a 255.

Una vez obtenida la imagen con información relacionada principalmente con la vegetación, se procede a transformar los datos con la técnica de Transformación Inversa de Fourier. Esta técnica

intenta ajustar el espacio espectral de rasgos a un espacio armónico, donde cada función armónica representa un objeto en particular, en este caso cada función representa un grupo florístico.

El resultado obtenido es un espacio espectral conformado por un conjunto de funciones armónicas cuya separabilidad es mucho mayor que la separabilidad del espacio original. En el nuevo espacio, el ruido y la información redundante se reducen a una constante, que en la mayoría de los casos no representa objeto alguno y es eliminada en el análisis.

Una vez procesada la imagen con esta técnica e identificados los grupos de vegetación, cualquier técnica apropiada para clasificar la imagen resultará en una imagen con una buena aproximación de los grupos florísticos existentes e inclusive, de ser posible con diferentes condiciones de manejo, dentro de cada grupo. Esta clasificación fue verificada en campo mediante recorridos dirigidos a clases que mostraban alguna confusión de identificación, y que fue corregida mediante un proceso de reclasificación.

El análisis multi-temporal consistió en la comparación y coincidencia de unidades cartográficas de los mapas de 1978 y 1997, las unidades de la misma clase que coinciden espacialmente se denominan *permanencias*, por otro lado si unidades de la fecha más antigua eran de vegetación natural y ahora son ocupadas por cultivos, pastizales inducidos o zonas urbanas, o zonas agrícolas, cuerpos de agua, pastizales se transforman en áreas urbanas se consideran *pérdidas*. Pero si áreas agrícolas, pastizales inducidos, o áreas sin uso aparente del mapa más antiguo, cambian a zonas reforestadas o repobladas por vegetación secundaria, se consideran *ganancias*. Dicha comparación cartográfica se llevo a cabo mediante un proceso sencillo de cruce de tablas de atributos, cuyos resultados son superficies (m^2) ocupadas por las clases dominantes.

4.2.4. Evaluación de la Capacidad de Uso de los suelos

Aunque la Capacidad de uso y la Aptitud se usan de manera intercambiable, el principal objetivo de la primera es evitar la degradación del suelo, y la aptitud define la conveniencia de un tipo dado de tierra para un uso determinado.

Para llevar a cabo la evaluación de capacidad de uso de las tierras se inicio con la caracterización de estas, como se describe a continuación:

4.2.4.1. *Características de la clasificación.*

Se clasifican las tierras atendiendo a dos factores principales: pendientes y profundidad del suelo. Cuando se presenta un tercero, como una limitante del suelo, las tierras se clasifican como únicamente apropiadas para un uso poco intensivo.

Cada clasificación se acompaña con las necesidades de tratamiento de las tierras. Una unidad que no pueda ser tratada con las medidas de conservación prescritas, no debe emplearse para cultivos o huertos.

Las tierras se clasifican para el uso permisible de carácter más intensivo, o de preferencia menos intensivo.

4.2.4.2. *Principios básicos para la clasificación.*

Los principales factores a utilizar para la clasificación son: Pendientes y profundidad de los suelos. Otros factores limitantes, por ejemplo la pedregosidad, humedad, erosión en cárcavas, inundaciones frecuentes, etc.

Las tierras con pendientes inferiores a 25 grados ($< 45\%$) y suelo profundo y que se pueden tratar con medidas prescritas de conservación de suelos se clasifican como C (cultivables). De 25 a 30 grados si son tratables las tierras se pueden clasificar como tierras para frutales, FA. Todas las tierras con mas de 30 grados o menos pero que no pueden ser tratadas con las practicas de conservación deben clasificarse para otros fines, por ejemplo, bosque, pastizal, agroforestal, etc. De tal forma que haya una cubierta vegetal permanente.

4.2.4.3. *Procedimientos.*

Dentro las unidades de capacidad de uso es también necesario es importante tomar en cuenta la flora existente en el entorno de las unidades de mapeo, pues ésta representa, además del uso actual de la tierra, la influencia de las características climáticas y las características biofísicas del suelo de la unidad cartografiada, debido a que el clima tiende a variar de acuerdo a la altitud, parámetro que indudablemente influye en la cobertura vegetal y en el tipo de uso del suelo.

Adicionalmente permitirá comparar estas características de uso actual con las de uso potencial. Por otra parte, todos los suelos tienen sus limitantes, algunos de ellas son: la textura,

pedregosidad, fertilidad, profundidad radicular y pH, se les asignaron en rangos como el modelo lo requiere.

4.2.4.4. *Categorías de capacidad de uso mayor de la tierra*

De acuerdo a las características edafológicas y geomorfológicas se identifican las categorías clasificadas, involucrando cada una de ellas un determinado sistema de manejo y conservación de suelos por las características de topografía relieve, suelos y clima. El método está diseñado para altas montañas y poseen las siguientes categorías aplicadas:

C1: Tierras cultivables 1 (tierra cultivable en limpio):

Unidad ubicada en inclinaciones hasta de 12% de pendiente, y profundidades mayores a 90 cm y sin limitantes edáficas. Por sus características, esta zona requiere muy pocas medidas intensivas de conservación de suelos. Si se propone efectuar algunas intervenciones se sugieren *cultivos en contorno como primera medida, asimismo, cultivos en franjas, barreras vegetales y barreras con taludes de piedra con una altura inferior a 50 cm y un ancho de 40 cm*, todas ellas dentro un sistema de planificación en parcelas a partir de extensas terrazas de base ancha (donde apliquen). También se propone la construcción de zanjas de desviación en áreas con escurrimiento alto, dependiendo obviamente de las características edáficas y geológicas de la zona.

C2: Tierras cultivables 2 (tierras con medidas de conservación)

Son unidades concentradas en pendientes de 12.5 a 25%, donde los suelos son de moderadamente profundos (> 90 cm) necesitando por tanto, medidas de conservación algo más intensas que la unidad anterior descrito, como son terrazas de banco, terrazas de formación sucesiva con taludes de piedra y reforzadas con plantaciones nativas a unos 30 cm de distancia después del muros, así como barreras vivas con arbustos de porte mediano a alto.

C3: Tierras cultivables 3 (tierras cultivables con medidas intensivas de conservación)

Son unidades concentradas en zonas con pendientes que fluctúan entre 25 y 35%, con suelos profundos y sin limitantes. Pueden necesitar, terrazas de banco por las características de sus suelos.

P: Pastos nativos y manejados:

Se ubica esta unidad en pendientes desde 10 hasta 45% y si presenta limitantes edáficas que impidan un laboreo normal, como pedregosidad, humedad, erosión superficial grave o en cárcavas, por lo tanto en esta unidad se debería practicar la rotación en épocas de pastoreo por ser consideradas específicamente para esta fin, sin embargo por ser una unidad muy extensa se propone identificar claramente las zonas potenciales para el pastoreo por sus características propias, es decir que disponen de unas coberturas arbustivas diversas y además permita un manejo racional y sostenido debido a que las áreas forestales son sobre pastoradas con ganado ovino, por lo que el rendimiento de los pastos es muy bajo, por esto se recomienda un pastoreo rotativo, con temporadas de rezago de 4 a 6 semanas y de 3 meses en invierno. O la conformación de corrales rotativos donde se promueva el renuevo con ganado mixto. La meta es que el suelo quede desnudo y muy pisoteado por altas frecuencias de pastoreo.

SP: Tierras silvopastoriles o Forestales

Se encuentran en las pendientes entre el 45 y 50% que tengan restricciones edáficas como suelos poco profundos (< 20 cm) para cualquiera de los tratamientos mencionados en las unidades anteriores o bien a una causa de una fragilidad de los bosques naturales o dificultad de regeneración.

B: Bosque de Protección

Esta unidad se encuentra en lugares donde la pendiente es muy alta (55 – 85%) independiente de la profundidad del suelo, el tratamiento más recomendable para esta unidad es la reforestación con sistemas de contorno, tinas ciegas y cobertura orgánica sobre el suelo.

El factor de profundidad del suelo se determino en función a la relación con la pendiente, como una medida de seguridad y no tener criterios arbitrarios. Se usa como un límite de manejo optimo para circunstancias de agricultura de secano en pendientes inclinadas:

$$\text{Profundidad mínima} = 2 \text{ m} / 2 \tan 25^\circ + 0.2 \text{ m} / 2 + 0.1 \text{ m} = 0.67 \text{ m}$$

4.2.5. Comparación entre Capacidad de uso y uso actual del suelo (conflictos de uso del suelo)

El análisis de conflictos se elaboró confrontando las clases de capacidad de uso con el uso actual de la tierra, permitiéndonos definir los ajustes de uso necesario y tener conocimiento de la planificación en la ocupación productiva.

En la categoría “tierra cultivable en limpio” estarán aquellas unidades de uso de la tierra, resaltando la superficie con potencialidad para cultivos que están siendo usados adecuadamente, estas superficies no necesitaran medidas de ajuste en caso de intervención.

Comparando la categoría “tierra cultivable con medidas de conservación”, con el uso actual se podrán observar la existencia significativa en cuanto a su uso, es decir unidades que no tienen precisamente capacidad agrícola, y que pudiesen llegar a definirse como potencialmente agrícolas, previo análisis de los factores físicos y climáticos. En la categoría “tierras cultivables con medidas intensivas de conservación” podría ser similar a la anterior, con la diferencia de intensificar las prácticas de conservación donde estas se requieran.

La categoría de “pastos nativos o exóticos” podría mostrar la existencia y ubicación de las zonas sobre utilizadas y hasta muy sobre utilizadas, teniendo el cuidado para un cambio en el uso o tomar medidas que disminuyan la degradación de las tierras como el de rotación de pastizales o corrales rotativos que promuevan los renuevo. En la categoría de “Tierras Silvopastoril”, áreas donde están siendo muy sobre utilizadas, tomándose los sitios con medidas inmediatas. Pudiendo identificar además otros sectores que se hallen sobre utilizadas, subutilizadas, o con usos adecuados. El cuadro muestra concretamente la leyenda de las unidades de uso actual que podrían estar en conflicto.

a). Tierras sobre utilizadas

Se llama comúnmente a las tierras de pastoreo, silvopastoril y bosque, las cuales son utilizadas como zonas agrícolas, que arrojan pocos o nulos beneficios, causando grandes daños, por no ser tierras adecuadas a dicha actividad.

b). Tierras subutilizadas

Son mayormente las tierras de cultivo en limpio y tierras de cultivo con medidas de conservación. Las cuales son utilizadas como silvopastoriles o pastos, pero debido en parte a la capacidad productiva de la tierra.

El objetivo de cambiar el uso a una clasificación mejorada o uso potencial de la tierra, es de obtener los máximos beneficios del suelo sin que esto signifique un deterioro irreversible del mismo, es decir que se logre un manejo económico y ecológico sostenible. Para lograr este cambio no solo se debe tomar en cuenta el aspecto netamente técnico, sino también aspectos económicos y sociales, para justificar adecuadamente el proceso.

Cuadro 4. Matriz de comparación entre la Capacidad de Uso y el uso actual del suelo

Uso Actual / Capacidad de Uso	Símbolo
Mayor	
Uso dentro su capacidad	W+
Uso próximo a su Capacidad	W
Muy sobre utilizado	O+
Sobre utilizado	O
Muy subutilizado	U+
Sub utilizado	U

4.3. *Diseño del Sistema Experto*

La estructura básica de organización del SE que se propone en este trabajo se delinea en la siguiente figura. Y se compone de los tres siguientes componentes núcleo:

- Base de Conocimientos: contiene reglas de diferentes fuentes que usa hechos como base para la toma de decisiones y que representan un dominio en particular
- Memoria de Trabajo: Es la base de datos de los hechos usados por las reglas. Estos mantienen toda la información de los sitios que representan el estado actual del problema

- **Motor de Inferencias:** Hace inferencias para decidir cuales reglas son satisfechas por los hechos, prioridades que satisfagan las reglas, y ejecuta las reglas que tienen alta prioridad. Además de los tres núcleos principales, tiene facilidades de soporte que le dan una connotación de integralidad.
- **Interface de Usuario:** Conduce al usuario a acciones como monitorear el rendimiento del sistema, ofrece información, da explicaciones o controla el problema mediante los controles de las estrategias de resolución de problemas
- **Adquisición de conocimiento** ayuda al proceso de licitación de conocimiento de un experto y codifica este en la base de conocimientos
- **Modulo de explicación** permite que cuando se hagan consultas, se pueda explicar al usuario el proceso de razonamiento y como se resuelven los problemas

Estos sistemas realizan acciones para resolver problemas basados en conocimientos de expertos; estos trabajan sobre razonamiento heurístico y ofrecen apoyo a las decisiones o respuestas en forma de recomendaciones. Los SE son dificultosos y lentos para construirlos, pero una vez desarrollados tienen un gran potencial para ofrecer medidas de mitigación.

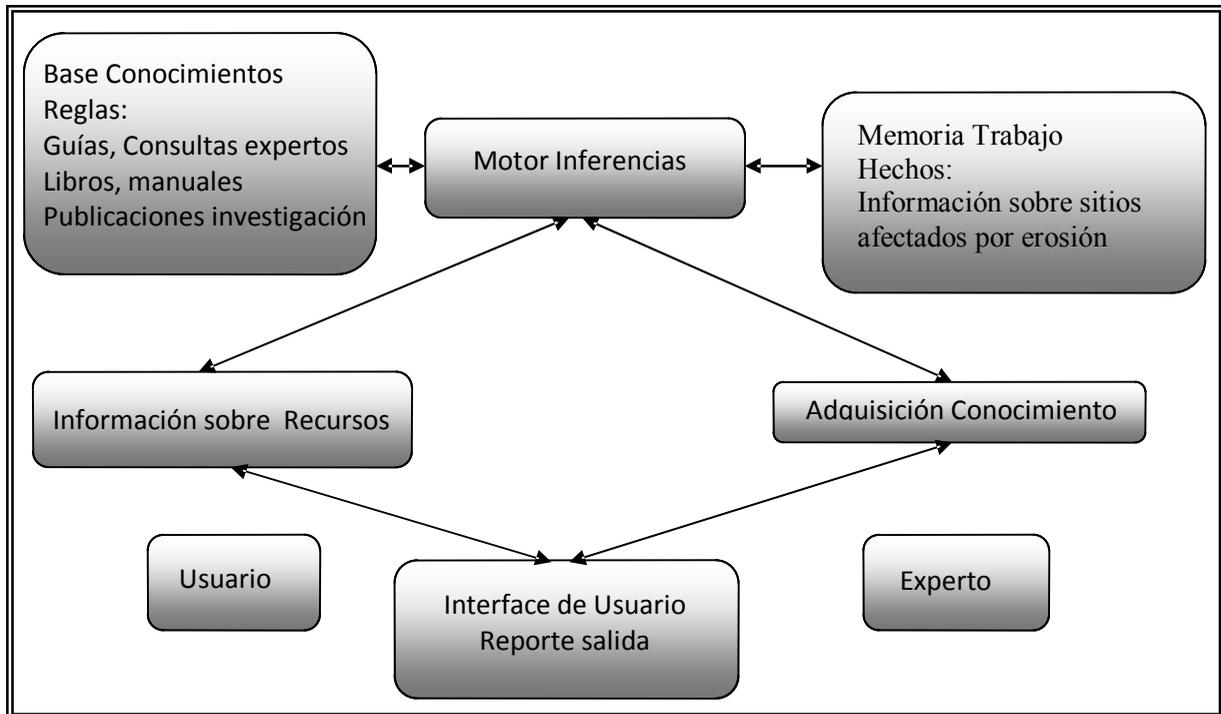


Figura 9. Núcleos principales del Sistema Experto

Se construyó el SE en el Shell EXSYS, este sistema está basado en *Reglas* y además ofrece facilidades de edición para diseñar formatos de salida, corre conjuntos de datos y nos asegura que cuando se hacen modificaciones, estas no alteran el flujo de la lógica central del sistema. El motor de inferencias trabaja con el enfoque de *backward chaining* que incluye un “interruptor” que hace que la búsqueda se detenga después de la primera regla válida o sino hará que la búsqueda continúe hasta que todas las reglas posibles sean evaluadas.

En EXSYS el procedimiento de búsqueda sigue reglas simples. La primera búsqueda o “Patrón de coincidencia” se realiza sobre la base de conocimientos iniciando con las opciones. Las opciones en EXSYS son una lista de todas las conclusiones potenciales desde las cuales el sistema puede seleccionar en la presentación final de resultados. Ninguna, una o varias opciones son posibles con cualquier consulta o corrida del sistema. Durante las corridas del sistema todas las opciones pueden ser verificadas por el motor de inferencias para determinar si son verdaderas. Este procedimiento de verificación es secuencial. La primera opción en la lista es seleccionada primero para determinar si esta puede demostrar que es falsa o verdadera. Entonces la segunda opción es seleccionada y así por el estilo.

El orden de las opciones es determinado por la persona que desarrolla el sistema. Los resultados finales son seleccionados y clasificados sobre las bases de la combinación de las probabilidades asignadas a las opciones en cada una de las reglas de apoyo. El motor de inferencias proporciona un método de acumulación de probabilidades en modos de variables dependientes, independientes o promedios.

Cada una de las opciones debe tener mínimo una regla de apoyo que tenga implícito probabilidades que apoye las probabilidades de que la elección sea correcta.

Selección de reglas: La regla que tiene la instrucción THEN contiene la opción ya verificada que podrá ser seleccionada para el análisis. Si hay más de una opción, la regla con el número más pequeño de reglas será elegida en primer lugar, la regla con el mayor número seguirá. Si dos reglas tienen exactamente las mismas partes entonces, la relación entre estos dos conjuntos es con la condición lógica OR, la misma que existe entre los resultados de los análisis sobre estas dos reglas. Pero dentro de una regla todas las condiciones en la parte IF o en la parte THEN tienen una relación AND.

Por ejemplo: Regla 11

IF

Los suelos del gran grupo son Paleudults

THEN

El encalado no es recomendado — (probabilidad 100/100)

Esta es la primera opción en la lista

De esta forma se construyeron las reglas dentro de EXSYS considerando tres bloques importantes. En el esquema EXSYS se construyen “Bloques lógicos” donde se construyen las reglas en base a una base de conocimiento.

4.3.1. Construcción de la base de conocimientos

Los datos y la información son elementos clave para alimentar modelos y algoritmos que tienen procedimientos conocidos estructurados y la comprobación de sus resultados por métodos cuantitativos es conocida.

En los Sistemas Expertos tenemos que extraer conocimiento semi- estructurado que forma parte de un procedimiento no ordenado y que generalmente varía con las condiciones particulares del problema. Por ello se requiere tener métodos eficientes extracción.

Expertos y Consultas

Se seleccionaron cinco expertos que fueron cooperantes para realizar varias entrevistas, el perfil profesional de estos es: Dos académicos investigadores especialistas en conservación de suelos y con más de 20 años de experiencia en la disciplina; dos técnicos de campo que se desempeñan como asesores en CONAFOR y COUSSA, desde hace mas de 5 años; y dos agricultores con una amplia experiencia de más de 25 años, mediante experiencia adquirida en proyectos productivos y capacitación técnica e intercambio con otros especialistas, uno en Zitacuaro, Michoacán y otro en Iguala, Guerrero.

Las entrevistas se realizaban mediante preguntas retoricas, donde se esperaba tener respuestas lógicas y directas, otras preguntas fueron directas ofreciendo un marco de circunstancias o problemática real o hipotética que merecía respuestas razonadas y con largas explicaciones.

Se utilizaron las mismas preguntas para todos los entrevistados, se trato que la frecuencia de las visitas fuera alta, pero no fue así ya que la distancia y recursos disponibles no lo hizo posible.

No obstante se logro contar con la información necesaria para realizar el análisis.

Análisis de las entrevistas

Las entrevistas fueron grabadas y depuradas, eliminando especulaciones o evaluaciones de juicio no corroborado, se volvían a repetir las preguntas que se habían hecho anteriormente para saber si había consistencia en las respuestas.

La comparación de respuestas entre los expertos, la estructura y profundidad de estas determino como se elaborarían las reglas dentro del Shell.

Nos avocamos a conformar los criterios por los cuales un experto decide seleccionar una o varias obras de conservación. Las variables que usa en todas las ocasiones son:

- El gradiente de la pendiente
- Tipos de suelos (textura, y profundidad)
- Rasgos evidentes de erosión superficial y canalillos
- Escurremientos superficiales
- Uso y cobertura del suelo

La combinación de gradientes con profundidad del suelo ayudaron a construir las primeras reglas, sus valores variaron en un rango de más/menos 10%, entre expertos. Pero un rango de variación del 15 al 18% entre los expertos y manuales técnicos publicados por la CONAFOR y SAGARPA.

Para la selección de obras, fue determinante tener la información de rasgos de erosión y escurremientos, para seleccionar obras específicas, la discrepancia entre expertos fue en promedio de 8% y un 11% con respecto a los manuales técnicos.

Construcción de reglas dentro de EXSYS

El primer bloque se compone de reglas lógicas relacionadas con unidades con diferentes capacidad de uso, estas son componen de diferentes valores de variables físicas, por ejemplo,

pendientes, profundidad del suelo, pedregosidad, contenidos de materia orgánica, uso del suelo, cantidad de lluvia en periodo de crecimiento, temperatura media.

Todas ellas se evaluaron en base a criterios probados de actividades agrícolas de temporal en pendientes inclinadas. De tal forma que este bloque lógico esta enlazado con los otros relacionados con reglas de recomendaciones de asignación de prácticas de conservación y manejo.

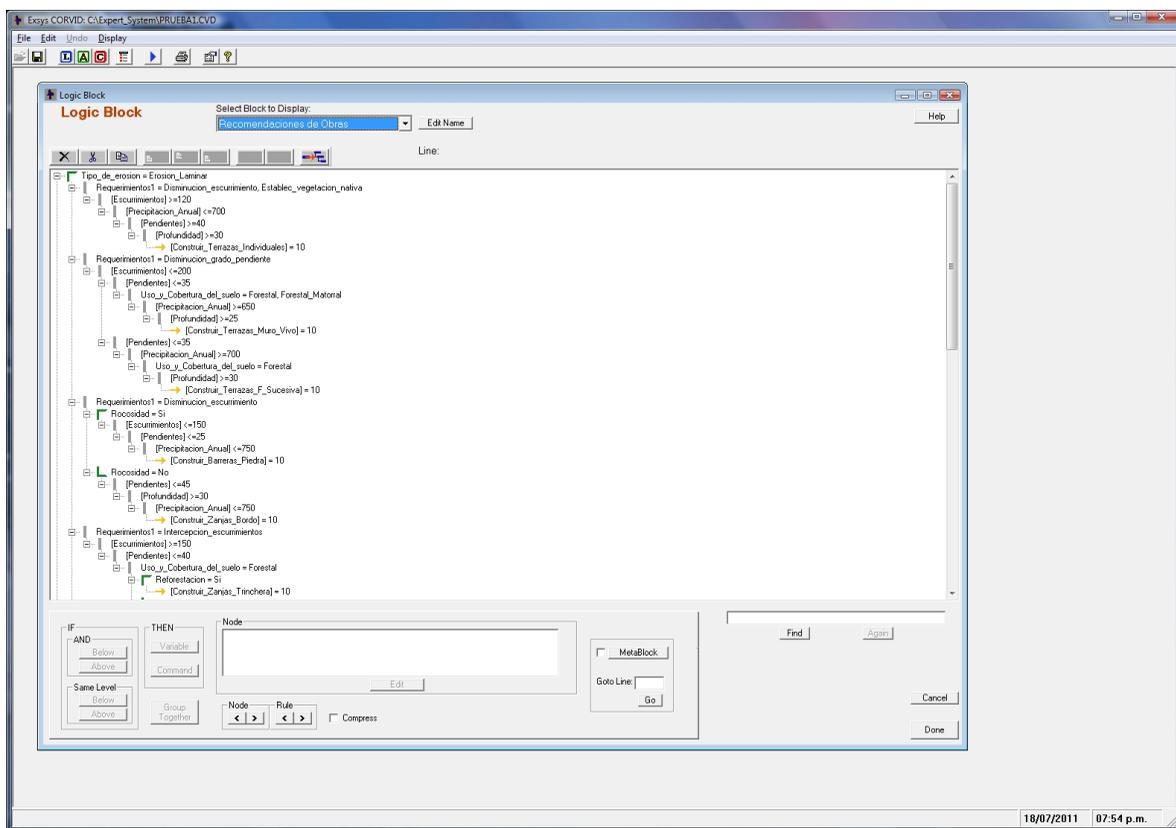
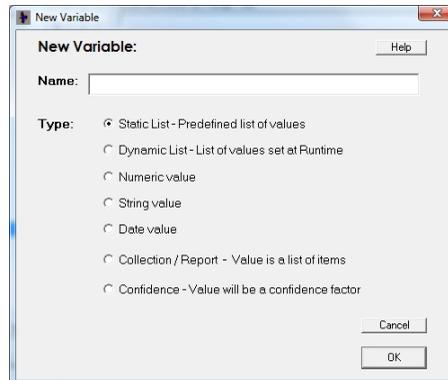


Figura 10. Bloques lógicos del Sistema EXSYS

El segundo bloque lógico lo conforman las reglas relacionadas con los valores de sitio de las unidades o áreas críticas (Hot Spot) generadas en el cálculo de la erosión y depósito de sedimentos. Estas áreas llevan de manera intrínseca el valor de variables de sitio pero que fueron usadas dentro de los modelos de erosión. Sin embargo es necesario saber algunos valores como: Pendientes (%), Textura y Profundidad del suelo, Pedregosidad / Roccosidad, Lluvia anual, Escurrimiento superficial, Uso/cobertura suelo.

Esas variables alimentan la base de conocimientos y sirven de comparación para las reglas del tercer bloque lógico que es el de Asignación de Obras/Prácticas.

La base de conocimientos se construye mediante el módulo de variables de entrada, en esta se seleccionan diferentes opciones de tipos de variables, que son: numéricas, texto, dinámicas, reportes, fechas, factores de confianza.



Estas variables se les asignan valores de acuerdo a las recomendaciones de expertos, reportes de investigación, manuales, etc. La forma en que se seleccionan estos valores es mediante el método de contrastes, que en base a diferencias encontradas tanto en las opiniones de expertos como en documentos, estas se validan mediante entrevistas repetidas a diferentes técnicos. Las aproximaciones se documentan y se construyen las reglas.

IF Capacidad de uso= Tierras cultivables/medidas intensivas

AND Pendientes 25-35%

AND Laderas convexas/Brechas volcánicas

AND Textura Franco-arenosa

AND Profundidad > 35 cm

AND Cultivos anuales

AND Lluvia anual 650-730 mm

THEN Bordos a nivel con pasto y nopal = **10**

Terrazas formación Sucesiva/Cultivos franjas (pastos) = **8**

El bloque lógico estará conformado por un número de reglas igual a las unidades generadas en el análisis cartográfico. Las variables son relacionadas con otros bloques lógicos que coincidan en el tipo de variable, pero pueden no coincidir en los valores, y es de esta forma en que el motor de inferencias encuentra la mejor solución. Las recomendaciones deben ser evaluadas con cantidades probabilísticas que atribuyan a la recomendación un valor de confianza otorgado por el experto, y que puede combinarse con otros valores de confianza mediante alguna operación aritmética como la suma o substracción. Los valores de confianza pueden otorgarse a la misma regla pero con opciones de solución diferentes que tengan casi la misma función pero con quizás menor eficiencia, mayor costo, materiales diferentes, más tiempo de construcción, etc.

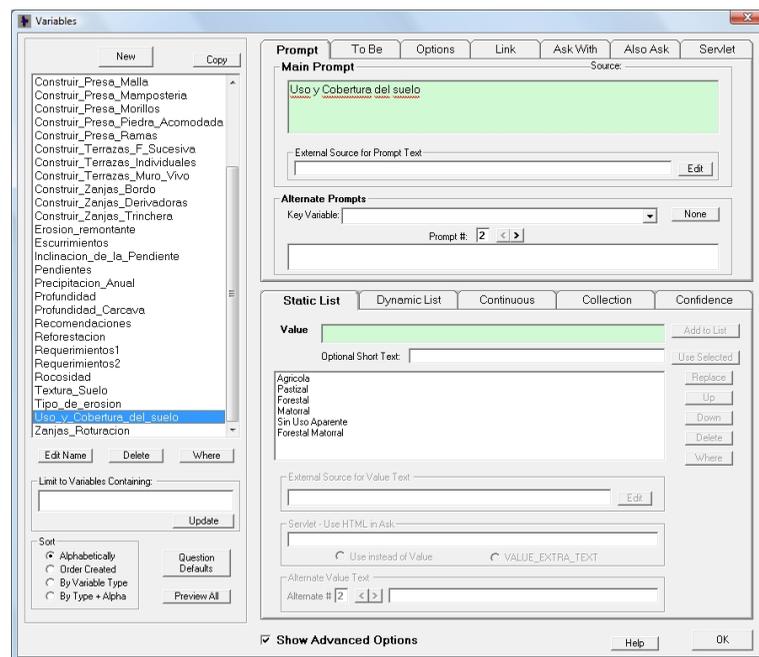


Figura 11. Ventana de asignación de valores a variables entrada

Una vez que se construyeron los bloques respectivos, se corre el modelo mediante una interface dentro del sistema que configura las reglas y de acuerdo a las preguntas hechas por el usuario inicia la exploración de reglas que cumplan con los requerimientos solicitados y entregara una respuesta(s) que tendrán un valor de confianza.

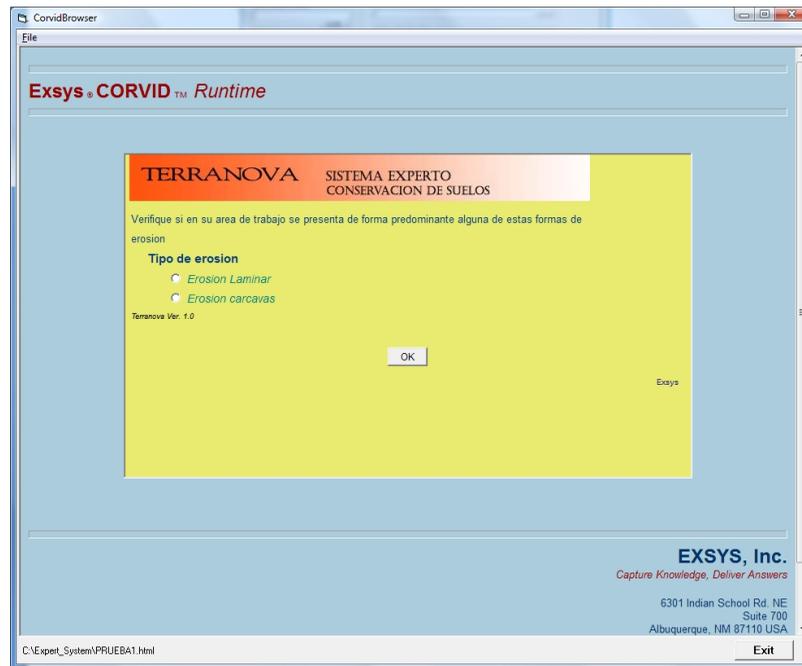


Figura 12. Interface del Sistema Experto (Terranova)

En esta primera ventana de consulta, se realiza una separación de qué tipo de erosión dominante se encuentra en el área de interés: Erosión Laminar o Erosión en Cárcavas.

Esta pregunta debe hacerse ya que los procesos erosivos superficiales y en canalillos son los potencialmente peligrosos y que si no son tratados a tiempo pueden generar erosión en cárcavas o agravar las áreas con este tipo de erosión. Además las cárcavas deben ser tratadas de forma diferente debido a que tienen una funcionalidad individual y longitudinal.

Los métodos referidos para cumplir con los objetivos propuestos quedan enmarcados en un proceso general, donde la construcción de bases de datos, y de conocimientos consumió gran parte del tiempo del estudio. Cabe aclarar que las bases de conocimiento están en proceso de validación en otras condiciones ecológicas contrastantes.

Por lo que las recomendaciones que se generen deben considerarse con precaución, ya que la evaluación de los resultados se percibirá después de haber realizado algunos ensayos en sitios de rehabilitación controlados.

El intercambio de información generada por el Sistema de Información Geográfica y el Sistema Experto, actualmente se hace de forma manual, debido a que el Shell EXSYS no cuenta con las capacidades de interoperabilidad, y hay que construir estas vías de intercambio para que la automatización de los procesos sea mas expedita.

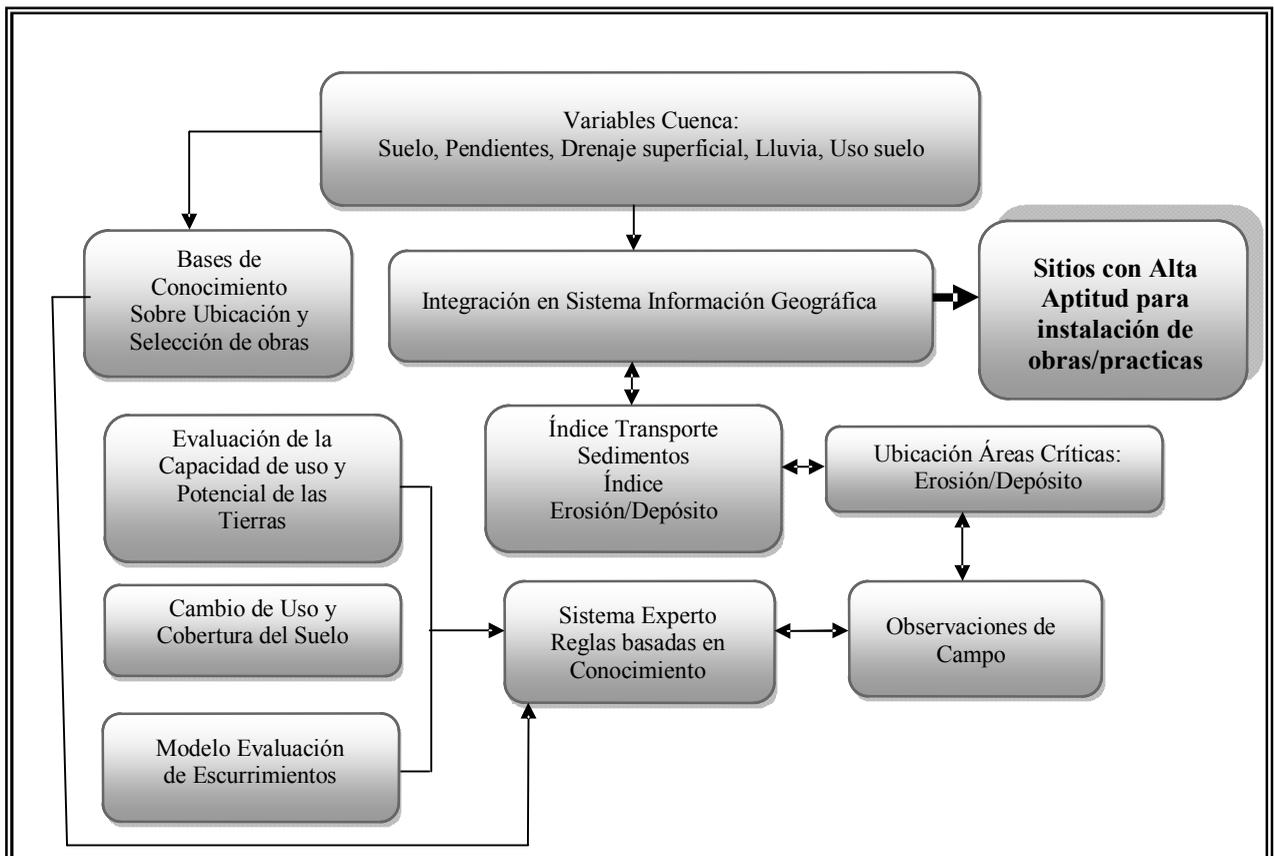


Figura 13 Proceso generalizado para evaluar áreas probables de ubicación de obras de conservación de suelos a nivel de cuenca.

5. RESULTADOS

5.1. Evaluación de la Erosión (RUSLE)

5.1.1. Microcuenca Cilcuayo

Los componentes biofísicos de la cuenca se resumen en gradientes de altura que van de los 2200 mt hasta los 3400 mt, así como reducidas variaciones en las pendientes dominando aquellas que van de 0 a 13%, son pendientes escalonadas con formas cóncavas-convexas principalmente. Las variaciones edáficas que corresponden a las propiedades de erodabilidad, no son variables. Las unidades de uso y cobertura del suelo ahora son reducidas, predominando las agrícolas en pendientes pronunciadas, así como un área de conservación con bosque fragmentado de pino, oyamel y encino.

Es una microcuenca con aspectos de capacidad de uso de la tierra especiales, ya que la calidad de sus suelos es baja, superficiales, pedregosos, y un déficit de humedad importante, por lo que su productividad se hace marginal y costosa para adquirir rendimientos importantes.

Los cambios de uso son significativos y afectan en gran manera las zonas forestales.

Cuadro 5. Superficies (ha) de clases de erosión en tres épocas diferentes, Cilcuayo

Clase Erosión (t/ha/año)	Área		Área		Área	
	2005	Porcentaje	1997	Porcentaje	1987	Porcentaje
Tolerable (< 20)	1934.6	40.8	2017.9	42.5	1708.65	36
Ligera (20 - 40)	950.0	20.0	547.2	11.5	528.57	11.1
Moderada (40 - 100)	780.8	16.5	799.0	16.8	1118.34	23.6
Alta (100 - 300)	375.6	7.9	828.3	17.5	829.17	17.5
Muy Alta (> 300)	703.1	14.8	845.8	17.8	853.47	18

El cuadro 5, nos marca las tendencias en cuanto a una disminución de clases de Muy Alta y Alta erosión, lo cual concuerda con el análisis de cambio en el uso de la tierra donde para cada periodo se pierden superficies con vegetación de matorral, pastizal y bosque. Se nota estos incrementos en la pérdida de vegetación natural con los incrementos en las clases ligeras y moderadas, que son las clases indicativas para señalar las tendencias geográficas de donde se está haciendo mayor presión y cuales usos ya no son compatibles.

Para la fecha 2005, la clase Muy Alta aparece como significativa junto con la Moderada, estos son procesos, “intermitentes”, lo que significa, que cuando aparece una clase, ya le precedió la anterior inmediata, o se está desarrollando con mayor intensidad o afectando nuevas zonas.

Cuadro 6. Superficie (ha) afectada por diferentes clases de erosión hídrica, Cilcuayo (2005)

Uso-cobertura / Erosión	Tolerable (< 20)	Ligera (20 - 40)	Moderada (40 - 100)	Alta (100 - 300)	Muy Alta (> 300)
Agricultura	29.1	96.8	204.8	160.3	654.0
Agroforestal	35.3	3.8	0.8	14.8	1.3
Avena	0.0	0.0	15.3	0.8	0.0
Bosque de Encino	241.4	97.7	12.5	9.1	0.0
Bosque de Oyamel	119.8	57.2	21.4	0.1	0.0
Bosque de Pino	1221.2	219.4	45.7	9.5	0.1
Bosque Mixto	141.9	99.1	9.4	4.2	0.0
Hortalizas-Flores	9.9	0.6	2.6	2.0	2.9
Matorral Inerme	99.9	330.6	272.1	38.8	0.0
Nopal	4.2	7.0	113.4	80.4	26.9
Otras comunidades vege	0.4	1.6	0.0	0.0	0.0
Pastizal	29.6	33.9	80.4	48.9	17.5
Urbano	1.9	2.3	2.4	6.8	0.5

Cuadro 7. Superficie (ha) afectada por diferentes clases de erosión hídrica, Cilcuayo (1997)

Uso-cobertura / Erosión	Tolerable (< 20)	Ligera (20 - 40)	Moderada (40 - 100)	Alta (100 - 300)	Muy Alta (> 300)
Matorral inerme-Agricult	0.0	0.0	31.4	15.8	0.0
Agricultura de Temporal	61.5	134.6	447.0	629.2	795.8
Erosión Hídrica	0.6	0.2	0.8	6.1	4.1
Oyamel	5.4	1.4	0.0	0.0	0.0
Pastizal	16.8	14.9	25.6	51.0	31.5
Pastizal-Pino	13.4	28.5	201.4	112.2	7.6
Pino	1792.5	296.8	66.8	7.3	0.0
Pino-Matorral inerme	103.8	63.4	23.8	2.3	0.0
Pino-Oyamel	23.2	6.3	0.1	0.0	0.0
Pino-Pastizal	0.0	0.0	0.0	0.0	6.9
Urbano	0.6	1.2	2.2	4.4	0.0

Cuadro 8. Superficie (ha) afectada por diferentes clases de erosión hídrica, Cilcuayo (1978)

Uso-cobertura / Erosión	Tolerable (< 20)	Ligera (20 - 40)	Moderada (40 - 100)	Alta (100 - 300)	Muy Alta (> 300)
Agricultura de temporal	46.7	141.3	451.4	291.1	784.7
Cultivos permanentes	12.8	2.1	29.8	12.5	26.2
Bosque de pino	1388.9	242.4	145.7	41.8	2.5
Bosque Mixto	191.1	69.3	11.4	1.4	0.0
Pastizal inducido	69.2	73.5	480.1	482.4	40.1

En lo que respecta a los usos y coberturas del suelo más afectados, están nuevamente en la actividad agrícola, pero menos intensiva que en la microcuenca Milpa Alta. También podemos inferir que los procesos erosivos han llegado a su máxima expresión, por lo que los terrenos requieren de atención prioritaria para restaurarlos rápidamente.

Solamente para confirmar nuestros supuestos en lo que se refiere a la forma en que se extrajeron los recursos hace más de 30 años, analicemos las estadísticas del año 1978.

Como mencionamos, esta microcuenca, fue afectada de manera intensiva, y sin ningún plan rector que estableciera actividades de extracción controladas, o seguir directrices de conservación de la biodiversidad. Esto deja ver una degradación incontrolada que afectó el 60% de la superficie, dañando de manera severa las cualidades de la zona como captadora de agua de lluvia, y como una zona de valor de la biodiversidad. Tal como podemos apreciar en el cuadro donde se presentan los diferentes usos del suelo y sus coberturas, se localizan, las clases de Moderada a Muy Alta, donde todos los usos/coberturas están presentes, esto indica una acelerada y continua extracción de material vegetal con miras a realizar cambios en el uso del suelo.

5.1.2. Tendencias en el tiempo microcuenca Cilcuayo

Para poder establecer recomendaciones en cuanto al manejo del suelo, políticas de uso y planes de reconversión, es muy útil conocer las tendencias temporales de las afectaciones de la degradación en las diferentes coberturas de vegetación.

Esta información sirvió también para establecer las recomendaciones de ubicación, naturaleza de las obras de conservación de suelos en este proyecto. A diferencia de la microcuenca Milpa Alta, la Cilcuayo presenta clases de erosión Muy Alta, bajo un uso agrícola, y que de forma constante

se ha mantenido durante 30 años (aprox. 750 ha), aunque las clases Altas y Moderadas, también se han mantenido. En lo que respecta a el bosque, mantiene bajos sus índices de erosión, lo que no se visualiza en el análisis es el efecto de la deforestación, que no se logra apreciar en la cartografía, debido a la escala de publicación.

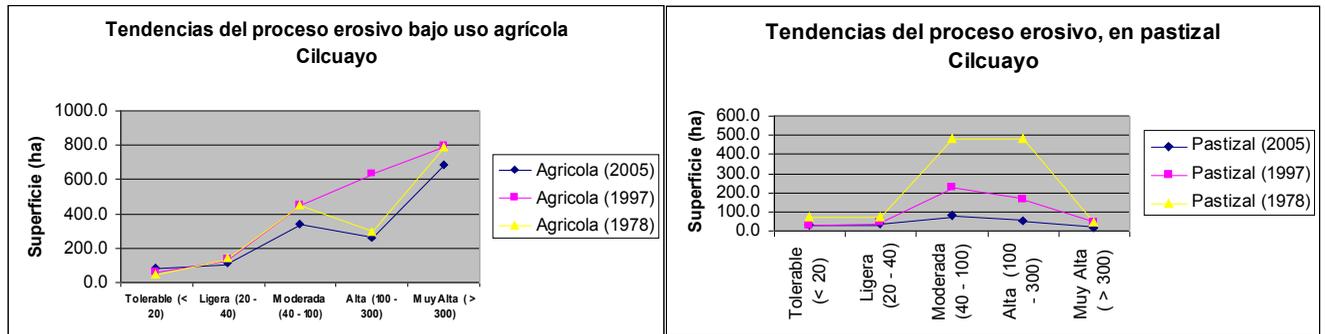


Figura 14. Tendencias del proceso erosivo en diferentes usos de la tierra

Llama la atención las tendencias en la cobertura de pastizal, que su proceso de aparición es producto del desmonte y / o asociaciones con agricultura de temporal. El efecto de la erosión en las coberturas como los matorrales cobro significado en el año 2005, donde quizás a partir del año 2000 hubo una atención hacia esta microcuenca en proyectos productivos.

Queremos resaltar que esta microcuenca presenta clases de erosión Muy Altas en las tres fechas, y con una superficie promedio aproximada de 750 ha, con clases moderadas que son riesgosas. Los trabajos de conservación de suelos son importantes en las zonas con clases Ligeras y Moderadas, pero trabajos de restauración son imprescindibles ya que el daño es severo, debido a la fragilidad de la zona, y al manejo inadecuado que se da todavía al suelo en la actividad agrícola.

5.1.3. Microcuenca Milpa Alta

Los componentes biofisicos de la cuenca Milpa Alta se resumen en gradientes de altura que van de los 2200 mt hasta los 3600 mt, así como reducidas variaciones en las pendientes dominando aquellas que van de 0 a 13%, son pendientes escalonadas con formas cóncavas principalmente. Las variaciones edáficas que corresponden a las propiedades de erodabilidad, no son variables. Las unidades de uso y cobertura del suelo ahora son reducidas, predominando las agrícolas, así

como un área de conservación con bosque fragmentado de pino, oyamel y encino. Los cambios de uso son significativos y afectan en gran manera las zonas forestales.

Las áreas afectadas por la erosión se presentan en el siguiente cuadro

Cuadro 9. Superficies (ha) de clases de erosión en tres épocas diferentes, Milpa Alta

Clase Erosión (t/ha/año)	Área		Área		Área	
	2005	Porcentaje	1997	Porcentaje	1987	Porcentaje
Tolerable (< 20)	1823.7	26.2	1967.5	28.3	1371.2	19.7
Ligera (20 - 40)	691.5	10.0	638.4	9.2	681.7	9.8
Moderada (40 - 100)	1296.9	18.7	1499.2	21.6	1949.5	28.1
Alta (100 - 300)	2821.3	40.6	2371.1	34.1	2783.2	40.0
Muy Alta (> 300)	316.4	4.6	473.7	6.8	164.3	2.4

Las tendencias en los incrementos de las clases Alta y Muy Alta son evidentes, en contraste con la cuenca de Cilcuayo que sus incrementos se daban en las clases baja, ligera y moderada. Lo que tenemos en Milpa Alta es un efecto de “bola de nieve” donde los programas de conservación no han tenido un impacto positivo, además de una gran actividad en los procesos de deforestación. Notamos también que para zonas forestales y de vegetación de matorral la clase Moderada tiene valores relativamente bajos, pero representan un riesgo latente que puede ir en aumento debido a los cambios de uso que se llevan a cabo en estas zonas.

Cuadro 10. Superficie (ha) afectada por diferentes clases de erosión hídrica, Milpa Alta (2005)

Usos-cobertura / Erosión	Tolerable (< 20)	Ligera (20 - 40)	Moderada (40 - 100)	Alta (100 - 300)	Muy Alta (> 300)
Agricultura	106.1	82.5	430.4	1242.6	127.3
Agroforestal	4.8	0.4	0.2	0.0	0.0
Avena	0.7	10.6	57.1	55.8	6.3
Bosque de Encino	116.4	39.6	5.9	0.0	0.0
Bosque de Oyamel	50.5	27.9	2.3	0.0	0.0
Bosque de Pino	961.8	168.8	29.1	0.0	0.0
Bosque Mixto	414.3	103.8	10.7	0.0	0.0
Invernaderos	0.0	0.1	0.8	1.4	0.4
Matorral Inerme	39.2	97.2	45.3	8.6	0.0
Nopal	67.2	132.3	605.9	1179.3	36.1
Otras comunidades vegetal	2.3	1.8	6.3	0.9	0.0
Pastizal	13.1	18.3	44.0	53.6	10.9
Urbano	46.6	8.3	59.0	279.1	135.5

Es interesante la comparación con el año 1997 donde la clase Moderada es mayor que para el año 2005, esto debido a los procesos de cambio de uso de pastizal y matorrales a usos agrícolas de temporal anual y permanente (nopal), en estas fechas se fomento mediante programas gubernamentales la ampliación de la frontera agrícola con incentivos monetarios. Además se estaba desarrollando un proceso de urbanización importante en Milpa alta

Cuadro 11. Superficie (ha) afectada por diferentes clases de erosión hídrica, Milpa Alta (1997)

Uso-cobertura / Erosión	Tolerable (< 20)	Ligera (20 - 40)	Moderada (40 - 100)	Alta (100 - 300)	Muy Alta (> 300)
Agricultura de Temporal-Pastizal	119.2	201.5	878.7	1676.0	95.6
Matorral inerme-Agricultura de Tempor	19.6	66.5	232.0	117.9	0.0
Agricultura de Temporal	9.6	3.4	61.0	62.6	10.6
Encino	10.6	0.7	0.1	0.0	0.0
Encino-Pino	11.0	3.0	0.0	0.0	0.0
Matorral inerme	4.4	15.4	24.8	6.5	0.0
Matorral inerme-Pastizal	14.9	6.6	50.7	14.9	0.0
Pastizal	29.3	22.1	92.6	75.3	6.3
Pastizal-Matorral inerme	0.4	0.4	6.9	7.1	0.0
Pastizal-Pino	0.3	0.8	12.3	14.0	0.0
Pino	1247.0	215.9	32.0	0.0	0.0
Pino-Encino	356.3	37.9	9.1	0.0	0.0
Pino-Matorral inerme	80.9	45.5	9.6	0.4	0.0
Pino-Pastizal	1.5	9.6	24.3	0.4	0.0
Urbano	62.5	9.0	65.2	396.1	361.2

También hay que considerar que la descripción de las unidades de uso del suelo mantiene clases asociadas, es decir un uso con una clase de vegetación, lo que implica un proceso de cambio, tal descripción no se presenta para el año 2005.

Esto le otorga a la evaluación de la erosión del año 1997 un valor agregado ya que se pueden captar variaciones en los procesos de erosión, y tener más significado en la interpretación del proceso

Cuadro 12. Superficie (ha) afectada por diferentes clases de erosión hídrica, Milpa Alta (1979)

Uso- cobertura / Erosión	Tolerable (< 20)	Ligera (20 - 40)	Moderada (40 - 100)	Alta (100 - 300)	Muy Alta (> 300)
Cultivos Permanente	218.0	259.9	1278.6	2477.5	137.7
Agricultura de temporal	13.5	38.0	77.2	53.3	3.2
Asociaciones vegetales	3.7	8.7	0.6	0.0	0.0
Bosque Mixto	385.6	58.5	2.0	0.0	0.0
Bosque Coníferas (Pino)	680.3	241.2	266.6	42.7	2.9
Bosque Latifoliadas (Encino)	20.7	16.6	54.7	13.6	0.0
Pastizal inducido	45.4	44.8	220.2	130.9	19.4
Matorral inerme	4.1	14.0	49.5	65.3	1.2

Para el año 1979, los valores más altos están en las clases Moderadas y Alta con las mismas tendencias y con las mismas características que en las descripciones de los usos del suelo (asociaciones), también apreciamos que en esta época las actividades de desmonte para la

introducción de áreas agrícolas con cultivos anuales y permanentes (nopal) fueron importantes y que fueron disminuyendo de acuerdo a las políticas de conservación de áreas naturales y decretos de veda.

Es importante notar que para este año, la clase de erosión Muy Alta apenas estaba presente, lo que habla de la existencia de zonas naturales conservadas, pero que al cabo de 10 años el proceso se aceleró de manera significativa. De hecho la superficie con la clase Alta es mayor en este año (1978) que en las siguientes fechas, en cuanto al uso agrícola se refiere, y se vislumbra un incremento en la clase Moderada afectando zonas forestales, y pastizales inducidos, esto se considera un detonante para el aumento de clases Altas.

5.1.4. Tendencias en el tiempo microcuenca Milpa Alta

Lo que notamos es que las coberturas de matorral y pastizal son preferidas para hacer cambios en su uso, con los resultados esperados de una aceleración en la erosión del suelo en estos sitios. Se tiene que considerar que los suelos ocupados por estos tipos de vegetación, son muy vulnerables, ya que son poco profundos, pedregosos, y de consistencia muy frágil.

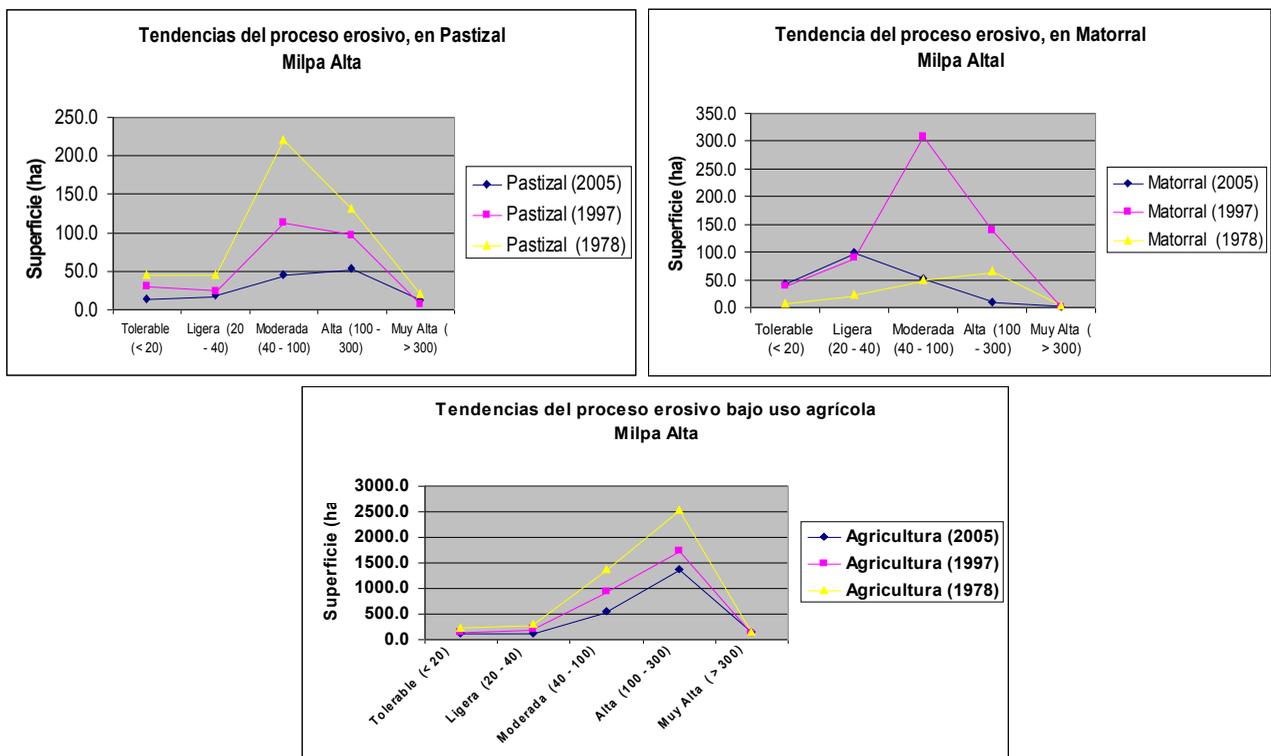


Figura 15. Tendencias del proceso erosivo en diferentes usos de la tierra, Milpa Alta

5.2. Evaluación Erosión (USPED)

El cálculo de la divergencia/convergencia de los flujos nos indican que la fuerza de transporte suele ser mayor y por lo tanto la capacidad de desprendimiento de suelo en las partes altas de la cuenca, pero el USLE estima con bajas tasas de erosión en estos sitios, a la vez que sobre estima el proceso erosivo en áreas donde los flujos de agua se disipan y pierden fuerza, partes medias-bajas. (Figura 16a).

La respuesta a estos resultados es que las formas estándar de USLE y RUSLE de su diseño es mediante parcelas rectangulares. Por lo que la topografía que es usada para la estimación de la Longitud de la Pendiente, toma en cuenta solo la longitud y la inclinación de las pendientes.

Tal enfoque es simplista ya que no puede considerar la convergencia y divergencia del flujo superficial o para las pendientes cóncavas y convexas y otras irregularidades de la pendiente que afectan los procesos de erosión y depósito de sedimentos a una escala local. Pero el modelo USPED describe la erosión mediante un parámetro análogo al LS.

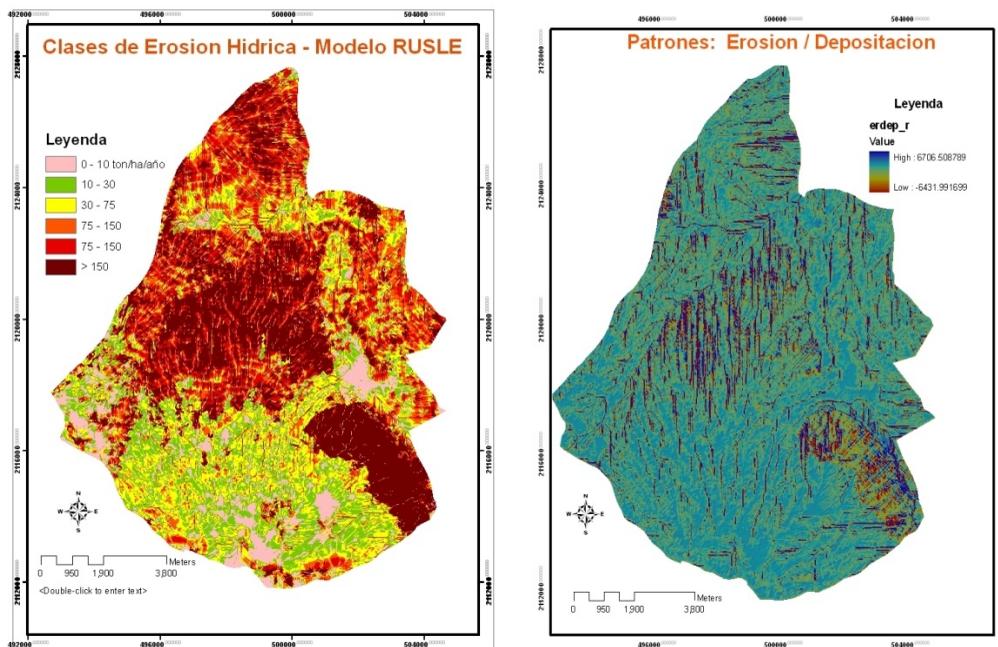


Figura 16a, b. Comparación de clases de erosión entre modelo RUSLE y USPED

Se puede notar en el mapa de transporte un incremento sustancial en la capacidad de este en la parte media de las cuencas, lo cual se puede comprobar con un incremento en la creación de canales (Figura 16).

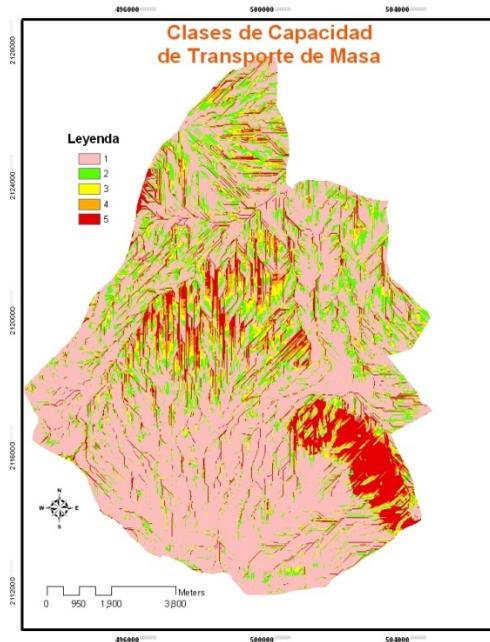


Figura 17. Capacidad Transporte

Por otro lado el índice de erosión/deposición predijo una alta tasa de erosión en áreas con pendientes convexas y tangencialmente cóncavas con aceleración y convergencia de flujo donde el agua tiene una alta tasa de energía potencial y puede causar desprendimiento de suelo y existe una alta tasa de transporte de sedimentos. Por el contrario la depósitos se presenta en pendientes cóncavas donde la velocidad de flujo disminuye (Figura 17).

El modelo USPED puede estimar las tasas de erosión en las partes altas de las pendientes, ya que se integran en el análisis la curvatura de las pendientes, que se realiza a través de una sección en dirección de la máxima pendiente, y también la curvatura tangencial, que es la curvatura de la superficie vertical a través de una sección que es perpendicular la dirección máxima de la pendiente (valores negativos de curvatura tangencial sin zonas divergentes, valores positivos, áreas convergentes)

5.3. *Áreas Críticas (Hot Spot)*

Ciertamente el modelo USPED nos indica las áreas con mayor desprendimiento de partículas, altas velocidades de transporte y depósito de sedimentos, pero la cuestión es cómo seleccionar áreas discretas críticas que permitan el establecimiento de obras y/o prácticas vegetativas.

Para tal efecto existen herramientas de estadística espacial que utilizan la distribución de valores asociados con rasgos geográficos, entonces hace comparaciones a una distribución espacial aleatoria hipotética en orden a responder preguntas basadas en localización. La herramienta usada es llamada Hot Spot y calcula los estadísticos Getis-Ord G_i^* para cada uno de los rasgos del conjunto de datos (para este trabajo: Áreas con erosión/deposito, (este método no resultó útil para los valores resultantes del modelo RUSLE). Este procedimiento produce “scores” de Z que nos indican donde los rasgos con valores de aglomerados espaciales (clusters) son altos o bajos.

Esta herramienta trabaja considerando a cada rasgo en el contexto de vecindad. Un rasgo con un valor alto es interesante, pero puede no ser un punto de interés (Hot Spot) con significancia estadística. Para ser un punto de interés (hot spot) estadísticamente significativo, un rasgo debe tener un valor alto y estar rodeado de otros rasgos con valores altos. La suma local para un rasgo y sus vecinos es comparada proporcionalmente con la suma de todas los rasgos; cuando la suma local es muy diferente de la suma local esperada, y esa diferencia es demasiado grande para ser el resultado de la probabilidad, entonces obtenemos resultados con significancia estadística: z-scores.

La interpretación de la estadística * G_i otorga para cada rasgo en la base de datos un z-score. Para z-score positivos estadísticamente significativos, los z-score mas grandes serán más intensos en aglomerarse (hot spot). Para valores z-scores negativos estadísticamente significativos, menor será el z-score, y también habrá una aglomeración intensa con los valores bajos (cold spot).

Una vez obtenidos los puntos críticos se probó su validez mediante crear polígonos de prácticas de manejo con variaciones en cultivos y prácticas vegetativas. El objetivo fue localizar los puntos críticos con mayor probabilidad de aglomeración y ubicar un nuevo uso del suelo acorde a la región, y modelar nuevamente para detectar si el nuevo mapa de erosión/deposito sufría cambios.

5.4. Sensibilidad de áreas críticas

Pudimos constatar que al introducir el factor de manejo (P) en sitios críticos (Hot Spots), hay cambios interesantes tanto en forma vertical como horizontal (Figura).

Es importante aclarar que el factor P no produce cambios significativos en los patrones de erosión/depósito, ya que debe ir acompañado del factor cobertura del suelo (C), que se conjunta en el proceso de evaluación para producir los escenarios deseables.

Por lo que los objetivos del trabajo se enfocan principalmente en detectar si las áreas críticas seleccionadas mediante el método Getis-Ord G_i^* , son viables para realizar las obras/prácticas. Por lo que se realizaron diferentes pruebas de sensibilidad haciendo diferentes selecciones:

- Utilizar el mapa original de erosión/depósito y en base a la experiencia de técnicos seleccionar los sitios que consideraran viables (78 polígonos) en base a información adicional.
- Mapa áreas críticas y considerar todos los polígonos de erosión/depósito resultantes (2358 polígonos).
- Mapa áreas críticas, pero solo seleccionando los valores moderadamente altos de erosión/depósito, (1429 polígonos).
- Mapa áreas críticas seleccionando valores de áreas muy altos de de erosión/depósito (190 polígonos)
- Mapa áreas críticas, seleccionando sólo tres áreas (165 polígonos) estratégicas que un experto selecciona en base a información adicional

Como ya mencionamos, el factor P cuando se considera sin el factor de cobertura (C) generalmente su efecto en los cambios es mínimo, ya que su diseño fue para evaluar las obras de conservación, y de esta forma mediremos su efecto sin enmascararlo con las prácticas vegetativas.

Se tomo como mapa de referencia el de Erosión/Depósito con sus valores originales, y en base a estos se cuantifico el efecto de P. La meta es lograr que todos los valores de erosión/depósito disminuyan al menos en un 30%. Lo anterior es debido a que en la práctica, las obras deben tener un valor de eficiencia, y lograr al menos un 50%.

Los resultados muestran que los métodos de selección mediante la experiencia de un técnico e información adicional lograron disminuir en el caso de la clase de Erosión más alta un 25% (Figura 18). Resulta interesante que con tan solo 78 polígonos (7800 m²) de supuestas obras de conservación se pudiera obtener una eficiencia alta.

Es importante mencionar que el método de HotSpot es eficiente al seleccionar áreas con significancia estadística espacial, lo cual puede compararse a la misma acción de parte de expertos que cuenten con información local del área de estudio como soporte a sus decisiones.

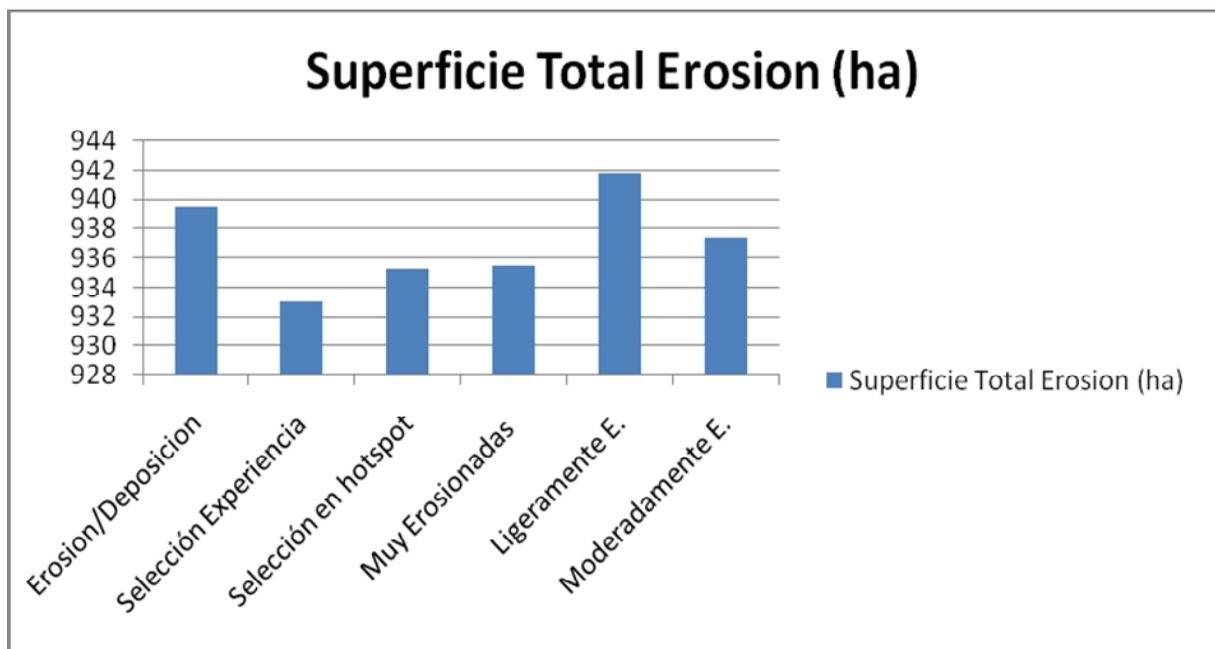


Figura 18. Análisis de sensibilidad en áreas Erosión con factor (P)

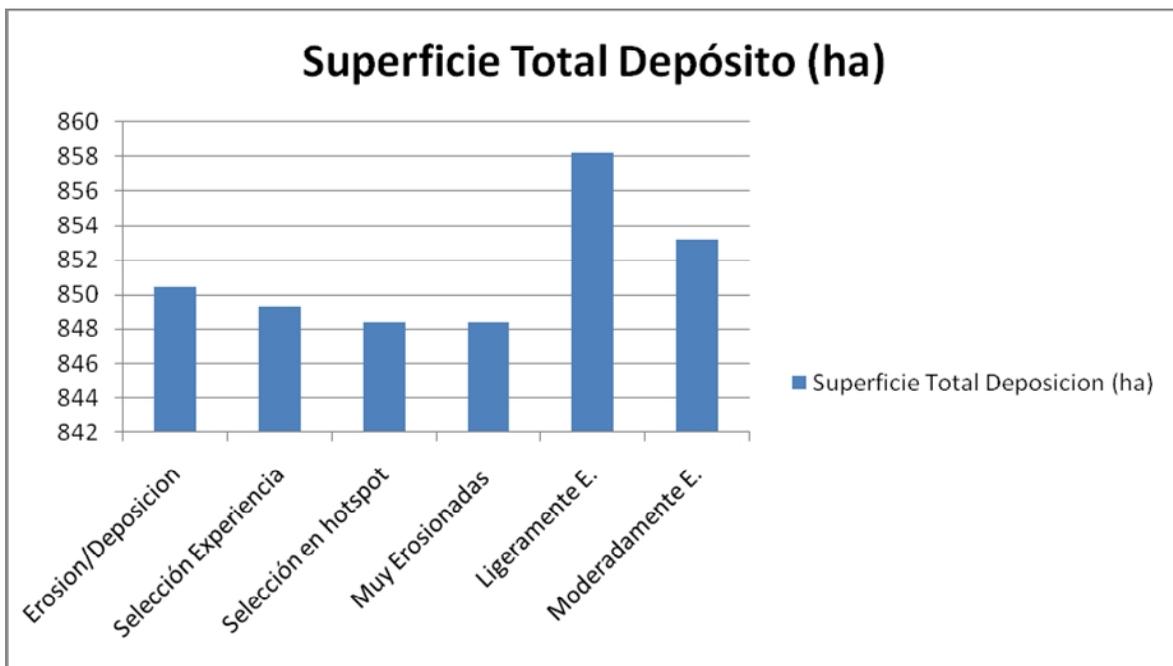


Figura 19. Análisis de sensibilidad en áreas Depósito con factor (P)

Para el caso de selección de sitios de áreas con Depósito de sedimentos, no hubo el mismo efecto. Al parecer los expertos están más familiarizados con los procesos de erosión que con la de acumulación de sedimentos, y su selección fue mal dirigida a este proceso (Figura 19).

En el gráfico anterior se nota que al escoger las áreas más erosionadas (190 polígonos) se logró interpretar a nivel regional la lógica hidrológica de tendencias de escurrimientos, ya que se pudieron reducir los efectos de la sedimentación.

El impacto más sobresaliente es el de que seleccionando pocos polígonos bien distribuidos se obtiene que todas las clases tanto de erosión como depósito se disminuyan, lo cual indica que hay una relación acción-reacción a nivel cuenca, que debe considerarse en los procesos de planificación. La buena distribución se refiere a la opinión de los expertos y a la lógica hidrológica de iniciar toda acción en la parte aguas arriba de la cuenca, ubicando sitios de bifurcación de vías de transporte de sedimentos que conectan hacia las partes bajas más críticas.

Lo anterior se logra analizando el mapa de erosión/depósito generado con el modelo USPED.

También podemos concluir que el seleccionar muchos polígonos tiene un efecto negativo al incrementarse las tasas de erosión/depósito.

Es notorio en algunos sitios donde hay una alta tasa de erosión los cambios del factor P no eliminaron estos valores altos de erosión (Figura 20), sino que se incrementaron las áreas con depósito en pequeñas localidades cóncavas o canales, pero los valores de transportación se incrementaron un poco, lo que significa que las practicas en primera instancia sirvieron como área de amortiguamiento para disminuir la fuerza de potencial de transporte y generar sitios de depósito.

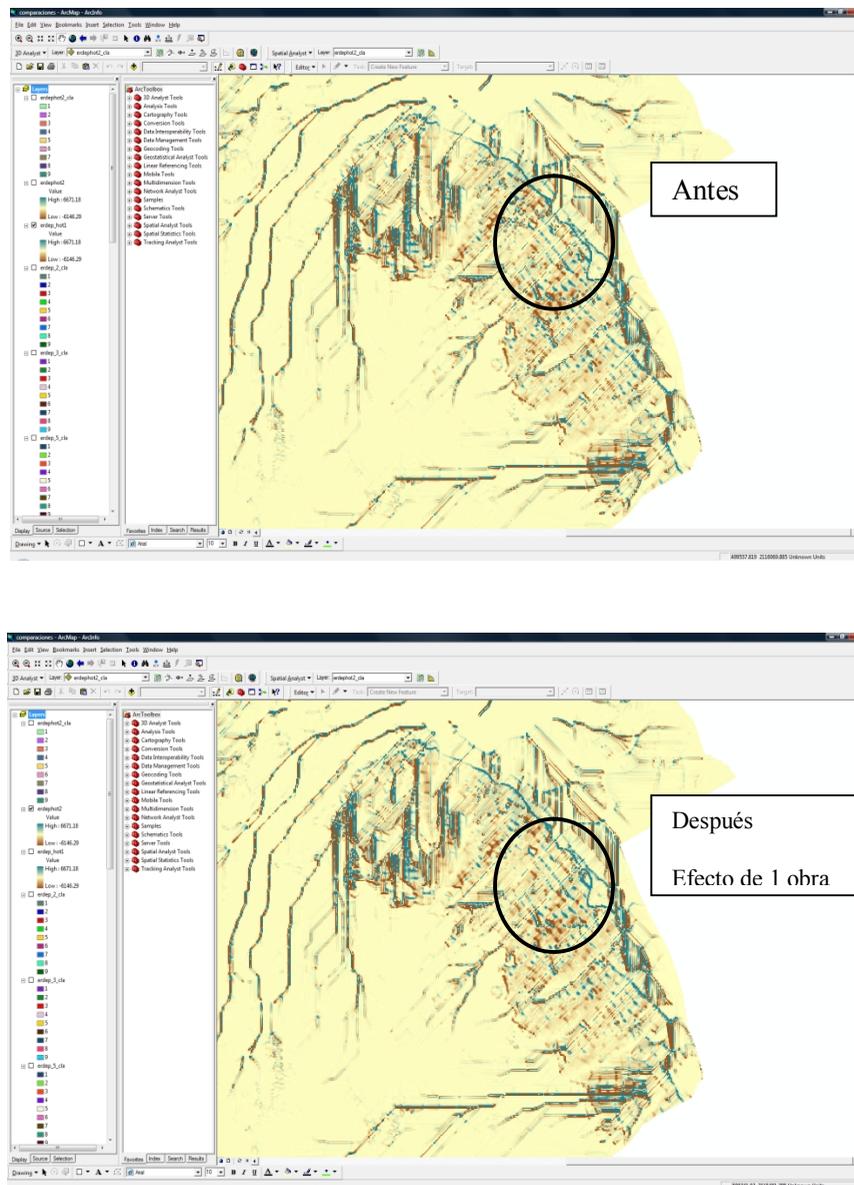


Figura 20. Efecto del factor P con una sola obra conservación

5.5. Cambios de la cobertura y uso del suelo

El análisis primario de cambio de uso del suelo determina la dinámica de las actividades productivas y se pueden inferir los patrones espaciales que son elegidos por los propietarios de los recursos para propósitos productivos. Conjuntamente con el potencial de las tierras estamos en la posición de definir unidades de tierra que contengan las características específicas para un tipo de utilización de la tierra conveniente, es decir, las actividades productivas específicas, de acuerdo a una combinación de características y cualidades de la tierra, y los requerimientos de los usos propuestos.

Con la finalidad de tener la individualidad de cada una de las microcuencas, se muestran los cambios que sufrió cada una de ellas en un periodo de más de 30 años.

Para el caso de la microcuenca de Milpa Alta, se muestra la dinámica primaria del periodo de 1979 a 1997 (Cuadro 13).

Uso_1979/Uso_1997	Agricultura Temporal	Pastizal inducido	Matorral Inerme	Urbano	Cuadro 13. Cambios de uso del suelo, periodo 1987-1997 Milpa Alta
Bosque Mixto	8.9	50.6			
B. Pino	8.6	32.2			
B. Encino	10.6		30.5		
Pastizal Inducido	91.4	113	20		
Matorral Inerme	21.6	35.7			
Agricultura Temporal				899	
Total	141.2	231.5	50.5	899	

En este periodo los patrones de cambio fueron consistentes en cuanto a la extensión de la frontera agrícola en las zonas forestales, estas aparentemente pequeñas intromisiones responden a invasiones de zonas deforestadas en la línea límite del bosque con zonas agrícolas (Foto 1), siendo un avance remontante (hacia atrás), la proporción es baja debido a que los bosques en esta zona están declarados como zona de conservación (141.2 ha).



Foto 1. Afectación área forestal protegida por actividades agrícolas

Estando muy afectado el pastizal, que es una cobertura vegetal muy susceptible al cambio agrícola o urbano. Sin embargo el proceso de desmonte para actividades pecuarias fue significativo (231 ha), en comparación con el tamaño de la zona boscosa, es probable que este cambio significara cambios en los patrones hidrológicos superficiales, y un incremento en los procesos erosivos, debido a que los suelos son de consistencia suelta y estructura muy friable (Foto 2).

Por otro lado el proceso que siempre es continuo, es el de urbanización, y afecta siempre a zonas con agricultura de temporal principalmente, en este periodo encontramos que el proceso de urbanización fue intenso, y se formaron nuevas colonias que a su vez demandaron servicios y alimento.



Foto 2. Ganado ovino en áreas forestales. Factor importante en erosión eólica

Con apenas un periodo de ocho años se presentaron cambios dramáticos en la invasión de áreas forestales en más de 100 ha. En contraste con el anterior periodo de 30 años donde tan solo se invadieron cerca de 30 ha.

Cuadro 14. Cambios de uso del suelo, periodo 1997-2005 Milpa Alta

Uso_1997/Uso_2005	Agr. Temporal	Invernaderos	Nopal	Urbano	Avena	Pastizal
Matorral Inerme	346.7	0.5	19.1	69.2		
Agric. Temporal			19.2	16.7		
B. Encino	5.2		0.5			
B. Encino-Pino	0.7					
Pastizal	124.2					
Pino	32		2.6		2.5	64.7
Pino- Encino	33.5		6.8			27.2
Pino-Matorral	30.4			3.1		
Pino-Pastizal			2.4			
Total	593.6	0.5	50.6	89	2.5	91.9

En este caso podemos analizar que los programas de extensión de áreas de cultivos básicos apoyado por la SAGARPA mediante su plan “ACERCA” realizaron un inventario de áreas agrícolas temporaleras, donde expandir estas áreas con maíz principalmente se traducía en más apoyos económicos por hectárea sembrada.

Este proceso de reconversión está bien detectado en todo el país (Cuadro 15).

Cuadro 15. Cambios de uso del suelo, periodo 1978-1997, Cilcuayo

Uso_1978/Uso_1997	Matorral Inerme	Agricultura Temporal	Pastizal	Pastizal- Pino	Pino
Agricultura Temporal	24.6	1385.5	33.3	188.4	0.0
B. Pino	0.0	18.5	20.5	23	1729.6
Bosque Mixto	0.0	0.0	0.7	61.3	0.0
Cultivos permanentes	0.0	0.0	5.2	0.0	1.4
Pastizal Inducido	21.4	594.3	79.4	90.7	0.0
Total	46	1998.2	139.1	363.4	1731.1

Veamos ahora el caso de la microcuenca Cilcuayo. Lo reducido de sus cambios obedeció principalmente a que sus pobladores tienen litigios sobre la tierra todavía sin resolver, y crearon frentes comunes para proteger principalmente la zona forestal.

Las zonas agrícolas no tuvieron incrementos significativos, ya que las tierras agrícolas son en su mayoría de mala calidad. Predominan zonas pedregosas con suelos superficiales. Esta zona se caracteriza por tener una fuerte actividad pecuaria.

De hecho en esta microcuenca la densidad de población es baja, habitan alrededor de 39000 habitantes en poblaciones dispersas. Cabe mencionar que la cartografía de uso del suelo de 1978 y 1997 no incluye la clase Nopal, ya que la escala de trabajo no permitió tener las unidades, y por ser un cultivo en etapas tempranas, estaba disperso.

Pero en la última década se han presentado en esta microcuenca cambios principalmente en los pastizales que han invadido la zona forestal, la actividad ganadera ha crecido en la activación del turismo y la venta de barbacoa ha suplido las actividades agrícolas en muchos pobladores, incluso se señalaron cortas clandestinas de árboles, que son trozados en el lugar para la producción de leña usada en el proceso de la barbacoa.

El aumento de superficie del nopal (Cuadro 16) tienen repercusiones de mercado y de desplazar áreas con maíz y avena, pero la afectación de vegetación de matorral en zonas con suelos superficiales, pedregosas y de texturas gruesas han dejado al descubierto zonas desnudas que

posteriormente se planta nopal, y la susceptibilidad a la erosión es alta ya que son áreas con pendientes moderadamente inclinadas.

La falta de regulación en este cultivo ha conseguido que se busquen estas nuevas áreas para nopal pero con baja tecnología en su manejo. Aparentemente la cobertura que ofrece este cultivo sea buena, ya que las distancias entre pencas es de tan solo un metro y los cladodios suelen entrelazarse. Pero la geometría y disposición de estos no opera con eficiencia en lluvias intensas, y los escurrimientos superficiales son altos, porque además no cuentan con surcos altos y transversales.

Cuadro 16. Cambios de uso del suelo, periodo 1997-2005, Cilcuayo

Uso_1997/Uso_2005	Nopal	Agricultura	Agroforestal	Avena	Hortalizas/Flores	Urbano	Pastizal
	Temporal						
Matorral Inerme	24.8						
Agric. Temporal	182	1062	48.2	16.2	19.4	11.6	
Pastizal		24.8	2.5				76.5
Pastizal-Pino		12.2	4.9				7.9
Pino	0.3	9.7	0.3			0.1	98.7
Pino-Matorral	22.3	22.2					1.1
Pino-Pastizal		6.9	0.2				
Total	229.4	1138	56	16.2	19.4	11.7	184.2



Foto 3. Plantíos de Nopal de verdura en laderas pedregosas, Cilcuayo

5.6. Capacidad de uso del suelo

La controversia de que si las tierras ocupadas por algún uso es el que debería ser o existen otros que pudieran ser menos agresivos. Ubicar las “mejores tierras” para uno o varios usos adecuados no es tarea fácil, se requiere tener información producto de la investigación o experimental que apoye a determinar que tierras pudieran soportar determinada practica(s) sin afectar demasiado su propiedades principales.

Las clasificaciones de tierras para saber cuál es la capacidad de estas para soportar usos diferentes o constatar que el uso actual es el ad hoc, están basadas en el sistema ampliamente conocido como de las 8 clases, este aunque fue formateado a condiciones de México lleva intrínseco los conceptos originales de adaptar las áreas agrícolas de secano a parámetros estándares de Estado Unidos.

Por ello la siguiente clasificación puede conseguir una mejor adaptabilidad a circunstancias de una agricultura de temporal en laderas, con las debidas restricciones y manejos preventivos-correctivos que merecen estas áreas altamente frágiles.

En los recorridos de campo comprobamos que las condiciones de las tierras es altamente vulnerable y frágil a los efectos de la erosión tanto hídrica como eólica.

Los resultados arrojaron que más del 50% de la superficie de las cuencas tienen una vocación forestal y pastoril, y la otra mitad, aunque no es agrícola del todo, es adaptada mediante medidas permanentes de conservación de suelos. (Cuadro 17)

Cuadro 17. Clases de Capacidad de uso y sus superficies, encontradas en las dos microcuencas

Clase Capacidad de Uso	Clave Capacidad	Superficie (ha)	Proporción (%)
Rocoso misceláneo de escasa vegetación	R	2015.6	17.2
Bosque de producción controlada	B	3178.2	27.2
Tierras silvopastoriles	SP	1120.4	9.6
Pastos nativos o inducidos	P	64.3	0.5
Tierras cultivables III (medidas intensivas conservación)	C3	48.3	0.4
Tierras cultivables II (medidas conservación)	C2	5260.7	45.0

Estas clases de capacidad de uso no representan áreas que tengan dicha vocación, mas adelante veremos en qué proporción los usos actuales se ajustan esta clasificación.

No se encontraron unidades de capacidad de uso C1, que tuvieran las mejores condiciones de manejo, y con prácticas de conservación limitadas, esto debido a que en la zona presenta características geomorfológicas y topográficas no aptas para actividades agrícolas más intensivas, estas tendrían un efecto negativo inmediato en los procesos de degradación.

Cabe mencionar que el factor *erosión del suelo*, también fue involucrado en esta evaluación, y las restricciones fueron más evidentes, ya que en el estudio de erosión se estimó que en las zonas de monocultivo de nopal presentan riesgos altos de degradación. (Figura 21)

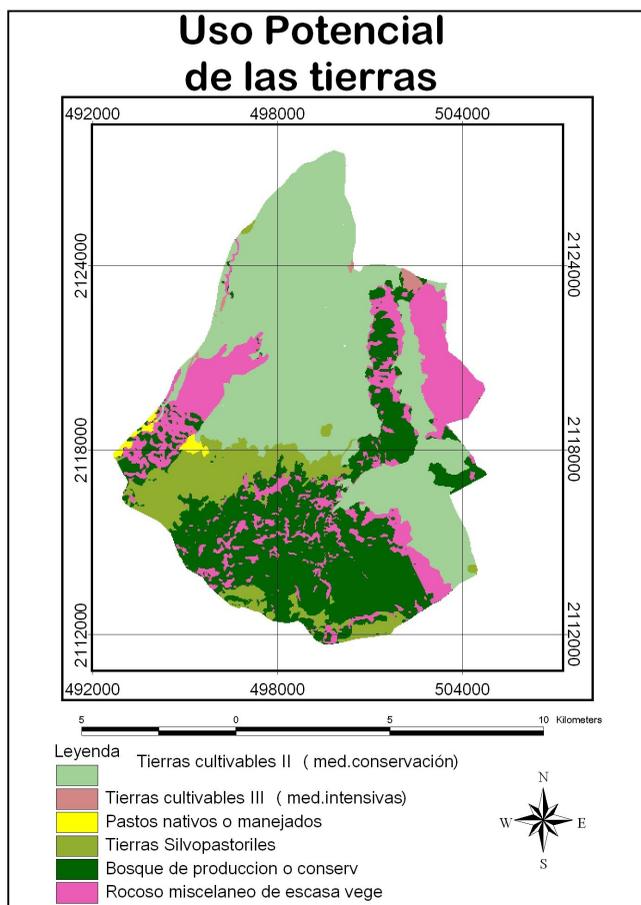


Figura 21. Clases de Capacidad de Uso (2 microcuencas)

La clasificación no tiene carácter restrictivo, sino adaptativo, y sugiere aplicar en toda el área agrícola, medidas de conservación de suelos combinados con prácticas vegetativas. Cabe señalar que en estas prácticas vegetativas se regrese a las plantaciones de maguey pulquero, que fue fuente principal de ingresos en estas poblaciones.

De acuerdo al diagnóstico ofrecido en el Plan Rector de Producción y Conservación (PRPC, 2003), la actividad ganadera extensiva de ganado ovino, es de gran importancia comercial, y los procesos de pastoreo sin control, aunado a las quemadas de pastos para obtener renuevos, hacen que los riesgos sean inminentes, y esta evaluación muestra que la actividad pastoril está restringida tanto por las características físicas como por la fragilidad de la zona, tan solo un 10% de la zona es designada para esta actividad con prácticas de manejo que limiten su sobre aprovechamiento.

5.7. Comparación entre unidades de Capacidad de Uso y uso actual del suelo

En los procesos de ordenamiento del territorio del país, es común encontrar áreas con vocación forestal o pecuaria invadidas por actividades agrícolas de temporal, conjuntamente con pastoreo extensivo, aunado a una intensificación de urbanización en tierras pendientes planas y suelos profundos.

El cuadro 18, muestra el mismo patrón de conflictos entre lo que sería lo más apto con el uso actual.

Cuadro 18. Superficie (ha) de los conflictos entre el uso actual y Capacidad de uso del suelo

Uso Actual/ Capacidad	Rocoso	Bosque Producción	Tierras Silvopastoriles	Pastos nativos	Tierras cultivo III	Tierras cultivo II
Agricultura	214.2	134.6	278.1	35.9	5.8	2464.0
Hortalizas/flores	1.6	12	0.0		12.1	3.2
Urbano	36.2	2.7	0.2	0.3	2.6	500.6
Nopal	356.9	47.2	87	0.0	25.6	1813.4
Otras comunidades Veg	2.3	0.5	0.0	0.0	0.0	10.4
Invernaderos	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4
Matorral inerme	528.5	167.1	7.7	0.0	1.7	226.6
Avena	2.1	9.5	92.3	1.3	0.0	42.8
Agroforestal	207	4.2	1.5	3.5	0.6	32.8
Bosque Pino	472.1	1642.3	483.6	14.5	0.0	42.0
Pastizal	82.1	109.7	127.3	3.5	0.0	26.7
Bosque Encino	94.1	308.3	37.9	0.7	0.0	81.5
Bosque Mixto	152.6	545.0	62.1	8.1	0.0	14.3
Bosque Oyamel	52.0	205.8	21.1	0.0	0.0	0.1

Nota: La forma de interpretar este cuadro es que el Uso actual del suelo se encuentra en funciones sobre una unidad de Capacidad de Uso, indicada en superficie (ha), pero no indica la intensidad

La regulación de actividades mediante calendarios agrícolas bien definidos, ayudara mucho en evitar transporte de sedimentos. Los conflictos más difundidos, son los de sobre utilización en diferentes grados, lo que deberá revertirse a un corto plazo. Aunque hay usos que armonizan bien con los potenciales (agrícolas) la forma de manejar los suelos deberá cambiar a actividades de labranza de conservación conjuntamente con obras como bordos al contorno y otras prácticas combinadas

Cuadro 19. Matriz general de conflictos entre capacidad de uso y uso actual del suelo

Usos / Capacidad	Rocoso	Bosque Producción	Tierras Silvopastoriles	Pastos nativos	Tierras cultivo III	Tierras cultivo II
Agricultura	O+	O+	O+	O+	W	W
Hortalizas/flores	O+	O+	O+	O+	W	W
Urbano	Urbano	Urbano	Urbano	Urbano	Urbano	Urbano
Nopal	O+	O+	O+	O+	W	W
Otras comunidades Veg	W+	W				U
Invernaderos	O					W
Matorral inerme	W+	W	W		U	U
Avena	O+	O+	O+			W+
Agroforestal	O	O+	W	U	W	W+
Bosque Pino	U	W+	W	U		U+
Pastizal	O	O+	W	W+		U
Bosque Encino	U	W+	U	U		U
Bosque Mixto	U	W+	U	U		U
Bosque Oyamel	U	W+	U			U

(O+=Muy Sobreutilizado; O=Sobreutilizado; U+=Muy Subutilizado; U=Subutilizado; W+=Uso adecuado; W=Uso próximo al Adecuado)

El concepto de uso próximo al adecuado, requiere de inversiones importantes, en periodos de mediano plazo, mediante un programa integral de incremento en la productividad de los suelos, con acciones drásticas con impacto regional.

Entre estas están las acciones de reconversión agrícola (cambios patrón de uso del suelo) y cambios en los métodos de labranza así como con obras de restauración y conservación de suelos en puntos críticos y neurálgicos de la cuenca.

La sobreutilización de algunas áreas naturales no es simplemente que disminuya el área original, sino que repercute en la disminución de vegetación nativa que no volverá a establecerse, a desplazamiento de fauna original a espacios más lejanos o ser parte de los efectos nocivos de una agricultura incipiente, la afectación edáfica y los regímenes hídricos se transforman en eventos sin control.

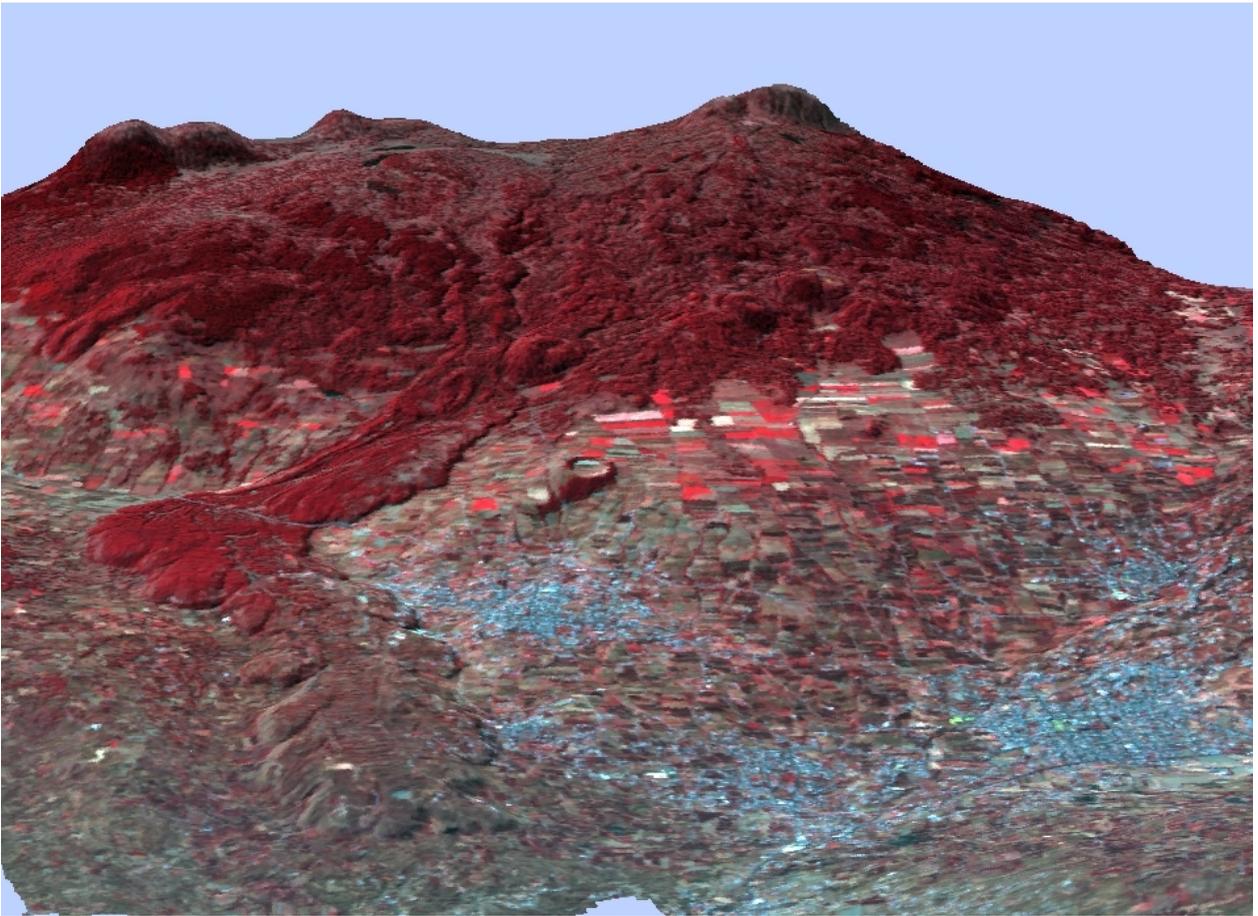


Figura 22. Vista 3D de las cuencas Cilcuayo y Milpa Alta, Imagen Quickbird (2005) falso color

En la figura 22 es notorio como la frontera agrícola (rojos luminosos) se introduce en la zona forestal (rojo intenso). Los colores azulados son áreas urbanas en expansión hacia las partes altas. Del lado inferior izquierdo de la figura es un lecho rocoso (colada lava) que tiene una cubierta de bosque de encino, casi la mitad de ella esta desmontada y con uso de nopal y agricultura de temporal.

5.7.1. *Micro Cuenca Cilcuayo*

De manera individual la micro cuenca Cilcuayo tiene sus efectos particulares en cuanto a este aspecto.

La cuenca Cilcuayo se encuentra en el complejo orográfico Sierra volcánica con estrato volcanes, y con una Meseta basáltica de malpaís en tres áreas de la microcuenca: en la zona central y al

oriente de la misma. Esta geoforma, se caracteriza por una topografía muy heterogénea con una amplia red hidrológica poco caudalosa, pero que actúa como eficaz agente erosivo que ha formado una sucesión de estrechos valles inter montanos. Las unidades orográficas más generalizadas son conos volcánicos, mesetas y llanuras. La topografía de la microcuenca Cilcuayo, de forma alargada, se ubica a una altitud media de 2,965 msnm, abarca 4,668 Ha en el D.F. y 1,368 ha fuera del D.F. No obstante en el plano de las pendientes que antecede, se aprecian otras pendientes fuertes o montañosas, en rangos del 15 -25 % y en menor proporción pendientes colgadas del 25 al 40 %.

5.7.1.1. Capacidad de Uso

La descripción anterior sirvió de referencia para establecer la evaluación de Capacidad de Uso. El resultado obtenido muestra que el 40% de la microcuenca es apta para el desarrollo de bosque, y más de mil hectáreas de estratos rocosos con vegetación mixta escasa, sin posibilidades de una agricultura con medidas intensivas. (Cuadro 20)

Cuadro 20. Superficies de la Capacidad de Uso Cilcuayo

Clase Capacidad (Cilcuayo)	Clave Capacidad	Área (ha)	Proporción
Rocoso misceláneo de escasa vegetación	R	1165.9	24.6
Bosque de producción o conserv	B	1975.3	41.6
Tierras Silvopastoriles	SP	217.0	4.6
Tierras cultivables III (med.intens)	C3	33.3	0.7
Tierras cultivables II (med.conser)	C2	1351.3	28.5

La microcuenca no tiene un desarrollo urbano tan intenso como la de Milpa alta, sin embargo los procesos erosivos más altos se encuentran en la parte de pie de monte de esta microcuenca, en gran medida por la presencia de suelos muy erodables (Foto 3), combinados con pendientes muy inclinadas y carencia de obras de conservación de suelos. La microcuenca tiene una vocación principalmente forestal y de conservación, debido a su alta fragilidad, se requiere de un manejo

agroforestal combinado en las partes medias, y medidas de mitigación intensivas en las zonas agrícolas que se encuentran en la parte noreste. Aunque las condiciones no parecen ser muy convenientes, se encontró que hay zonas con buena aptitud para algunos cultivos anuales y frutales.



Foto 4. Áreas agrícolas en laderas expuestas en microcuenca Cilcuayo

Cuadro 21. Conflictos del uso de la tierra, microcuenca Cilcuayo

Clase Conflicto	Superficie (ha)	Proporción
Muy Sobreutilizado	1650.7	35
Sobreutilizado	61.6	1.3
Uso adecuado de la tierra	1061	22.4
Uso próximo al adecuado	1224	25.8
Subutilizado	700	14.8
Muy Subutilizado	26	0.6
Urbano	14	0.3
Total	4737	99.7

Uso Potencial Cuenca Cilcuayo

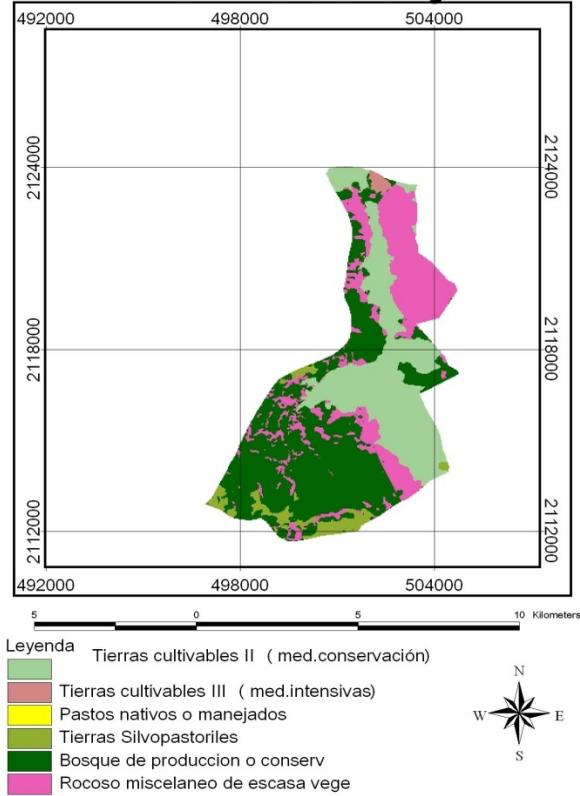


Figura 23. Capacidad de uso en microcuenca Cilcuayo

5.7.1.2. Conflictos de uso de la tierra en Cilcuayo

Por ser un área con mediana presión urbana, se pueden encontrar todavía zonas con poca intervención humana, por lo que los conflictos de utilización no son altos, solo una tercera parte muestra una sobreutilización, debida a la extracción intensiva de productos del bosque.

En lo que respecta a las zonas con uso agrícola adecuado, presentan un gran riesgo de erosión hídrica, debido a las características de manejo de los cultivos (surcados a favor de las pendientes, uso de arados convencionales)

Por otro lado las zonas sobreutilizadas, están localizadas en la parte noreste, y se caracterizan por una agricultura de temporal con periodos de cobertura del suelo de seis meses, lo que implica medio año con suelos desnudos, con poca capacidad de retención de humedad, y por lo tanto periodos prolongados con erosión eólica. (Cuadro 21)

El uso adecuado, se encuentra en la mayoría de la microcuenca, y es el uso agrícola que corresponde (Figura 24) a las características de aptitud con prácticas de conservación, (Figura. Mapa conflictos) esta misma clase de conflicto está presente también en la zona de montaña, la cual se encuentra muy intervenida en pequeñas áreas de desmonte y pastoreo. La zona evaluada como subutilizada corresponde a una la zona agrícola de pie de monte, que es una franja larga con los mayores valores de erosión encontrados en las dos microcuencas. Es importante valorar la aptitud para cultivos alternativos que se adaptaran a las condiciones presentes, que son pendientes inclinadas, suelos medianamente profundos, texturas medias y estructura poco desarrollada, lo que limita su manejo, con altos valores de escurrimientos y una reducida protección superficial, en conclusión, es un área de alto riesgo de degradación.

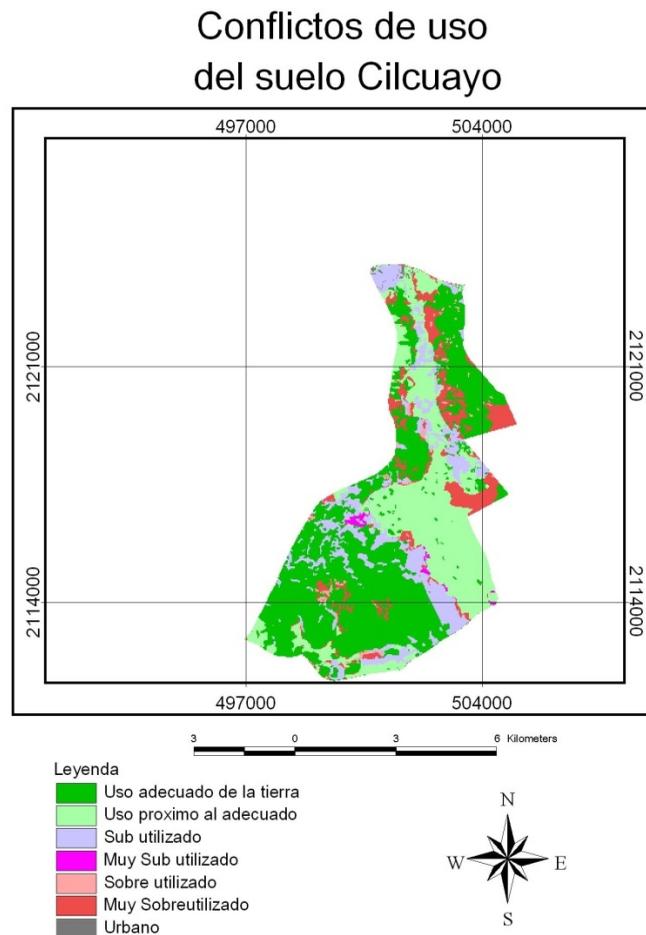


Figura 24. Conflictos del uso de la tierra, Cilcuayo

5.7.2. Microcuenca Milpa Alta

5.7.2.1. Capacidad de uso

En la cuenca Milpa alta, un poco más de la mitad de su área es agrícola con actividades de conservación, las características geomorfológicas y edáficas varían en cuanto a que hay mas homogeneidad topográfica y climática, lo que ayuda a su vocación, sin embargo, hay una vulnerabilidad edáfica mas grande, debido en primer lugar a la exposición de las laderas, casi sin obstáculos naturales que detengan o disminuyan la velocidad de los escurrimientos, por lo que se presentan sistemas de cárcavas que socavan las parcelas fácilmente.

Por lo tanto es importante gestionar obras de conservación de suelos conjuntamente con propuestas de cambios en los patrones de uso del suelo, así como obras de índole hidráulica que disminuyan la velocidad de los escurrimientos desde las áreas forestales.

Cuadro 22. Superficies de la Capacidad de uso cuenca Milpa Alta

Clase Capacidad Uso	Clave _ capacidad	Área (ha)	Proporción
Rocoso misceláneo de escasa vegetación	R	849.8	12.2
Bosque de producción o conservación	B	1202.6	17.3
Tierras Silvopastoriles	SP	903.3	13.0
Pastos nativos o manejados	P	63.9	0.9
Tierras cultivables III (med.intensivas)	C3	15.0	0.2
Tierras cultivables II (med. conservación)	C2	3908.6	56.3

Gran parte del deterioro es debido a la intrusión antropogénica, la cercanía a núcleos urbanos como Milpa Alta (Foto 4), deja ver que áreas muy frágiles con vegetación de bosque y matorral, sobre suelos superficiales han sido intervenidas, lo que ha dejado son áreas descubiertas con un

índice muy alto de escurrimiento, así mismo las áreas desprotegidas con uso agrícola, aceleran el transporte eólico de partículas finas en épocas de estiaje y sedimentos en épocas de lluvias.

La microcuenca tiene una vocación principalmente agrícola (Figura 25) con medidas de mitigación intensivas, las cuales no se han realizado como parte del manejo parcelario normal, ya que debido a las características implícitas de la zona deberían ser comunes.



Foto 5. Áreas nopaleras en pendientes inclinadas y manejo tradicional de maíz

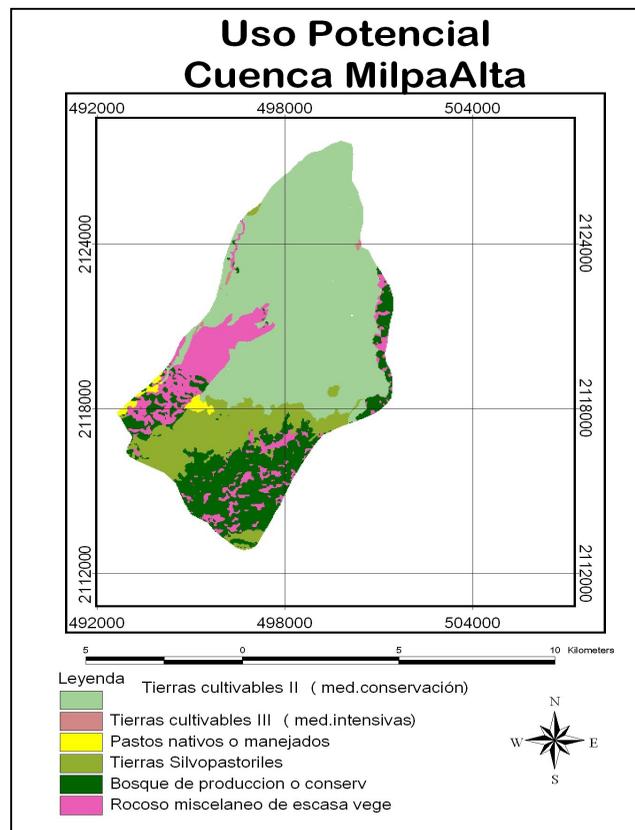


Figura 25. Clases de Capacidad de uso, Milpa Alta

5.7.2.2. Conflictos de uso de la tierra en Microcuenca Milpa Alta

Las superficies con vocación agrícola en la microcuenca tienen que ser reguladas mediante programas de conservación de suelos y manejo adecuado de la fertilización. Por lo que más de la mitad de la superficie tiene un conflicto sobre el uso adecuado, que exige una inversión para adecuarse al uso del suelo actual.

Por otro lado las zonas sobreutilizadas, están localizadas en la parte sur oeste, y se caracterizan por tener vegetación secundaria con relictos de bosque, y que son utilizados en pastoreos extensivos de ganado ovino, con pequeñas y abundantes parcelas agrícolas. (cuadro 23)

Cuadro 23. Conflictos del uso de la tierra, Milpa Alta

Clase Conflicto	Superficie (ha)	Proporción
Muy Sobreutilizado	875.2	12.6
Sobreutilizado	0.6	0.0
Uso adecuado de la tierra	1126.5	16.2
Uso próximo al adecuado	3795	54.5
Subutilizado	578	8.3
Muy Subutilizado	0.2	0.0
Urbano	530.7	7.6
Total	6906.2	99.2

El uso adecuado, se refiere solamente a la compatibilidad de los tipos de vegetación dominantes (bosques), y se aprecia (Figura 26) que en la zona forestal está muy segmentada (sobreutilizada) con actividades perjudiciales que se están ensanchando hacia la zona boscosa. Los procesos erosivos son agresivos, y se requieren de programas intensivos de restauración de la vegetación y retención de sedimentos.

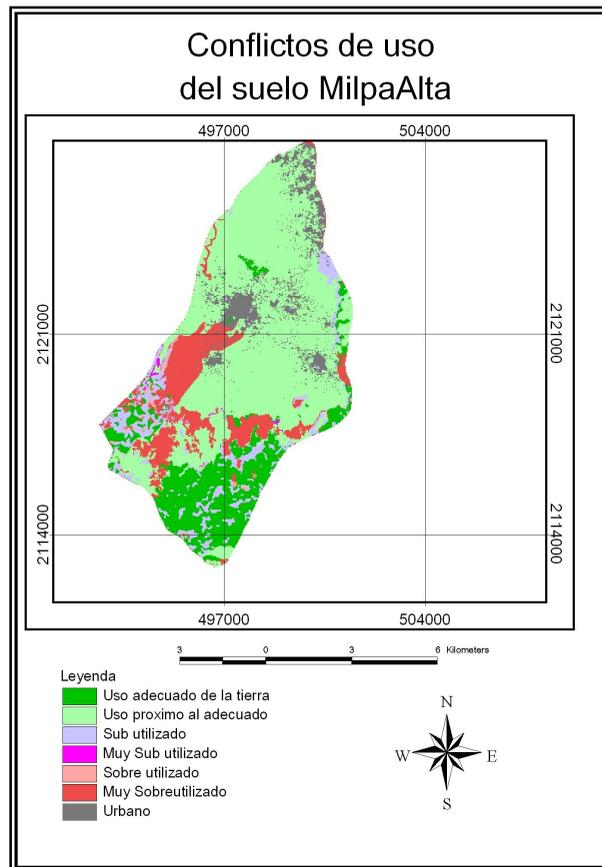


Figura 26. Clases de Capacidad de uso, Milpa Alta

Durante las últimas tres décadas los productores de Milpa Alta encontraron en la producción del nopal un cultivo mucho más rentable (lo cosechan a lo largo de todo el año), que sustituyó a otros tradicionales como el maguey pulquero, maíz, frijol, haba, chícharo y avena forrajera; no obstante en la actualidad se siguen cultivando maíz, frijol y algunas otras hortalizas, actividad que ha generado interés a últimas fechas, debido a la saturación del mercado del nopal.

Se realizan también actividades de tipo ganadero ya que es el principal abastecedor de barbacoa de la capital, realizando el sacrificio de 2,500 a 3,000 cabezas de ovejas a la semana, lo que implica una presión constante en áreas forestales como fuente de áreas de pastoreo y leña.

5.8. Sistema Experto (Terranova)

La comprensión del medio físico se adquiere a través de la observación profunda, la práctica de campo, y el conocimiento teórico de las causas y efectos de los diferentes procesos involucrados en el fenómeno de la erosión.

Para el desarrollo del SE se obtuvo la base de conocimientos a partir de entrevistas con expertos, académicos, técnicos de campo, agricultores con experiencia en el área, manuales y trabajos de investigación.

El conocimiento de conservación fue expresado mediante declaraciones lógicas. Estas declaraciones fueron usadas para recomendar que tipo de práctica de cultivos se haría, o estructura de conservación de suelos, las reglas consideran las variables de uso del suelo, tipo de suelo, topografía, y prácticas que se desarrollan por parte de los agricultores.

Cada regla fue basada en la premisa que las celdas o pixeles tiene un problema de erosión. Las reglas se presentan a continuación:

Regla 1. Cuando hay parcelas con cultivos con baja cobertura del suelo, y los surcos sean bajos y con bajos niveles de materia organica. Puede haber problemas de erosion laminar fuerte.

IF cultivos anuales, baja densidad

AND bajos contenidos materia organica

AND texturas franco arenosas-arenosas

AND pendientes ligeramente inclinadas

THEN Labranza de conservación

Regla 2.

IF Erosion laminar y canalillos fuerte

AND texturas arcillosas, franco arcillosas

AND Encharcamiento

THEN Labranza profunda

Regla 3.

IF Pendientes >15%

AND Cobertura vegetal < 10%

AND cultivos anuales

AND Texturas franco arcillosas-arcillosas

AND Profundidad del suelo < 30 cm

THEN Surcos al Contorno

Regla 4.

IF Pendientes >15%

AND Cultivos anuales

AND suelos franco arenosos, arenosos

THEN Cultivos en fajas

Regla 5.

IF Presencia cárcavas

AND Señales flujo concentrado (depresión)

THEN Canal empastado

Así tenemos más 30 reglas que ofrecen una recomendación sobre que practica realizar o que obra ejecutar conjuntamente con las practicas.

El Sistema Experto selecciona las prácticas de control de la erosión. Y selecciona más de una práctica que sea apropiada.

Para validar los resultados se uso el modelo USPED con los sitios seleccionados que adquirieron valores de cobertura del suelo como factor $C=0.15$ para maíz, $C=0.36$ hortalizas y nopal si se consideraban dentro de una práctica de labranza. Para el caso de surcos al contorno $P=0.30$, de acuerdo a las recomendaciones al manual de prácticas recomendadas para el modelo RUSLE, es un valor promedio con prácticas que complementen a esta.

La secuencia en la consulta (figura 27) es ubicando primero en si hay predominancia de erosión laminar o en cárcavas, posteriormente se pregunta si hay alguna acción que se considere prioritaria (disminuir escurrimientos, detener la erosión, estabilizar pisos de cárcavas, incrementar la infiltración, etc), posteriormente inicia con preguntas sobre variables de sitio (pendientes, pedregosidad, tipo de suelo, escurrimientos)

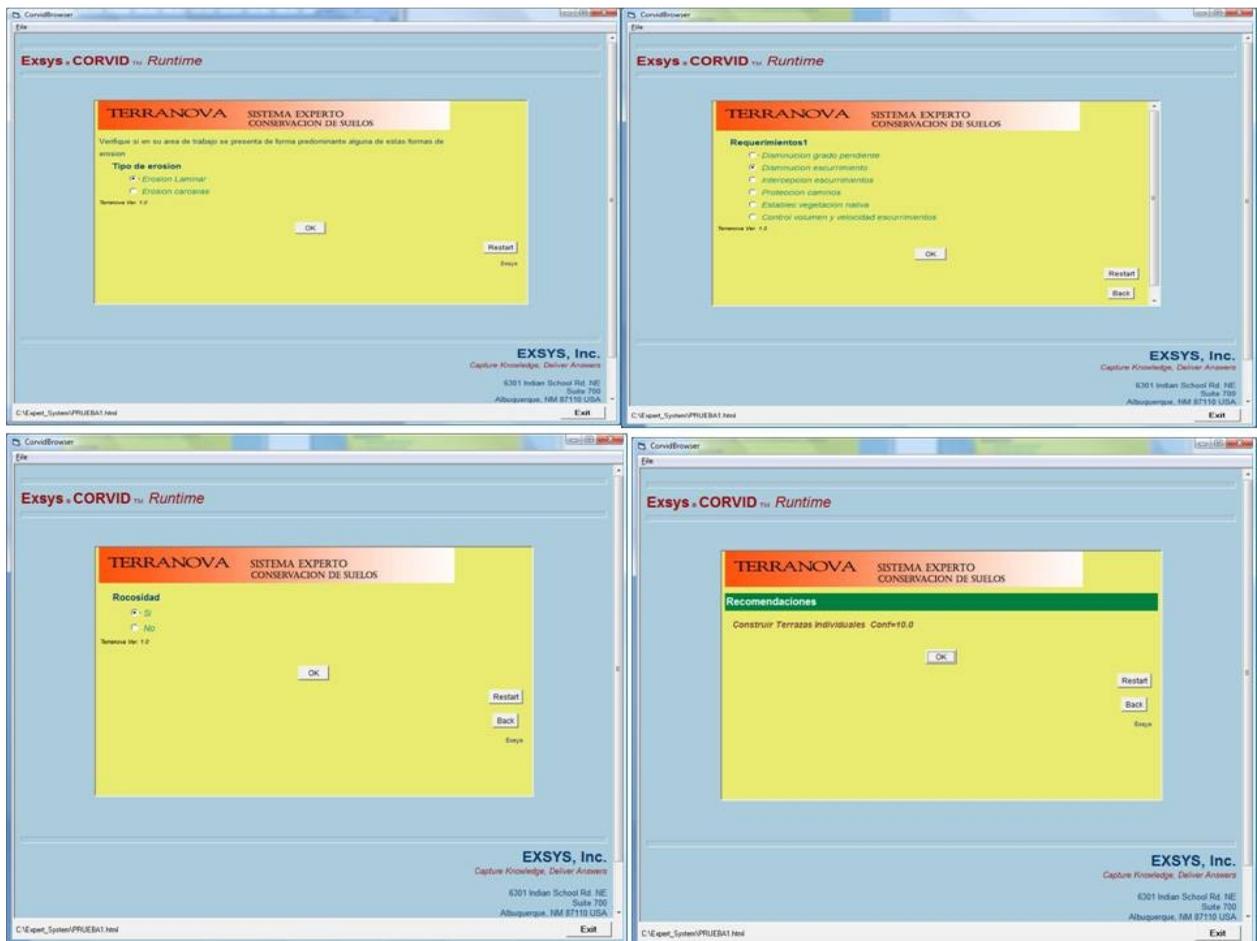


Figura 27. Etapas del Sistema Experto para ofrecer recomendaciones

Al seleccionar la acción prioritaria el sistema hace preguntas sobre las características del sitio y sus valores, para así realizar las búsquedas de las recomendaciones con más probabilidad de éxito.

Cabe señalar que los datos de los sitios se extraen del Sistema de Información Geográfica de forma manual debido a que el sistema EXSYS no cuenta con las funciones requeridas para realizar el proceso de interoperabilidad.

Este procedimiento significa la capacidad que tienen los sistemas para intercambiar información y convertirla a los formatos propios y utilizarla para ejecutar acciones, para después devolver resultados y convertirlos a formatos de salida cartográfica, como lo es en nuestro caso.

La segunda etapa en el desarrollo de este Sistema que Apoya las Decisiones, constara de tres acciones principales:

- Construir la interoperabilidad entre el sistema EXSYS y el Sistema de Información Geográfico, y otros modelos que se vayan añadiendo. El más próximo es el que calcula los escurrimientos superficiales a partir del método de la Curva Numero. Este fue escrito en el lenguaje C- Builder y se construyó con una interface que conecta con el extractor de datos meteorológicos ERIC, a nivel diario, y con información de suelos y cobertura del suelo. Este servirá de apoyo para la siguiente acción.
- Iniciar con trabajo experimental de campo para generar los factores propios del modelo USPED, en cuanto a las relaciones de escurrimientos superficiales, rugosidad del suelo y propiedades topográficas. Resulta útil también conocer las relaciones entre el tipo de cobertura del suelo y las propiedades edáficas.
- Por último se hace necesario aumentar el bagaje de conocimiento del sistema abarcando diferentes condiciones ambientales y de manejo. Así como áreas de conservación de recursos naturales.

El desarrollo del sistema se pretende proyectar para acciones de evaluación y monitoreo de obras de conservación y/o rehabilitación de suelos, con un enfoque holístico y regional, que ofrezca a la vez un medio de enseñanza a estudiantes, técnicos y agricultores sobre cómo abordar problemáticas complejas bajo un enfoque sistémico.

6. CONCLUSIONES

1. El modelo USPED tiene las ventajas de ser geográficamente distribuido, además utiliza pocas variables que son disponibles (modelos de elevación digital, edafología, uso del suelo y vegetación, datos meteorológicos), además de fácil implementación en un SIG. considera en forma precisa la complejidad topográfica que ayuda a calcular la fuerza de transporte. Se puede hacer simulaciones con cambios en la cobertura vegetal y/o obras de conservación. Resulto de gran utilidad en hacer planificación a nivel de cuencas.
2. El modelo USPED no cuantifica la sedimentación, y tampoco considera las variaciones temporales de la sedimentación. Además el USPED utiliza como insumo principal un Modelo de Elevación Digital pero que requiere de una alta resolución espacial horizontal (5 – 20 m). Resoluciones más grandes no producen resultados confiables.
3. Aunado a lo anterior se necesita capacitación en cuanto a generar estos modelos de elevación mediante técnicas de interpolación espacial, ya que los métodos que ofrecen buenos resultados no se encuentran distribuidos en los sistemas de información geográfica más populares.
4. Actualmente contamos con modelos de elevación digital con resoluciones de hasta 2 metros, estos se producen con técnicas laser en vuelos bajos (LIDAR), con estos modelos se puede modelar el terreno de una forma muy precisa y producir las mejores predicciones con alta precisión. Debido a que es una técnica novedosa, también es onerosa y no todo el país está cubierto.
5. Una desventaja al usar el modelo USPED es que los factores de erodabilidad del suelo y cobertura del suelo se tienen que calibrar en zonas climáticas y de manejo agrícola y forestal contrastantes.
6. Los cambios de uso del suelo a través del tiempo son muy útiles en el proceso de planificación regional, ya que nos indica que clases de uso y cobertura han cambiado, en donde y en qué proporción.

7. La clasificación de Capacidad de Uso para áreas con pendientes complejas resulto un complemento muy valioso tanto para la generación de reglas en el sistema experto como para poder identificar las áreas con usos actuales irregulares.
8. Con la finalidad de llegar a mejores decisiones es necesario contar con la información clave que ayude a tener un respaldo técnico y de conocimientos. De esta forma conocer cuál es la dinámica de los cambios del uso y cobertura del suelo a nivel regional trazara las tendencias y de cómo podemos direccionar las actividades que se desprendan de un plan de manejo.
9. La incertidumbre en los resultados obtenidos por el sistema experto esta alrededor del 15 al 20%.
10. La incertidumbre de los resultados esta principalmente representada en la gama de expertos participantes, su formación y trabajo directo en los procesos de toma de decisiones. Otra parte de la incertidumbre se ve reflejada en la resolución espacial del modelo de elevación digital (20 m), ya que en distancias cortas como 5 a 10 m el algoritmo de erosión/deposito no capta las variaciones topográficas.
11. Considerando el punto anterior, el Sistema Experto pudo ofrecer las mejores opciones de obras de conservación y/o practicas de manejo, al hacer el análisis de sensibilidad. El esquema de los expertos es atacar el problema desde las partes altas de la cuenca, siguiendo patrones espaciales de presencia/ausencia de líneas de transporte y sedimentación ofrecidos por el modelo USPED y otras variables de sitio
12. Este tipo de sistemas se completan y se conforman a través del tiempo, por lo que el objetivo primordial es que pueda ser aplicado a otras instancias administrativas como: Áreas naturales protegidas, reservas de la biosfera, unidades de manejo silvestre, etc.
13. Poder realizar la integración de estos sistemas requiere de tiempo y esfuerzos para completar bases de datos, de conocimientos, validar la información de los expertos, etc.
14. El seleccionar muchos sitios no es lo más recomendable, ya que se generan otros patrones de erosión y depósito, y realmente no tienen impacto significativo a nivel cuenca. Además de que se pueden incurrir en gastos innecesarios.

7. BIBLIOGRAFIA

- Barrow C.J. 1991. Land Degradation. Cambridge University Press.
- Beasley, D.B. y L.F. Huggins, 1980. ANSWERS: A Model for Watershed Planning Transactions of the ASAE 23, 4: 938-944
- Bennet H.H. 1939. Soil Conservation. McGraw Hill N.Y.
- Biot, Y., P. M. Blaikie, C. Jackson y R. Palmer-Jones. 1995 *Rethinking land degradation in developing countries*. World Bank Discussion Paper 289. Washington D.C., 94 pp.
- Bolstad, P., 2002, *GIS Fundamentals* (Minnesota: Eider Press).
- Boltvinik, Julio. (2002) "Mapa de estratificación social e inadecuación ambiental de la zona metropolitana de la Ciudad de México". Citado en Gobierno del Distrito Federal- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2003).
- Burrough, P., and McDonnell, R., 1998, *Principles of Geographical Information Systems* (New York: Oxford University Press).
- Castillo, V. M. 2004. La estrategia temática para la protección del suelo: un instrumento para el uso sostenible de los suelos en Europa. *Ecosistemas XIII* (1): eneroabril. Disponible en: <http://www.aeet.org/ecosistemas/041/informe2.htm>.
- Clarke, K., 2001, *Getting Started with Geographic Information Systems* (Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall).
- Comision Nacional Forestal. 2007. Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y Prácticas. SEMARNAT. Cuarta reimpresión.
- Cotler, H., A. Priego, C. Rodríguez y C. Enriquez. 2004. Determinación de zonas prioritarias para la eco-rehabilitación de la cuenca Lerma-Chapala. *Gaceta ecológica* 71: 79-92.
- Davis, B., 2001, *GIS: A Visual Approach* (Canada: Onword Press).
- Dregne H. E 1987 Soil Erosion Cause and Effect. *Land Police* 4,4pp 412-418
- Dueker, K., 1979, Land resource information system: a review of fifteen years' experience. *Geo-Processing*, 1, 105-128.
- Elwell, H.A. y M.A. Stocking, 1982. Developing a Simple yet Practical Method of Soil Loss Estimation Tropical Agriculture. Vol. 59, 1: 43-48

- European Community. In: H. Hurni K. Tato (Editors). Conservation and small scale Farming. GB-ISCO-WASWC, 151-162
- Farres, P.J. 1980. Some observations on the stability of soil aggregates to raindrop Impact. *Catena* 7, 223-231
- Firebaugh, M., 1988, *Artificial Intelligence: A knowledge-based Approach* (New York: Boyd and Fraser).
- Fischer, M.M., 1994, From conventional to knowledge-based geographic information systems, *Computers, Environment, and Urban Systems*, Vol.18, No.4, pp.233-242.
- Foster, G.R. y L.D. Meyer, 1975. Mathematical Simulation of Upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: Anonymous 190-207
- Frye, M.W., S.A. Ebelhar, L.W. Murdock, and R.L. Blevins. 1982. Soil erosion effects on properties and productivity of two Kentucky soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1051-1055
- Ghadiri, H. and D. Payne. 1977. Raindrop Impact Stress and breakdown of soil crumbs. *Journal of Soil Science* 28, 247-258
- Gobierno del Distrito Federal - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2003). Experiencias hacia el manejo sustentable de los recursos naturales en el Suelo de Conservación del Distrito Federal. Planeación participativa en ejidos y comunidades. Ejido Santa Ana Tlacotenco, Milpa Alta. Folleto 32 p. GDF-SMA, FAO, ADER, S.C. y ANEC
- Gobierno del Distrito Federal –Comisión de Recursos Naturales. (2000) Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal. 75 p.
- Helena Cotler, Esthela Sotelo, Judith Dominguez, María Zorrilla, Sofía Cortina† y Leticia
- Quiñones. 2007. La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*. 83, 73 p. SEMARNAT. México
- Horton, R.E., H.R. Leach y R. Van Vliet, 1934. Laminar Sheet-flow. *American Geophys Union Transactions* 2, 393-404
- Hudson, W .N. 1991. *A study of the reasons for success or failure of soil conservation projects*. FAO Soils Bulletin 64.
- Huinink, J. T. M. 1998. Soil quality requirements for use in urban environments. *Soil and Tillage Research* 47: 157-162.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática-GDF (2001) Cuaderno Estadístico Delegacional. Milpa Alta, D.F. 156 p.

- Jankowski, P., and Nyerges, T., 2001, *Geographic Information Systems for Group Decision Making* (London: Taylor and Francis).
- Karlen, D. L., M. J. Mausbach, J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris y G. E. Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61: 4-10.
- Kern, J. S. y M. G. Johnson. 1993. Conservation tillage impacts on national and atmospheric carbon levels. *Soil Science Society of America Journal* 57: 200-210.
- Knisel, W.G. Jr. (Editor), 1980. CREAMS: A field Scale Model for Chemicals Runoff and erosion from Agricultural Management Systems. U.S. Department of Agriculture Conservation. Lafayette, USA.
- Lafren, J.M., and E.J. Roose, 1997. Methodologies for Assessment of Soil Degradation Due to Water Erosion. In R. Lal, W.H. Blum, C. Valentine, and B.A. Stewart (editors), *Methods for Assessment of Soil Degradation*. CRC Press, LLC, USA.
- Lal R, 1976 Soil erosion on Alfisols in Western Nigeria: III. Effects of rainfall characteristics *Geoderma* 5,389-401
- Lal R. 2003. Soil erosion and the global carbon Budget. *Environmental International*. 29, 437-450
- Lal, R. 1988. Monitoring Soil Erosion Impact on Crop Productivity. In R. Lal (Editor). *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conservation Society, USA.
- Lal, R. 1999. Global carbon pools and fluxes and the impact of agricultural intensification and judicious land use, 45-55 En: *World Soils Resources Report, Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean*. Proceedings of an IFAD/FAO Expert Consultation, FAO, 113 pp
- Lane, L.J. y M.A. Nearing (Editors), 1989. USDA. Water Prediction Project. Hillslope profile model documentation NSERL Report No.2 National Soil Erosion Laboratory, USDA-ARS, W.
- Leung, Y., 1997, *Intelligent Spatial Decision Support Systems* (Berlin: Springer).
- Lilburne, L., Benwell, G. and Buick, R., 1996, GIS, Expert Systems, and Interoperability. In *Proceedings of the 1st international conference in GeoComputation* (Leeds, UK), pp.527-541.
- Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D., and Rhind, D., 2005, *Geographic Information Systems and Science* (New York: Wiley).

- Magulis, S. 1992. *Back-of-the-envelope estimates of environmental damage costs in Mexico*. Working Papers, World Bank, 34 pp.
- Malczewski, J., 1999, *GIS and Multicriteria Decision Analysis* (New York: John Wiley and Sons).
- Mc Intire, J. 1994. A review of the soil conservation sector in Mexico. 107-128pp. En: E.
- Lutz, S. Pagiola y C. Reiche (eds.). *Economic and institutional analyses of soil conservation projects in Central America and the Caribbean*. World Bank Environment Paper 8, 224 p.
- Mitas, L., Mitasova, H., 1998. Terrain Analysis and erosion modeling,. <http://www2.gis.uiuc.edu:2280/modviz/viz/erosion.html>
- Mitasova, H., J.Hofierka, M. Zlocha, L.R. Iverson, 1996. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS; Int.J. Geographical Information Systems, vol. 10 n°5, 629-641.
- Moore, I. D., Burch, G. J., 1986a. Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. Soil Science Society of America Journal, 50, 1294-1298,
- Moore, i. D., Wilson, J. P., 1992, Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. Journal of Soil and Water Conservation, 47, 423-428.
- Moore, T., 2000, Geospatial expert systems" In Openshaw, S. and Abrahart, R., *GeoComputation*, Taylorand Francis
- Morgan. R.P.C. , J.N. Quinton, JRJ. Rickson, 1992. Soil Erosion Prediction Model for the
- Mutchler, J.P. y K.C. McGregor.1983. Effect of slope in the Universal Soil Loss Equation for low slopes. Journal of Soil Water Conservation 36, 5:300-302
- Nil, D., U. Schwertmann. U. Sabel-Koschella, M. Bernhard, J. Breuer, 1996. Soil erosion by water in Africa: Principles, Prediction and Protection: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- Okoth, P.F. 2003. A Hierarchical method for soil erosion assessment and spatial risk modeling. A case study of Kiambu District in Kenya.
- Pimentel D. and Kounang N. 1988. Ecology of soil erosion in ecosystems: 416-426.
- PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente) 2000. *Annual Review*. Nairobi, Kenia.
- Reeve, IJ., 1982. A splash transport model and its application to geomorphic measurement. Z. Geomorphologie N.F. 26, 1:55-71
- Renard, K.G. , G.R. Foster . G.A. Weesies y J.P. Porter. 1991. RUSLE, Revised Universal Soil Loss Equation. Journal of Soil and Water Conservation, 41, 1: 30-33

- Robinson, A.R. 1979. Sediment yields as a function of upstream erosion. In: A.E.Peterson. JB. Swan (Editors). Universal Soil Loss Equation: Past, Present and Future. Soil Science Society of America. Special Publication No. 8. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- Rose, C:W:, 1988. Research Progress on Soil Erosion Processes an Basis for soil conservation practices. In: R. Lal (Editor), Soil erosion Research Methods. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, USA.
- Rosee E. 1988. In conservation Farming in steep lands (soil and water conservation society) Ankerry I.A: pp 130-131
- SEMARNAT-Colegio de Postgraduados, 2002. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la Republica Mexicana. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F.. Mexico, Escala 1:250,000.
- Sombroek, W. G., F. O. Nachtergaele y A. Hebel. 1993 Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio* (12)7: 417-426.
- Star, J., and Estes, J., 1990, *Geographic Information Systems: An Introduction* (Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall).
- Wendt, R; Burwell, RE. . 1985. Runoff and soil losses for conventional, reduced and no-till corno Journal of Soil and Water Conservation. 40: 450-454.
- Williams, J.R. 1975. Sediment routing for small scale. Agricultural Watersheds. Water Research Bulletin 11 (5)
- Williams, J.R. C.A. Jones y P.T. Dyke. 1990. The EPIC Model In: A.N. Sharpley y J.R.
- Williams (Editors). EPIC-Erosion Productivity. Impact Calculator: 1 Model Documentation, USDA Technical Bulletin Number 1768. Chapter 2, 3-02
- Wischmeier, W.H. y D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to Conservation Planning. United States Department of Agriculture. Agricultural Handbook, No. 537. Washington, DC, USA.
- Worboys, M., and Duckham, M., 2004, *GIS: A Computing Prespective*, CRC Press.
- Zeiler, M., 1999, *Modeling Our World: The ESRI Guide to Geodatabase Design* (Redlands: ESRI Press).
- Zingg, A.W., 1940. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. Agricultural Engineering. 21, 2: 59-64.