

INDICADORES PARA ESTIMAR LA SOSTENIBILIDAD AGRÍCOLA DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO REVENTADO, CARTAGO, COSTA RICA¹

Laura Ramírez², Alfredo Alvarado*, Rosendo Pujol**,
Antonio McHugh***, Luis Guillermo Brenes****

Palabras clave: Indicadores, sostenibilidad, capacidad de uso, erosión, fósforo, Andisoles.

Keywords: Sustainably, indicators, land capability, soil, erosion, phosphorus, Andisols.

Recibido: 19/02/08

Aceptado: 18/06/08

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue identificar indicadores para evaluar la sostenibilidad agrícola en la cuenca media del río Reventado. Se encontró una acumulación Ca, Mg y K en los terrenos y una disminución del porcentaje de saturación de acidez con los años de uso del suelo en agricultura, los suelos han mejorado su fertilidad con el tiempo por efecto antrópico. Se encontró una tendencia similar con el P disponible, cuyos niveles aumentaron en $\approx 2,3 \text{ mg.l}^{-1}.\text{año}^{-1}$, eventualmente podría reducirse la aplicación de este elemento, lo que haría más sostenible el sistema de producción. Los niveles de erosión, en la mayoría de las fincas, fueron moderados; el grosor del horizonte A y el P disponible disminuyeron al pasar de erosión leve, a moderada y a severa. El índice estructural y la capacidad de uso de las tierras indicaron en las Clases II y III, suelos moderadamente susceptibles a ser degradados, y en las clases mayores alta susceptibilidad a ser degradados. No se encontró diferencias significativas entre las clases de capacidad de uso de la tierra y la producción de los cultivos. La producción de papa y cebolla fue mayor en zonas con riego, donde la relación B/C mayor se encontró en Tierra Blanca, debido al manejo del sistema productivo. Los indicadores económicos y sociales evaluados fueron positivos para ambas regiones, no así los indicadores ambientales. La

ABSTRACT

Development of indicators for sustainable agriculture for the Reventado river watershed, Cartago, Costa Rica. This work was designed to generate sustainability indicators for the agricultural sector of the Reventado River watershed. Land use through time increased soil cations accumulation (Ca Mg y K) but decreased acidity saturation as a result of fertilizer and lime applications. Available P also increased with the period of land use, increasing at an approximated rate of $2.3 \text{ mg.l}^{-1}.\text{year}^{-1}$. The increase of P with time might allow the farmers to reduce its application to reduce costs and improve sustainability of the ago-ecosystem. Most farms suffered moderate rates of erosion. As erosion rates increased, the thickness of the A horizon and available P contents diminished, all of this while erosion rates increased from nil, to moderate to severe. Better soil structural index values were found in soil capability classes II y III, while in higher capability classes' structure was weaker and soils more susceptible to erosion. No significant differences were found between land capability classes and crop yields. Both potato and onion yields were better in irrigated fields, the fact reflected also in higher B/C ratios, particularly around Tierra Blanca. Economical and social indicators of the study were positive but environmental indicators were negative for

1 Este trabajo forma parte de la tesis de M.Sc. del primer autor. Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
2 Autor para correspondencia. Correo electrónico: ramirezl@racsa.co.cr
* Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

** Programa de Desarrollo Urbano Sostenible (PRODUS). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
*** Escuela de Geografía. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
**** Instituto de Investigaciones Sociales, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

actividad agrícola aún se mantiene como una actividad rentable para los productores de la cuenca media del río Reventado.

Tierra Blanca and Llano Grande communities. However, agricultural activities are an attractive and economic possibility for farmers at the Reventado River watershed.

INTRODUCCIÓN

Uno de los retos fundamentales del sector agropecuario es producir a partir de un uso racional de los recursos naturales, combinando criterios económicos, de equidad y respeto ambiental. Para ello se debe promover un modelo de desarrollo centrado en la búsqueda del mejoramiento de la calidad de vida humana, sin agotar la capacidad de carga de los ecosistemas, de manera que los beneficios de la naturaleza y la sociedad alcancen no sólo para las generaciones presentes, sino para las venideras (Serageldin 1996, Müller 1997, WCED 1987, Araya et al. 1995).

La agricultura sostenible es esencial en la vida humana, ya que siempre se necesitará producir alimentos para una población creciente, por ello es preciso cuidar el recurso suelo (Etchevers 1999). Además, para un manejo sostenible de los agroecosistemas, se deben considerar la productividad, resiliencia, estabilidad y equidad, considerando las dimensiones ecológica, social y económica (Beets 1990, Baldares et al. 1993, Gutiérrez 1994, Alvarado 1995).

Para estimar la sostenibilidad se utilizan indicadores, que son herramientas para resumir y simplificar información de naturaleza compleja de una manera útil. Pueden ser números o cualidades que ponen de manifiesto el estado o condición de un proceso o fenómeno en relación con la sostenibilidad y permiten entender cómo evolucionan las cosas a través del tiempo (Adrianse 1993, De Camino y Müller 1993, Winograd 1995, Guzmán 1997). Pueden definirse con diferentes grados de precisión y agregación (Alvarado 1995, Müller 1997) y permiten dar avisos sobre tendencias de la calidad de la tierra, evaluar los

usos agrícolas y guiar decisiones de manejo y de políticas (Müller 1996, Comerma 1997).

Los indicadores son importantes para tomar decisiones y acciones en los sistemas productivos; es así como el grado de erosión y el índice estructural reflejan las limitaciones que se puede encontrar para el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil, y están relacionados con el arreglo de las partículas y los poros. Los indicadores químicos, como disponibilidad de nutrimentos, se refieren a condiciones que afectan las relaciones suelo-planta (SQI 1998). El contenido de materia orgánica (MO) del suelo impacta el reciclaje de nutrimentos, la retención de agua y pesticidas y la estructura del suelo. La profundidad del suelo superficial impacta el volumen de enraizamiento y la disponibilidad de nutrimentos, la capacidad para mantener el crecimiento y la contaminación ambiental (Karlen 1997).

La degradación de los suelos, y en consecuencia de su calidad, puede ser vista como una característica inherente al suelo, gobernada por procesos de formación genética del suelo, o como la condición o salud del mismo, producto de los cambios provocados por la actividad humana (Acton y Gregorich 1995, Pla 1995). La influencia antropomórfica puede separarse en contemporánea o histórica, según su influencia en el manejo y análisis de los ecosistemas (Richter 2007). Algunos factores que influyen en la degradación de los suelos son: 1) la pérdida de su estructura, cambio que puede determinarse con el indicador "índice de estructura del suelo" (Oleschko et al. 1992, Pieri 1995); 2) la reducción del contenido de MO suelo (que se determina con el % MOS); 3) las pérdidas de partículas del suelo, y 4) la

pérdida de nutrimentos que se pueden determinar con los niveles de erosión de los suelos. Las consecuencias de estos factores se hacen evidentes en el incremento de costos de producción, reducción de rendimientos, baja competitividad de la agricultura y reducción del valor comercial del suelo (Lal 1998, Herrick 2000).

La capacidad de uso de la tierra es un indicador compuesto que permite definir el uso más intensivo que una unidad de tierra puede soportar sin deterioro de su capacidad productiva, sin excluir usos de una intensidad menor (Lücke 1999). Su determinación en Costa Rica, se realiza con la metodología oficial de clasificación de tierras (MAG-MIREMEN 1995), que consiste en una serie de parámetros fisiográficos y edáficos.

La acumulación de ciertos elementos químicos puede también utilizarse como indicador de sostenibilidad, en el sentido de que su ganancia o pérdida puede afectar negativa o positivamente el comportamiento del ecosistema suelo. Los suelos Andisoles del Valle Central de Costa Rica han sufrido un fuerte impacto antrópico, que se refleja en acumulaciones de P (Soto 1998); este fenómeno ocurre al reaccionar este elemento con la alofana o complejos de humus-aluminio y afectar su disponibilidad para las plantas (Shoji et al. 1993). El contenido de este elemento se puede utilizar como un indicador, ya que su contenido está relacionado con las aplicaciones de fertilizante, e indirectamente con la pérdida de suelo por erosión.

La erosión hídrica es otro proceso que afecta la calidad de las tierras. Desde el punto de vista agrícola, los procesos erosivos se explican por la labranza inadecuada, que destruye la estructura del suelo y lo pulverizan y exponen para ser transportado por agua de escorrentía (Martínez 2006). Otros fenómenos antrópicos, como la construcción defectuosa de caminos rurales y la explotación de materiales a cielo abierto, también causan pérdidas importantes de sedimentos, que se miden como erosión y causan un impacto mayor en el deterioro del ecosistema que el proveniente de la agricultura.

Cuando la erosión se produce sin intervención antrópica se llama erosión geológica o

natural. Este proceso ocurre en la cuenca media del río Reventado, donde se menciona la existencia de la avalancha de Prusia–Tierra Blanca, también identificada como lahares por Dóndoli y Torres (1954), o “*debris avalanche*” por Alvarado et al. (2004). Este tipo de pérdida de materiales, ocurre de manera natural en formaciones derivadas de cenizas volcánicas, materiales con poco grado de estructuración y de fácil arrastre en este tipo de terrenos, no solo en Costa Rica sino también en otros países tropicales (Zinck 1977).

En la cuenca del río Reventado, la vegetación del parque Prusia ha protegido el área de movimientos en masa (Hopgood 1999), aunque Gómez (2002) indica que al menos 20% de los sedimentos medidos en la cuenca proceden de movimientos en masa y no de erosión laminar. La mayoría de las cuencas hidrográficas de Costa Rica evidencian un fuerte deterioro de los recursos naturales. Esta situación se hace más crítica en zonas de ladera y con agricultura intensiva. Para disminuir y corregir estos efectos se utilizan indicadores que permitan estimar el efecto de las intervenciones sobre el sistema.

Las áreas volcánicas con potencial agrícola en el país incluyen los subórdenes: Vitrandes de altura, los Udands de clima medio y los Ustands del piedemonte (Alvarado et al. 2001), todos suelos sometidos a agricultura intensiva. Zamora y Bao (1969) y Zinck (1977), indican que tanto en Perú como en Ecuador, este tipo de suelo también se utiliza para una agricultura intensiva y mecanizada.

La cuenca del río Reventado tiene importancia en la producción agrícola, en ella se produce el 90% de la papa que consume el país, la cebolla representa la principal fuente de ingreso para el 82,7% de los agricultores, ocupando el primer lugar en el área de siembra (MINAE 1996, Parral 2004). No obstante, se presentan problemas de sostenibilidad en laderas que pueden obedecer a presiones humanas (Lindarte y Benito 1991) y a la ausencia de indicadores adecuados para evaluar el desarrollo de la actividad agropecuaria. En este sentido el objetivo de este trabajo fue identificar indicadores para evaluar la sostenibilidad agrícola en la cuenca media del río Reventado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

La cuenca del río Reventado está ubicada al norte de la ciudad de Cartago, en el flanco suroeste del Volcán Irazú, entre las coordenadas geográficas 83° 51' 28" a 83° 57' 19" O y 9° 50' 25" a 9° 58' 28" N, que corresponden a la proyección Lambert de 202,700 a 217,250 N y 541,500 a 552,150 E de la hoja topográfica Istarú (IGN 3445-IV).

La cuenca se origina en las faldas de los cerros Sapper (3400 msnm), Retes (3161 msnm) y Cabeza de Vaca (3020 msnm) quedando su extremo más oriental 2 km al sur-este del cráter activo del Volcán Irazú. Forma parte del sistema fluvial del río Reventazón. Tiene una extensión de 2.227,6 ha. Pertenece a la zona de vida de Bosque Húmedo Montano Bajo (Holdridge 1987). El cauce principal tiene una longitud de 12 km caracterizado por tener fuertes pendientes.

Los suelos en su mayoría son de origen volcánico (Andisoles), profundos, de texturas medias a livianas, porosos, bien drenados y fértiles. El uso actual de la tierra es un sistema de cultivo limpio usado en sucesiones continuas para la producción de hortalizas (papa, cebolla, zanahoria, remolacha). En menor porcentaje, se encuentran las praderas y escasas áreas de bosque secundario, que se observa a orillas de ríos y quebradas.

Metodología

Se seleccionó al azar una muestra de 80 fincas (25% del total de las fincas) correspondientes a 123 parcelas en la cuenca media del río Reventado, alrededor de los poblados de Tierra Blanca y Llano Grande. En la zona de Llano Grande la muestra consistió de 36 fincas, correspondientes a 63 parcelas; para Tierra Blanca la muestra fue de 44 fincas correspondiente a 60 parcelas. Los criterios para la selección de las parcelas fueron: sistemas de producción de papa o cebolla y diferentes unidades de capacidad de uso de la tierra. Se realizó y aplicó una encuesta

a cada productor (dueño de la finca) de la muestra seleccionada durante el periodo comprendido de 1995 a 1998, donde se recopiló la información sobre: años de cultivar la tierra, sistemas de producción, producción, costos de producción, ingresos por venta del producto e información socioeconómica. El área comprendida en esta investigación fue de 241,7 ha, lo que representó una cobertura del 10,85% del área total de la cuenca (2.227,6 ha).

A cada parcela en el año 1995, se le realizó un análisis de suelo a 2 profundidades (0-20 y 20-40 cm) para un total de 246 muestras de suelo, tomadas previo a la siembra. Para medir la profundidad del suelo se utilizó un barreno. Los parámetros evaluados fueron pH, Al, Ca, Mg, K, P, Zn, Mn, Cu, Fe, N, S, MOS y textura. El pH se midió en agua 1:10; el Al, Ca y Mg en CaCl 1N; el K, P, Fe, Zn, Cu y Mn en Olsen Modificado, la lectura del P se realizó en forma colorimétrica; el N se determinó por el método de Kjeldahl; el S se extrajo con fosfato monobásico de calcio (turbidimétrico); la MOS por el método Walkley y Black; la textura por el método de Bouyoucos (Bertsch 1995, Henríquez y Cabalceta 1999). Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Suelos del Ministerio de Agricultura y Ganadería.

A cada parcela en el campo se le determinó la pedregosidad, pendiente (con un clinómetro), viento, erosión visible (con base en la metodología FAO), zona de vida, drenaje y las unidades productivas por tipo de cultivo y sistema, topografía y manejo. En el año 1998, se determinó la capacidad de uso según la metodología oficial (MAG-MIRENEM 1995), el uso actual y el conflicto de uso.

Indicadores empleados en el estudio

Indicador 1. Disponibilidad de bases cambiables

Con base en la información suministrada por los productores sobre los años de estar la tierra bajo uso agrícola, se procedió a analizar para cada parcela las siguientes variables:

- Capacidad de Intercambio de Cationes Extraíbles (CICE)= $Ca+K+Mg+Al$
- Acidez= pH
- % Saturación Acidez (% SA)= $Al/CICE \times 100$
- Suma de bases (Σ Bases) = $Ca+K+Mg$

Para cada variable, se hizo un agrupamiento con base en los años de estar la parcela bajo uso agrícola. Este agrupamiento se hizo por décadas y se calculó el promedio para ese periodo, la desviación estándar de los datos y la unión de puntos naturales que muestran la tendencia general. Este procedimiento permitió estimar diferencias en la disponibilidad de cada una de las variables analizadas, las cuales posiblemente han sido causadas por cambios en el uso de la tierra en estos periodos, así como el efecto acumulativo del uso continuo del terreno.

El agrupamiento en décadas se hizo por las siguientes razones:

1. No se realizó el agrupamiento en quinquenios o trienios ya que habría faltado información en algunos grupos y de hacerlo cada 20 o 30 años, dejaba muy pocos grupos para observar la tendencia de los datos.
2. Al agrupar los datos por décadas, se logró suavizar el efecto “memoria” de los informantes en cuanto a los años de uso de la tierra, del número de cultivos sembrados por año y de la cantidad de nutrimentos adicionada por año.

Indicador 2. Contenido de P disponible

El contenido de P disponible se estimó por el método de Olsen modificado (Henríquez y Cabalceta 1999), método que según varios autores estima apropiadamente este nutrimento en el suelo (Iturriaga 2006). Se hizo un agrupamiento de las parcelas con base en los años de estar bajo uso agrícola. Este agrupamiento se hizo por décadas y se calculó el promedio de P disponible para ese periodo, la desviación estándar de los datos y la unión de puntos naturales que muestran la tendencia general.

El agrupamiento en décadas se hizo además de las razones antes expuestas debido a que la pérdida de suelo, y por ende de P por erosión, depende de los eventos climáticos que ocurran, por lo que se emplearon décadas para estimar su efecto promedio.

Indicador 3. Erosión

Para determinar el grado de erosión de los suelos se midieron en el horizonte A los valores mínimos, máximos y promedio de: grosor horizonte A (cm), P disponible ($mg.l^{-1}$) y MOS (%) en todas las parcelas, de la siguiente manera:

- Erosión (metodología de la FAO, MAG-FAO-UNED 1994), con la siguiente escala: Nula (1), Leve (2), Moderada (3), Severa (4), Muy Severa (5).
- Profundidad Horizonte A: se tomaron las mediciones en campo con un barreno.
- Fósforo: P-Olsen mod. $mg.l^{-1}$, analizado en el Laboratorio de Suelos MAG.
- Materia Orgánica Suelo: %MOS (combustión húmeda), analizado en el Laboratorio de Suelos MAG.

Indicador 4. Índice estructural (IE)

El índice estructural IE (Pieri 1995), se determinó como la relación entre el contenido de MO y la fracción mineral fina del suelo, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$IE = \% \text{ MOS} / (\% \text{ Limo} + \% \text{ Arcilla}) \times 100$$

Valores de IE inferiores a 5 indican suelos degradados, IE=5-7 suelos con alto riesgo a la degradación física por encostramiento o compactación, IE=7-9 suelos con moderado riesgo a la degradación y IE>9 son suelos estructuralmente estables.

Indicador 5. Capacidad de uso de la tierra

La capacidad de uso se determinó con la metodología MAG-MIRENEM (1995), en la cual:

- Clases I, II, III permiten el desarrollo de cualquier actividad incluyendo la producción de cultivos anuales. La selección de las actividades dependerá de criterios socioeconómicos.
- Clases IV, V, VI su uso se restringe al desarrollo de cultivos semi-permanentes y permanentes. En la clase IV los cultivos anuales se pueden desarrollar únicamente en forma ocasional.
- Clase VII tiene limitaciones tan severas que solo permite el manejo del bosque natural primario o secundario.
- Clase VIII incluye terrenos que no permiten ninguna actividad productiva agrícola, pecuaria o forestal, siendo, adecuada únicamente para la protección de los recursos naturales.

Indicador 6. Rendimiento de cultivos

Se determinó para cada parcela la producción correspondiente de cada cultivo, durante 2 ciclos de siembra. Para ello, con una balanza se pesó en el campo una muestra representativa del cultivo en un área de 14 m². Para el caso de la papa se limpió la tierra antes de pesarla y en el caso de la cebolla se arrancó y dejó unos días encima de la era para que perdiera agua antes de pesarla. Se realizó un análisis de regresión y se le aplicó un ANDEVA a esta variable en relación con la capacidad de uso, ubicación de las parcelas y conflicto de uso de la tierra. Se determinó el rendimiento promedio de papa y cebolla para cada ciclo de producción. Se analizó el efecto de este indicador con la erosión, para ello se agruparon las parcelas por niveles de erosión, sistema productivo, tipo de cultivo y se les determinó la producción promedio.

Indicador 7. Relación beneficio/costo

Para cada finca se calculó los costos de producción y los ingresos por la venta de productos. La relación beneficio/costo se calculó al hacer la diferencia entre los ingresos y los gastos para cada unidad productiva, incluyendo el valor

de la tierra. Se elaboró una matriz con los valores mínimos, máximos y promedio de la relación beneficio/costo para las fincas con conflicto de uso y sin conflicto de uso. Además se calculó el promedio de este indicador para cada zona.

Interacción de indicadores

En el trabajo de Ramírez (2007) se incluyen todos los indicadores estimados, de los cuales se seleccionaron algunos económicos, ambientales y sociales en las parcelas cultivadas con papa. Los indicadores económicos fueron: producción (t.ha⁻¹), relación beneficio/costo, disponibilidad de riego (% parcelas con riego), acceso al crédito (% agricultores); para los indicadores ambientales se determinaron: nivel de erosión severa (% parcelas), P disponible (mg.l⁻¹), parcelas en conflicto de uso (%), plaguicidas aplicados (ingrediente activo kg.ha⁻¹) y los indicadores sociales fueron tenencia de la tierra (% productores propietarios), toxicidad de plaguicidas aplicados (nivel toxicidad 5), Índice de desarrollo social (MIDEPLAN 2006), nivel de escolaridad (% productores con educación básica), los cuales representaran diferencias en forma individual para Tierra Blanca y Llano Grande. Se analizaron las tendencias de estos indicadores en relación con valores meta definidos (Müller 1996) para una situación deseable en la cuenca media río Reventado (Cuadro 1) y se aplicó la metodología MESMIS (Mäser *et al.* 1999).

MESMIS es una herramienta que ofrece respuestas endógenas, en donde en forma participativa con los productores se definieron valores meta. Los indicadores encontrados se ponderan en forma individual siendo: 1 bajo, 2 medio y 3 alto. Los valores negativos indican que se disminuye la sostenibilidad y los positivos que se mejora. Se determina en forma aditiva el valor para cada grupo de indicadores económicos, ambientales y sociales y se determina de la misma manera el valor global del grupo de indicadores evaluados. Por último se desarrolla un gráfico de Ameba para una mejor visualización de las interacciones determinadas. Esta metodología considera el factor local como aspecto fundamental del diagnóstico.

Cuadro 1. Indicadores meta propuestos para analizar la sostenibilidad de la actividad agrícola en la cuenca media río Reventado.

Indicadores	Valor meta	Referencia
Indicadores económicos		
Producción papa (t.ha ⁻¹)	24	Producción promedio a nivel nacional (SEPSA 2003)
Relación beneficio/costo	1,61	Promedio para la cuenca (Tencio 1998)
Disponibilidad riego (% parcelas con riego)	70	Taller de discusión
Acceso al crédito (% productores)	50	Taller de discusión
Indicadores ambientales		
Nivel erosión severa (% parcelas)	0	Taller de discusión
P disponible (mg.l ⁻¹)	72	Valores mayores se consideran altos (Soto 1998)
Parcelas en conflicto de uso (% parcelas)	0	Taller de discusión
Plaguicidas aplicado (ia kg.ha ⁻¹)	17	Para un manejo MIP para la cuenca (MAG 1998)
Indicadores sociales		
Tenencia de la tierra (% productores propietarios)	100	Taller de discusión
Índice desarrollo social (IDS)	56,3	MIDEPLAN (2006)
Nivel de toxicidad de plaguicidas (% de uso de plaguicidas toxicidad 5)	100	Taller de discusión
Nivel de escolaridad (% productores con educación básica)	75	Taller de discusión

Análisis de los datos

Para los indicadores de índice estructural, capacidad de uso de la tierra, conflicto de uso, producción y ubicación de las parcelas, se realizó un análisis de regresión simple de cada variable contra las demás y se les aplicó un ANDEVA por medio del programa PROC GLM de SAS (2003). Cada una de las variables nominales se transformó en variables ordinales en orden creciente para llevar a cabo la regresión. Los niveles de confianza utilizados fueron 5 y 10% (Kachingan 1991), en donde se reconoce que fenómenos de variabilidad agrícola en el campo son tan grandes que $p \leq 0,1$ es significativo, $p \leq 0,05$ es altamente significativo y $p \leq 0,01$ se reserva para experimentos en laboratorio. Se elaboró una matriz de correlación múltiple para analizar las relaciones entre las variables: índice estructural, altitud,

MO, erosión y capacidad de uso. Para analizar la correlación de las variables erosión y capacidad de uso se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman (variables ordinales) y para analizar la correlación entre las variables índice estructural, altitud y MO se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (variables cuantitativas).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Indicador 1: Disponibilidad de bases cambiables

En el cuadro 2 se presentan los niveles promedio de las variables utilizadas para determinar el indicador 1. Siguiendo los criterios descritos por (Bertsch 1995) se observó que los suelos son moderadamente fértiles; este criterio coincide con lo expresado por Alvarado et al. (2001) para

Cuadro 2. Niveles promedio de nutrimentos en las parcelas muestreadas en Tierra Blanca y Llano Grande, Cartago. 1995.

Variables	Promedio	Nivel según Bertsch (1995)
Capacidad intercambio cationes extraíbles (CICE (cmol (+).kg ⁻¹))	9,75	Medio
Acidez (pH)	5,60	Medio
Fósforo (P (mg.l ⁻¹))	127,00	Alto
% Saturación de acidez (% SA)	4,26	Bajo
Suma Bases (Ca+K+Mg)	9,41	Medio
Acidez (Al) (100 cmol.ml ⁻¹)	0,42	Bajo

suelos derivados de cenizas volcánicas de Costa Rica. La acumulación de P en función de los años de uso de la tierra se considera como impacto antrópico positivo, causado por la adición de cantidades altas de fertilizante, según describiera Soto (1998).

Los niveles de Ca (cmol(+).kg⁻¹) encontrados fueron en promedio de 4,3 para Tierra Blanca, 5,5 para Llano Grande y 4,9 para la cuenca media. Estos niveles son buenos y permiten concluir que a pesar del efecto residual ácido de los fertilizantes empleados por los agricultores, la práctica de encalado que comúnmente utilizan ha contrarrestado dicho efecto. Los valores de K y Mg disponibles (no incluidos) también se encuentran en niveles de suficiencia, por lo que en conjunto, la fertilidad química de los suelos de la cuenca media del río Reventado, no se ha deteriorado en el tiempo.

En las figuras 1, 2, 3 y 4 se puede observar el comportamiento de los componentes del indicador 1 por separado. Debido a la fuerte capacidad tampón de los Andisoles y a la escala logarítmica del valor de pH, este componente no varía significativamente con el tiempo (Figura 1), ni por acción antrópica, ni por la actividad volcánica de la zona durante el periodo 63-65. Sin embargo, y a pesar de la fuerte capacidad tampón de estos suelos y a que su nivel de acidez es difícil de estimar, el porcentaje de saturación de acidez del suelo disminuye significativamente con los años de uso del terreno (Figura 2). El cambio con el tiempo de la última variable, es inverso al de la sumatoria de bases (Ca+Mg+K) y de la CICE (Ca+Mg+K+Acidez), lo que demuestra la poca incidencia de la acidez del suelo en la fertilidad natural del sistema, la cual se incrementa con el tiempo debido a la adición de cal como enmienda

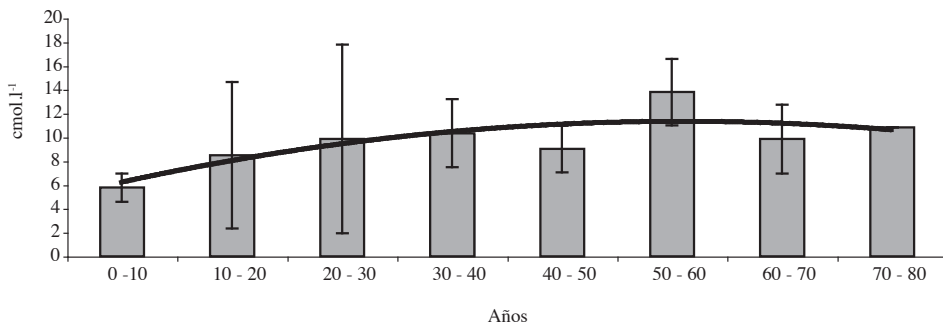


Fig. 1. Variación de la CICE según años de explotación agrícola. Cuenca media río Reventado, Cartago. 1995.

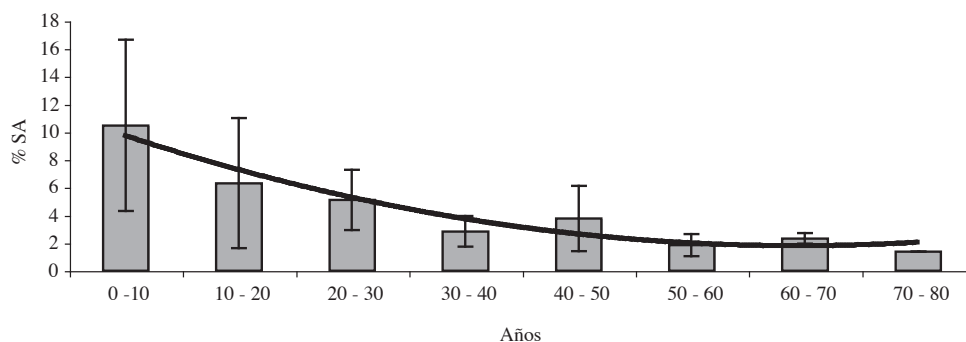


Fig. 2. Variación del porcentaje saturación acidez según años de explotación agrícola. Cuenca media río Reventado, Cartago, 1995.

(Figuras 3 y 4). Los datos indican que estos suelos mantienen una buena fertilidad con el tiempo.

El aumento en la fertilidad de los suelos satisface los criterios de sostenibilidad de Hall et al. (2000) quienes proponen como estrategia para el desarrollo sostenible la conservación de suelos, el incremento de la fertilidad y de mejoramiento de la calidad del suelo mencionada por Etchevers (1999). De la misma manera, la mejora de la fertilidad de los suelos permite satisfacer la demanda por nutrientes de los cultivos en forma satisfactoria, asegurando así un ingreso económico adecuado a las familias de productores de la cuenca.

Indicador 2: Contenido de P disponible

En la figura 5 se observa que existe una tendencia de aumento en el nivel de P según los años de uso agrícola. Los niveles de P se incrementaron en forma cuadrática en aproximadamente $2,3 \text{ mg.l}^{-1}.\text{año}^{-1}$, conforme aumentaron los años de uso del suelo en la agricultura. Con pocos o ningún año de aplicar P como fertilizante, los niveles de disponibilidad del elemento se encuentran entre $22\text{-}45 \text{ mg.l}^{-1}$; al aumentar el número de años de adicionar P su disponibilidad alcanza valores de hasta 138 mg.l^{-1} , y decrece a niveles de 113 mg.l^{-1} en la siguiente década, lo que coincide

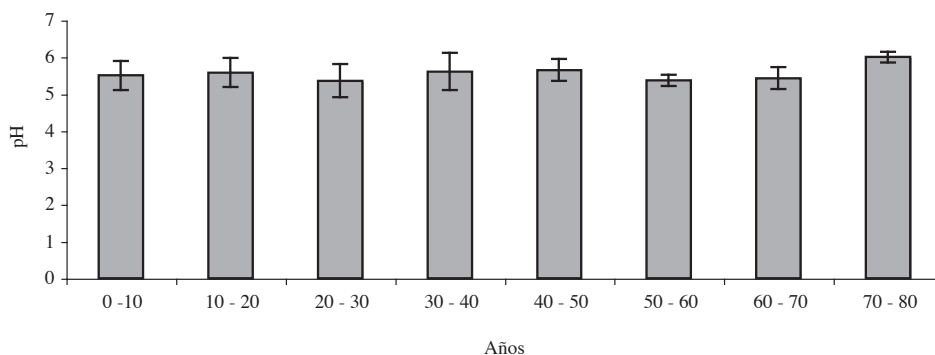


Fig. 3. Variación del pH según años de explotación agrícola. Cuenca media río Reventado, Cartago, 1995.

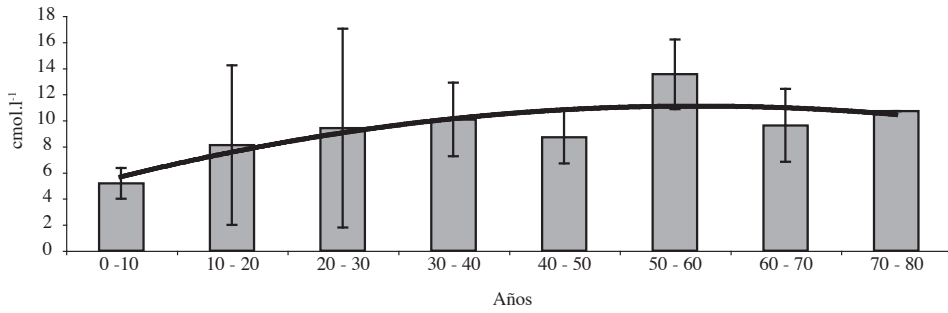


Fig. 4. Variación de la suma de bases según años de explotación agrícola. Cuenca media río Reventado, Cartago. 1995.

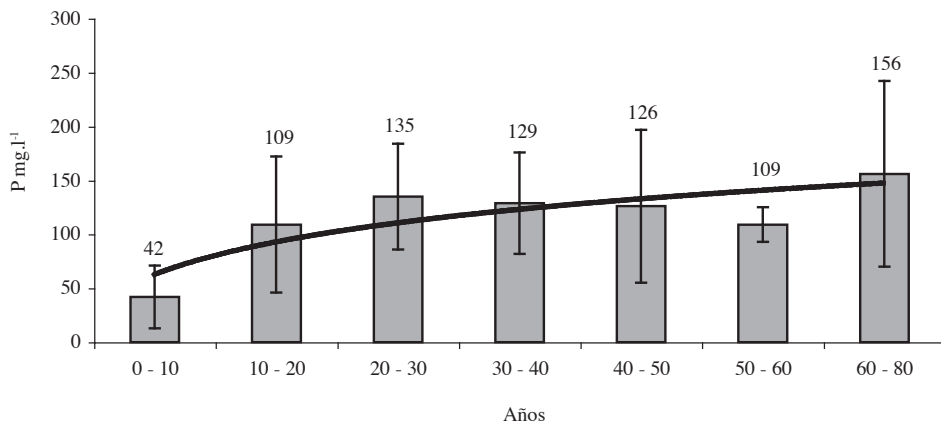


Fig. 5. Niveles de P en función de los años de uso de la tierra en la cuenca media río Reventado, Cartago. 1995.

con un posible efecto de dilución causado por la adición de cenizas volcánicas del Irazú (erupción del 63-65). En la década siguiente, los valores de P disponible se elevan a 185 mg.l⁻¹, lo que coincide con la época de máxima aplicación de fertilizantes en la región, producto de la revolución verde. Otros valores en décadas posteriores, tienden a disminuir, ya que el fertilizante que se utilizaba era poco y la presión de usos de la tierra mucho menor que la de los periodos precedentes (Cuadro 3). Estos datos indican que se pueden disminuir las aplicaciones de P con un impacto positivo en la rentabilidad del sistema productivo y que el P no se está perdiendo por efecto de erosión en estos suelos. En esta región, los valores

Cuadro 3. Niveles de aplicación de P para el cultivo de papa en Costa Rica mencionados en la literatura según Iturriaga (2006).

Año	P ₂ O ₅ kg.ha ⁻¹	Referencia
1950	391	MAI (1950)
1956	383	MA (1956)
1973	461	Bianchini (1973)
1974	498	Pérez (1974)
1977	480	Chaverri y Bornemiza (1977)
1985	500	Castro (1985)
1991	450	MAG (1991)
2006	450	Iturriaga (2006)

más altos se encuentran en terrenos cultivados de papa por más de 35 años (Alvarado et al. 2001), calculándose que el contenido de P disponible en el suelo por el método de Olsen modificado aumentó aproximadamente de 2 a 3 mg.l⁻¹.año⁻¹, cuando se adicionó más de 450 kg.ha⁻¹.año⁻¹ de P₂O₅ en forma consecutiva (Iturriaga 2006).

El caso del P en Andisoles tiene la particularidad de que como el elemento se retiene en el suelo con mucha intensidad (Alvarado et al. 2001), la manera de que su disponibilidad disminuya es por retención en la superficie de intercambio, por erosión de suelo (Kyuma 1990) o por absorción del elemento por el cultivo; esto último es de poca cuantía en plantaciones de papa (Cabalceta et al. 2005, Iturriaga 2006). Así, la acumulación de P con el tiempo de uso de la tierra, refuerza la hipótesis de que en los suelos de la cuenca media del río Reventado el P se acumula a pesar de la erosión que sufren los suelos por actividades agrícolas (Cortés y Oconitrillo 1987). Por su parte, Villegas (1995) y Müller (1997) indican que la mayor cantidad de sedimentos en la parte baja de la cuenca del río Reventado, se atribuye a la extracción de arena como minería a cielo abierto.

Indicador 3: Erosión

Pérdida de suelos: No se encontraron diferencias significativas para la variable pérdida de suelos entre las 2 regiones comparadas. En la figura 6 se observa que los niveles de erosión en el 62% de las parcelas de la cuenca media del río Reventado

son moderados, 28% de las parcelas presentan erosión leve, 1% erosión nula y 9% erosión severa. Los mayores porcentajes de parcelas con erosión severa se encuentran en Tierra Blanca (15%) mientras que en Llano Grande solo ocurre en el 3%. La pérdida de suelos por erosión en la cuenca se atribuye a un conjunto de factores, entre ellos: alta precipitación, poca cobertura, poca rotación de cultivos, mal uso del rotador y mal manejo de la escorrentía en pendientes fuertes, lo que aumenta la susceptibilidad del sistema a la erosión del suelo y disminuye su productividad. El suelo pulverizado con la primera lluvia forma una capa que disminuye la infiltración y aumenta la escorrentía, arrastrando el suelo. Los datos del presente estudio no concuerdan con los valores de erosión elevada mencionados por Cortés y Oconitrillo (1987).

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE 2005) informó que la tasa de sedimentación en la subcuenca Reventado fue de 23 t.ha⁻¹.año⁻¹. Los niveles más altos de erosión en la cuenca ocurren al inicio de las lluvias, lo que coincide con la época en que los suelos se encuentran desnudos porque han sido preparados para la siembra de cultivos (Sánchez 1993). Este problema puede reducirse aumentando la cobertura del suelo, reduciendo la mecanización y calendarizando otras operaciones de campo para que no coincidan con los picos de erosión. La erosión causada por la construcción de caminos, la tala de bosque (Lomelí 2004), la minería a cielo abierto (Villegas 1995, Müller 1997) y la natural (geológica), deberán incorporarse a los

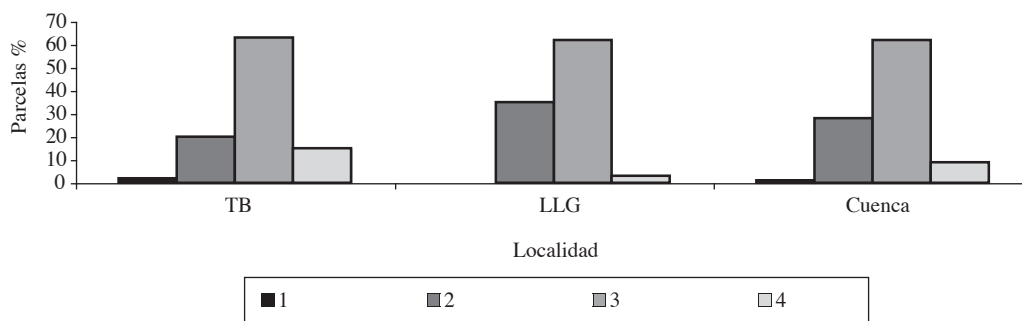


Fig. 6. Niveles de erosión según metodología FAO para el área de estudio.

modelos de simulación, tal cual proponen Lobb y Gary (1999).

No se encontraron diferencias significativas entre regiones para las variables erosión, profundidad horizonte A, contenido de MO y P disponible; sí se encontraron tendencias cuando las variables se agruparon según el grado de erosión sufrida (Cuadro 4).

Como no se observaron diferencias estadísticas para las variables del indicador entre las regiones de la cuenca media, la siguiente discusión se hace para el conjunto de regiones como un todo:

Profundidad del horizonte A: en todos los sitios comparados osciló entre 16 y 86 cm, valores elevados y normales para Andisoles de Costa Rica (Alvarado et al. 2001). Los valores de profundidad del horizonte A fueron mínimos (16 cm) en sitios de erosión severa y máximos (86 cm) en los de erosión moderada. En promedio, el grosor del horizonte A disminuyó de 47 a 43 y hasta 28 cm al pasar de erosión leve, a moderada y a severa;

la pérdida de suelo entre los 2 primeros grados de erosión fue mínima (4 cm), mientras que entre los grados de erosión moderada a severa fue de una magnitud considerable (15 cm), todo de acuerdo con los criterios de erosión permisible en el sistema de clasificación de erosión de la FAO (1994).

Contenido de P disponible: estimado por el método de Olsen modificado, osciló entre 4 y 530 mg.l⁻¹. En promedio, los valores de P disponible fueron menores en sitios de erosión severa (55 mg.l⁻¹), aumentaron en sitios de erosión moderada (123 mg.l⁻¹) y lo hicieron aún más en sitios de erosión leve (162 mg.l⁻¹). Debido a que el P en Andisoles se retiene fuertemente (Alvarado et al. 2001), se consideró que el contenido de P disponible fue un buen indicador de pérdida de suelo y de su fertilidad natural, tal y como se mencionó para el indicador 2. La acumulación de P en Andisoles estudiada por Soto (1998), indica que se puede acumular 2,5 mg.l⁻¹.año⁻¹, siempre y cuando la adición del elemento como fertilizante sea mayor a 450 kg.ha⁻¹.año⁻¹ (Iturriaga 2006). Aplicando

Cuadro 4. Niveles de erosión, profundidad horizonte A (cm), P disponible (mg.l⁻¹) y MO suelo (%) en las muestras de la cuenca media río Reventado, Tierra Blanca y Llano Grande, Cartago. 1995.

Observaciones Cuenca media río Reventado N.º (%)	Grado erosión	Profundidad A (cm)			P disponible (mg.l ⁻¹)			MO suelo (%)		
		Mín	Máx	Prom	Mín	Máx	Prom	Mín	Máx	Prom
1(1)	Nula	41	41	41	53	53	53	3,8	3,8	3,8
34(28)	Leve	20	75	47	10	370	162	1,7	4,3	3,0
76(62)	Moderada	18	86	43	4	530	123	0,8	6,2	3,0
11(9)	Severa	16	47	28	6	160	55	1,2	4,9	3,0
Tierra Blanca										
12(20)	Leve	37	72	55	11	350	151	1,7	4,1	3,0
37(63)	Moderada	18	86	52	4	220	88	0,8	6,2	3,4
9(15)	Severa	16	47	27	6	160	60	1,1	4,5	2,4
Llano Grande										
22(35)	Leve	20	75	43	10	370	168	2,5	4,3	3,3
39(62)	Moderada	20	62	35	12	530	157	1,3	5,3	3,0
2(3)	Severa	28	40	34	12	97	55	2,9	4,9	3,9

estos criterios a la información obtenida en esta investigación se podría asumir que en los suelos de erosión leve, el suelo ha permanecido en su sitio por periodos de 65 años, mientras que con erosión moderada 49 años y en los casos de erosión severa 22 años. Si se asume que la ceniza que se depositó en las erupciones de los años 1963-1965 se erosionó, los valores anteriormente calculados corresponden adecuadamente al modelo de pérdida de suelos de esta región. Sin embargo, la correlación entre los años de uso de la tierra y los contenidos de P disponible en el presente estudio no fue significativa, debido principalmente a que los datos de uso de la tierra son muy subjetivos.

Contenido de MOS: varió entre 0,8 y 6,2%, valores normales para la región del volcán Irazú (Alvarado y Buol 1975, 1985, Bornemiza et al. 1979), aunque bajos para los Andisoles de Costa Rica (Alvarado et al. 2001) y comunes para áreas tropicales en las que la mayoría de los suelos tienen bajos contenidos de MOS (INFOPOS 1997). El contenido de MOS tendió a ser mayor en las parcelas que presentaron erosión nula (3,8%) con respecto a aquellas de erosión leve, moderada y severa (las cuales tuvieron en promedio valores de 3%, para una pérdida de 0,8% con relación a la erosión leve). La variación del contenido de MOS en Andisoles, no solo depende de su pérdida por erosión, sino también de otras variables como el manejo del terreno (por ejemplo, adición o no de residuos) y la elevación del sitio sobre el nivel del mar, por lo que esta variable no es la mejor para predecir pérdida de suelo. En Llano Grande, esta variable fue mayor en 0,9% en el sitio con erosión severa con relación al sitio con erosión moderada, a pesar de que en esta región hay menos erosión severa.

Indicador 4: Índice estructural (IE)

En el análisis del IE de las parcelas muestreadas se encontró que 19% de los suelos están degradados, 33% son suelos altamente susceptibles a la degradación, 25% de los suelos son ligeramente susceptibles a la degradación física y 23% de los suelos son estructuralmente estables

(Figura 7). Müller (1997) y Núñez et al. (1998) encontraron una correlación significativa entre el IE y la erosión, en donde a mayor estabilidad (potreros) hubo un menor grado de erosión del suelo comparado con las fincas de uso agrícola. Estos datos concuerdan con lo mencionado por Carter (1996) en el sentido de que la estructura del suelo puede influir en el almacenamiento de la MO. Jiménez et al. (1998) demostraron que con aplicaciones de abono orgánico se aumentan temporalmente los contenidos de MOS, por lo que el efecto sobre la estabilidad de los suelos es poco importante. Por el contrario, Hopgood (1999) encontró para la cuenca que la MOS asociada a la incorporación de residuos dentro del suelo de la vegetación natural, de ciprés, roble y pastura en el horizonte A, aumentó la estabilidad de los agregados en forma diferenciada.

Debido a la presencia de altos contenidos de compuestos organominerales estables, especialmente en el horizonte superficial, estos suelos resultan muy bien estructurados (Bertsch 1995). Pero la utilización de maquinaria agrícola inadecuada provoca la destrucción de la estructura en la capa laborada y disminuye la calidad física del suelo (Spaan 2007). Estos cambios en la estructura influyen en el sellado del suelo, compactación, drenaje, escorrentía y erosión hídrica (Pla 1995). Las consecuencias de estos factores se hacen evidentes en el incremento de costos de producción,

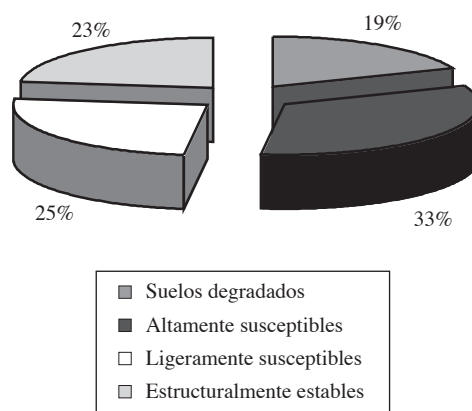


Fig. 7. Susceptibilidad a la degradación física de los suelos en la cuenca media del río Reventado. 1995.

reducción de rendimientos, baja competitividad de agricultura y reducción del valor comercial del suelo.

Indicador 5: Capacidad de uso de las tierras

El uso de la tierra en la cuenca media río Reventado para el año 1998 fue de 66,5% de hortalizas, 0,2% de flores; 22,9% de potrero; 5,3% en barbecho; 0,6% de árboles y 3,9% de bosque. Se determinó que 10,5% de la tierra correspondió a la Clase II, 38,1% Clase III, 21,9% Clase IV, 1,8% Clase V, 8,9% Clase VI, 17,8% Clase VII y 1,0% Clase VIII. Se encontró que 60% de las fincas muestreadas se encontraban en Clase III y Clase IV, es decir tenían capacidad para uso agrícola y las principales limitantes de estos terrenos eran la pendiente y la erosión sufrida; datos similares encontraron Gómez y Arroyo (1999). En cuanto al conflicto de uso de la tierra 25% estaba en uso conforme, 39% ligeramente sobreutilizada y 36% del área estaba severamente sobreutilizada.

Al relacionar las variables capacidad de uso con el índice estructural (Cuadro 5) y con la erosión, se observaron diferencias a $p=0,1$ entre ellas. Conforme aumentó la categoría de capacidad de uso y las limitaciones para la siembra de cultivos, aumentó la susceptibilidad a la degradación física de los suelos. Para el área de estudio se encontró una tendencia de que para las Clase II y III, los suelos eran moderadamente susceptibles a ser degradados y que conforme se pasaba a las clases de capacidad de uso IV a VI y VII los suelos presentaban alta susceptibilidad de ser degradados (Cuadro 6). La variación de los datos es alta, debido en parte a la variación del tamaño de las muestras por categoría, ya que el criterio para definir el número de muestras de esta investigación se hizo por ubicación de las parcelas y no por las categorías de capacidad de uso. No obstante, este es un estudio exploratorio que indica una tendencia, y da paso para estudios posteriores.

Cuadro 5. Efecto del índice estructural sobre la capacidad de uso de la tierra en las muestras de la cuenca media río Reventado, Cartago. 1998.

Fuente	DF	Suma cuadrados	Promedio cuadrados	Valor F	Pr>F
Modelo	3	44,9207139	14,9735713	2,58	0,06
Error	1118	684,4048467	5,8000411		

Significativo $p=0,1$.

Cuadro 6. Media \pm error estándar del IE correspondiente a cada nivel de capacidad de uso de la tierra para las parcelas de la cuenca media del río Reventado, Cartago. 1998.

Clase de Capacidad Uso	Observaciones	Índice Estructural	
		Promedio \pm error estándar	Desviación estandar
II	12	7,0 \pm 0,69	1,10
III	60	7,12 \pm 0,31	2,49
IV	23	6,20 \pm 0,50	1,62
VI-VII	27	5,82 \pm 0,46	3,08

Significativo $p=0,1$.

Cuadro 7. Coeficientes de correlación entre las variables índice estructural, altitud, MOS, erosión y capacidad de uso de la tierra, para las muestras de la cuenca media del río Reventado, Cartago. 1998.

Variabes ¹	IE	Altitud	MOS	Erosión	Cap. Uso
IE	1,0000	0,0613 0,5021	0,9306** <0,0001	-0,1592* 0,0798	-0,2423** 0,0072
Altitud		1,0000	-0,1002 0,2719	0,0807 0,3766	0,1323 0,1463
MOS			1,0000	-0,1396* 0,1250	-0,2475** 0,0060
Erosión	-0,1879** 0,0382	0,1079 0,2368	-0,1386* 0,1277	1,0000	0,5783** < 0,001
Cap. Uso	-0,2632** 0,0034	0,0853 0,3499	-0,2282** 0,0115		1,0000

1 Las correlaciones de las 3 primeras filas se hicieron con el coeficiente de Pearson, mientras que las de las 2 últimas filas se calcularon con el Índice de Spierman

* Significativo $p < 10\%$; ** Altamente significativo $p < 5\%$.

En el cuadro 7 se observa una correlación altamente significativa entre el IE y la MOS, seguida de la relación capacidad de uso con erosión. Los datos de índice estructural y erosión de los suelos coinciden con los encontrados por Núñez et al. (1998) en la misma región. Para evitar que se rompa la estructura del suelo y se den procesos de compactación del suelo, MAG-FAO (1994) recomienda el uso del arado de cincel a una profundidad de 35-40 cm en época seca y para la segunda siembra del año, su uso debe ser en forma superficial. Por su parte, Karlen (1997)

y Hall et al. (2000), recomiendan aumentar la cobertura vegetal para disminuir la escorrentía y mejorar la estructura del suelo.

Indicador 6: Rendimiento de los cultivos

En la figura 8 se muestra que la producción promedio para la primera siembra del año fue mayor en ambos cultivos (cebolla y papa) que los correspondientes a la segunda siembra del año. La disminución en producción entre ciclos probablemente se asocia a que durante el segundo

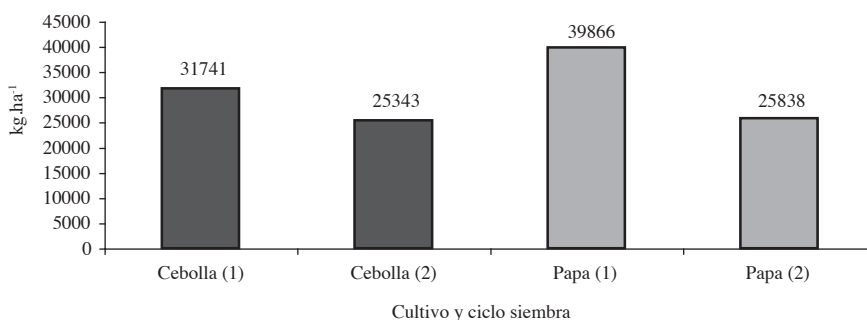


Fig. 8. Producción promedio (kg.ha⁻¹) con base al ciclo de siembra (1 y 2) y al cultivo de cebolla y papa en la cuenca media río Reventado, Cartago. 1995.

ciclo disminuye la radiación solar y por ende la fotosíntesis y a que las condiciones adversas de clima causan una mayor presión de plagas y enfermedades (Hilje 1994).

En el cuadro 8 se observa que no se encontraron diferencias a $p < 5\%$ entre la producción de cebolla ($p=0,1169$) y la de papa ($p=0,8668$) y la capacidad de uso de la tierra. Sin embargo, se observó una tendencia de que al aumentar la clase de capacidad de uso disminuyó la producción de ambos cultivos. No obstante (Cuadro 9), para el cultivo de cebolla, se observaron diferencias significativas ($p < 10\%$) entre los promedios de producción y la ubicación de las parcelas, tanto en Llano Grande ($p=0,1471$) como en Tierra Blanca ($p=0,0931$) en donde los promedios de producción mayores coinciden con las localidades que tienen acceso al riego. En el cuadro 9 se observó una relación diferente con respecto al cultivo de papa, en donde no se presentaron diferencias significativas entre la producción de papa y la ubicación de las parcelas tanto en Llano Grande ($p=0,1839$) como en Tierra Blanca ($p=0,4805$).

En el cuadro 10 se observó una tendencia en los sistemas que tenían 2 ciclos de cultivo al año, donde conforme aumentó el nivel de erosión, la producción disminuyó en la mayoría de los sistemas de producción encontrados, salvo en la rotación anual cebolla-cebolla y papa-papa. Para

los últimos sistemas, con el nivel de erosión severa se contó con solo 1 muestra, lo que relativiza estos datos debido al tamaño de la muestra; aún así, los altos valores de producción se pueden explicar por el manejo intensivo del sistema por el productor.

No se encontró diferencias significativas en la producción de cebolla en parcelas con y sin conflicto de uso de la tierra, siendo los promedios de $38,87 \text{ t.ha}^{-1} \pm 1,29$ para parcelas sin conflicto de uso y de $36,97 \text{ t.ha}^{-1} \pm 2,18$ para parcelas con conflicto de uso (Cuadro 11). En el caso del cultivo de papa tampoco se encontraron diferencias significativas siendo los promedios para parcelas sin conflicto de $33,8 \text{ t.ha}^{-1} \pm 1,8$ y con conflicto de $32,2 \text{ t.ha}^{-1} \pm 2,8$. Se observó para ambos cultivos que los promedios de producción fueron mayores en las parcelas que no presentaban conflicto de uso de la tierra.

Los rendimientos promedio en el área de investigación fueron similares a los promedios nacionales o lo excedieron en el caso de la papa (SEPSA 2003), además estas diferencias de producción tenían que ver con el manejo del sistema de producción y con la disponibilidad de riego. Müller (1997) menciona que la degradación de un suelo se puede ver afectada por el manejo de este y a su vez tener impactos negativos sobre la productividad, afectando la dimensión económica para la sostenibilidad del sistema.

Cuadro 8. Producción estimada (Media \pm error estándar) de papa y cebolla en relación con la clase de capacidad de uso de la tierra en la cuenca media río Reventado, Cartago. 1998.

Clase Capacidad Uso	Producción de cebolla		Producción de papa	
	N	Media \pm error estándar	N	Media \pm error estándar
II	11	38,23 \pm 3,36	9	31,62 \pm 4,34
III	52	39,69 \pm 1,54	38	33,79 \pm 2,11
IV	22	36,06 \pm 2,37	22	34,10 \pm 2,78
VI	18	39,59 \pm 2,63	4	28,99 \pm 6,51
VII	2	19,59 \pm 7,88		
Probabilidad		$p=0,1169$		$p=0,8668$

Altamente significativo = $p < 0,05^{**}$

Significativo = $p < 0,1^{*}$

Cuadro 9. Producción estimada (Media \pm error estándar) de cebolla y papa en relación con la ubicación de las parcelas en la cuenca media río Reventado, Cartago. 1998.

Llano Grande			Tierra Blanca		
Cebolla					
Ubicación	N	Media \pm error estándar	Ubicación	N	Media \pm error estándar
Retes	7	31,73 \pm 4,77	Sanatorio	10	34,79 \pm 2,89
El Rodeo	5	40,71 \pm 5,64	Los Sitios	5	39,02 \pm 4,09
Cuatro Vientos	9	44,83 \pm 4,20	El Alto	3	32,94 \pm 5,28
B. Trinidad	4	27,94 \pm 6,31	La Laguna	12	40,0 \pm 2,64
Varillal	24	36,79 \pm 2,57	El Bajo	7	45,63 \pm 3,46
			La Ortiga	9	44,55 \pm 3,05
			Misión Norte	10	35,99 \pm 2,89
p=0,1471*			p=0,0931*		
Papa					
Ubicación	N	Media \pm error estándar	Ubicación	N	Media \pm error estándar
Retes	8	34,05 \pm 4,55	Sanatorio	8	31,25 \pm 4,13
El Rodeo	6	29,17 \pm 5,26	Los Sitios	4	23,69 \pm 5,85
Cuatro Vientos	7	34,25 \pm 4,87	El Alto	3	40,13 \pm 6,75
B. Trinidad	6	47,26 \pm 5,25	La Laguna	7	32,97 \pm 4,42
Varillal	13	35,93 \pm 3,57	El Bajo	4	23,40 \pm 5,85
			La Ortiga	4	32,17 \pm 5,85
			Misión Norte	3	26,26 \pm 6,75
p=0,1839			p=0,4805		

Altamente significativo= $p < 0,05^{**}$ Significativo= $p < 0,1^{*}$ **Indicador 7: Relación beneficio/costo (B/C)**

En el cuadro 12 se presentan los valores máximo, mínimo y promedio de la relación B/C para las fincas ubicadas en Llano Grande y en Tierra Blanca. En ambas localidades los valores promedio de la relación B/C fueron muy similares para las parcelas sin conflicto de uso que para las parcelas con conflicto de uso. Sin embargo, en Tierra Blanca la relación B/C fue mayor (2,55) que la encontrada en Llano Grande (2,05), debido a que en Tierra Blanca habían más productores organizados y agroindustrias, lo que hizo que se redujeran los costos de intermediación.

Los valores de la relación B/C más altos (Cuadro 13) se relacionaron con productores medianos a grandes que sembraban más de una parcela, que tenían acceso al riego y una mayor eficiencia en el manejo del sistema de producción; en algunos casos, estos productores tenían su propia empresa familiar para comercializar sus productos. En las localidades de Retes, Trinidad y Cuatro Vientos en Llano Grande y en La Laguna, El Bajo y La Ortiga de Tierra Blanca, los productores de las últimas localidades también sembraban en Llano Grande, de allí los mayores valores B/C en esas localidades. Estos valores coinciden parcialmente con los encontrados por Tencio

Cuadro 10. Relación entre los rendimientos en los sistemas de producción y los niveles de erosión. Cuenca media río Reventado, 1998.

Erosión	Cebolla	Papa	Cebolla-Papa	Papa-Cebolla	Cebolla-Cebolla	Papa-Papa
	(% parcelas) Producción t.ha ⁻¹					
Nula	(0,8) 43,7					
Leve	(5,8) 38,99	(5,8) 38,91	(5,8) 41,0-28,13	(3,3) 51,64-38,31	(5,8) 48,43-34,69	
Moderada	(14,8) 41,21	(14,1) 39,54	(20,7) 39,94-25,33	(3,3) 37,93-34,82	(4,1) 34,13-24,51	(1,7) 34,5-19,7
severa	(7,4) 33,92	(1,7) 34,7	(3,3) 37,83-21,7		(0,8) 37,9-33,8	(0,8) 49,4-33,8

Cuadro 11. Producción estimada (Media ± error estándar) de papa y cebolla en las parcelas en relación con el conflicto de uso de la tierra en la cuenca media del río Reventado, Cartago, 1998.

Conflicto de uso	Producción de cebolla (t.ha ⁻¹)		Producción de papa (t.ha ⁻¹)	
	N	Media ± error estándar	N	Media ± error estándar
Con	27	36,97±2,18	21	32,2±2,8
Sin	78	38,87±1,29	52	33,8±1,8
Probabilidad	F=0,4562		F=0,6269	

p≤0,1

Cuadro 12. Efecto de la relación beneficio/costo en función del conflicto de uso de la tierra en Tierra Blanca y Llano Grande, Cartago, 1998.

Conflicto Uso	Llano Grande				Tierra Blanca			
	N (%)	Min	Max	Prom	N (%)	Min	Max	Prom
Sin	18 (25)	0,69	3,93	2,04	18 (23)	0,1	7,69	2,95
Con	54 (75)	0,04	4,79	2,05	62 (77)	0,27	10,52	2,53

(1998), quien determinó una relación B/C de 1,61 para fincas de papa manejadas bajo un sistema convencional y una relación B/C de 3,1 para un sistema de manejo integrado del cultivo (MIC). En el mediano y largo plazo, en las parcelas con conflicto de uso, se podría presentar una merma de sostenibilidad ambiental, a costa de una sostenibilidad económica. Los empresarios saben que

un manejo racional del medio ambiente puede reducir los costos y ampliar los mercados y la competitividad (Estrada y Quintero 2004).

En la figura 9 se muestra como el área de la finca no es determinante para la variación en la relación B/C y la rentabilidad del sistema de producción. Además, la mecanización es una práctica utilizada por todos los agricultores al

Cuadro 13. Relación beneficio/costo por ubicación de las parcelas para Llano Grande y Tierra Blanca, Cartago. 1998.

Llano Grande		Tierra Blanca	
Ubicación	Relación B/C ¹	Ubicación	Relación B/C ¹
Retes	1,96	Sanatorio	2,24
El Rodeo	1,76	Los Sitios	1,99
Cuatro Vientos	2,76	El Alto	1,70
Trinidad	1,96	La Laguna	3,35
Varillal	1,90	El Bajo	2,71
		La Ortiga	3,30
		Misión Norte	2,57
Promedio	2,07	Promedio	2,55

¹ Los valores en negrita indican que agricultores de las localidades de Tierra Blanca siembran en las localidades de Llano Grande.

momento de preparar los terrenos para la siembra y por tanto no es una variable que puede ser considerada como variable diagnóstico.

Interacción de indicadores

En la figura 10 se presenta un análisis de indicadores para el cultivo de la papa en la cuenca media del río Reventado. Desde el punto

de vista económico, la sumatoria de los valores de los indicadores arrojó un valor ponderado de (+3) para Tierra Blanca y (+2) para Llano Grande, es decir, los valores actuales son mejores que los valores meta considerados para la comparación. Para ambas regiones el indicador fue positivo, hay un nivel económico aceptable.

En relación con el indicador ambiental ponderado, la situación fue muy diferente, para

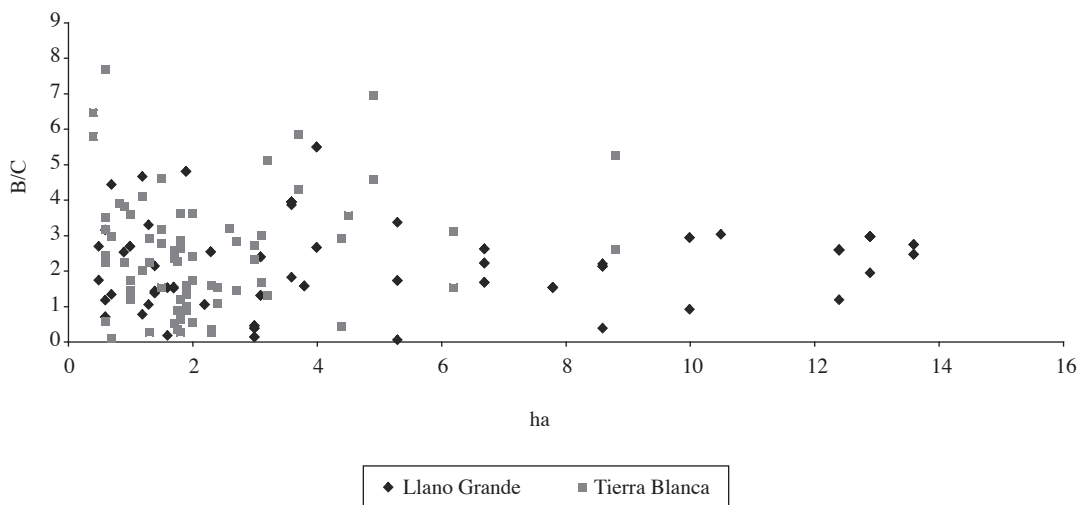


Fig. 9. Relación área de la finca vs rentabilidad en la zona de Tierra Blanca y Llano Grande.

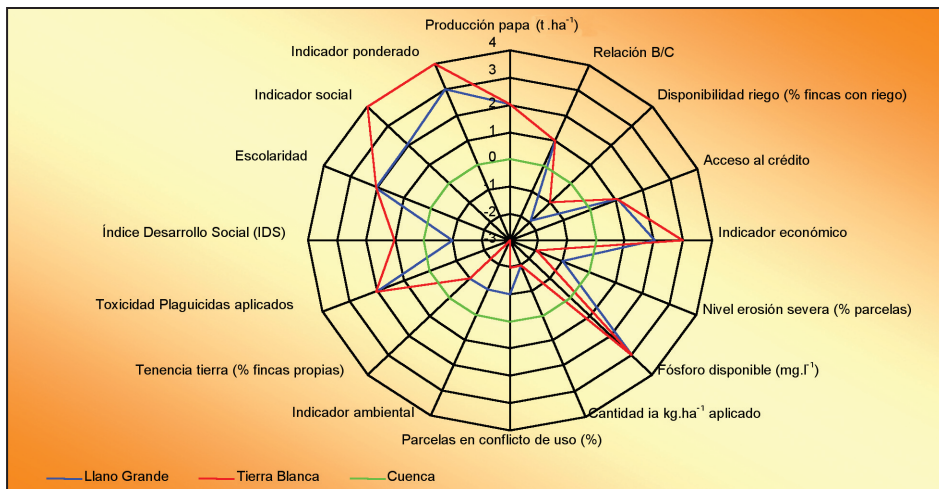


Fig. 10. Interacción de indicadores para el cultivo de la papa en las zonas de Tierra Blanca y Llano Grande. Cartago. 1998.

Llano Grande se encontró un valor de (-1) en donde las parcelas presentaban menores niveles de erosión severa, mayor contenido de P disponible y menor porcentaje de parcelas en conflicto de uso de la tierra, valores más cercanos a los valores meta definidos. Para el caso de Tierra Blanca el valor ponderado fue de (-3), en donde con excepción del indicador disponibilidad de P cuyo valor fue mayor al valor meta, los restantes indicadores están por debajo del valor meta. Los indicadores muestran que hay problemas ambientales en ambas regiones pero con mayor severidad en Tierra Blanca.

Con respecto a los indicadores sociales el valor ponderado fue de (+4) para Tierra Blanca y (+2) para Llano Grande, estas diferencias se asocian con el Índice de desarrollo social que para Tierra Blanca fue de 70,5, valor aceptable con relación al IDS nacional (56,3) y mayor que el de Llano Grande (45,4) (MIDEPLAN 2006). El indicador ponderado para Tierra Blanca (+4) fue levemente mayor que el de Llano Grande (+3), no obstante, se infiere que hay que trabajar más a nivel local para mejorar los indicadores ambientales en mayor medida en Tierra Blanca. Desde un enfoque de sostenibilidad, se puede seguir produciendo hortalizas en esta región y la

actividad agrícola se mantiene como una actividad rentable para los productores. Marchamalo (2004) por su parte determinó que la actividad agrícola sigue siendo la actividad más sostenible para la cuenca del río Reventazón.

Se han desarrollado otros modelos para estimar indicadores como el mencionado por Martínez (2006), quien desarrolló un modelo de indicadores de calidad de las tierras para el cultivo de la papa contemplando como indicadores la erosión, la disponibilidad de agua, las condiciones de enraizamiento, condiciones para mecanización y drenaje y que confirman lo encontrado en el presente trabajo.

Actualmente los productores hortícolas entran a los mercados de Estado Unidos por medio de la iniciativa de la Cuenca del Caribe (ICC), pero cambios en los mercados, en los precios internacionales, en las políticas (TLC), así como de externalidades como fenómenos naturales, podrían afectar la sostenibilidad actual de las actividades productivas y de la cuenca; entre más resiliente sea el sistema, mayor probabilidad de ajustarse en busca de sostenibilidad. De Souza. 2005 menciona que se debe aprender inventando desde lo local, para que los pueblos no perezcan imitando desde lo global.

El desarrollo sostenible debe ser interpretado contextualmente y manejado localmente por cada generación a partir de su historia local, en el marco de sus desafíos presentes y aspiraciones futuras. La sostenibilidad es un proceso dinámico y flexible, el uso de la tierra de acuerdo a su capacidad de uso, el manejo y conservación de suelos y aguas ayudan a alcanzar parte de la sostenibilidad ambiental, es importante también la capacidad de organización y gestión de las comunidades para alcanzar objetivos comunes de desarrollo sostenible.

CONCLUSIONES

Se ha dado una acumulación de bases (Ca, Mg y K) en los terrenos y una disminución del porcentaje de saturación de acidez. Es decir, los suelos han mejorado su fertilidad con el tiempo por efecto antrópico.

Disponible se acumulaba con los años de uso agrícola del terreno. Esto permite concluir que no hay grandes pérdidas por erosión en las fincas bajo estudio, así como que eventualmente podría reducirse la aplicación de este elemento como fertilizante, lo que haría más sostenible el sistema de producción.

Hubo diferencias significativas ($p < 10\%$) para el índice estructural entre la capacidad de uso de las tierras. Se encontró que para las Clases II y III, los suelos eran moderadamente susceptibles a ser degradados, y conforme se pasaba a las clases superiores, los suelos presentaban alta susceptibilidad de ser degradados.

No se encontraron diferencias significativas entre las clases de capacidad de uso de la tierra para la producción por clase para cada cultivo. Tampoco hubo diferencias entre niveles de producción y las áreas en conflicto de uso de la tierra.

Se encontró que los rendimientos de la primera cosecha de papa y cebolla del año fueron mayores que los correspondientes a la segunda siembra del año; este efecto se relaciona con menor incidencia de plagas durante la época seca.

Los datos indican que la productividad de papa fue mayor en Llano Grande que en Tierra

Blanca, mientras que en el caso de la cebolla ocurre lo contrario, lo que indica un grado de especialización de los productores.

Se presentó una tendencia en el sentido de que la producción de papa y cebolla fue mayor en fincas de productores que siembran más de una parcela (mayor experiencia).

Los mayores valores de la relación B/C se encontraron en Tierra Blanca. Los datos del presente trabajo permiten correlacionar esta variable más con el manejo del sistema productivo que con las condiciones ambientales de la zona. Además podría relacionarse con un mejor nivel organizacional de los productores y la posibilidad de dar valor agregado a los productos (agroindustria) en esta zona.

El indicador ponderado de sostenibilidad para Tierra Blanca (+4) fue levemente mayor que el de Llano Grande (+3), no obstante, hay que trabajar más a nivel local para mejorar los indicadores ambientales, que presentaron una tendencia negativa y en mayor medida para Tierra Blanca. La actividad agrícola se mantiene como una actividad rentable para los productores. Un elemento que ha influido en este desarrollo es el apoyo estatal que han recibido estas comunidades.

RECOMENDACIONES

Mejorar la tecnología apropiada para agricultura de ladera que permita reducir las limitantes ambientales, sociales y económicas comparadas en el presente trabajo.

Se pueden desarrollar prácticas de manejo y conservación de suelos para mejorar su calidad, entre ellas: incorporar MO, evitar el excesivo laboreo, un manejo racional de los fertilizantes y plaguicidas, aumento de la cobertura vegetal y planificar la preparación del suelo y siembra, para que no coincida con épocas de alta precipitación y suelo descubierto.

La transferencia de tecnología en la región debe orientarse a un manejo integral del cultivo, en busca de mejorar la resiliencia del sistema productivo para su sostenibilidad. Se recomienda transferir la tecnología desarrollada por estos productores a otras zonas hortícolas del país.

Se recomienda desarrollar investigación de más largo plazo para medir la erosión de los suelos de uso agrícola, considerando el aporte de las otras actividades que generan erosión en la cuenca tales como: minería a cielo abierto y erosión o deposición de cenizas volcánicas en forma natural.

La agricultura en el área de investigación es muy productiva y rentable, por eso es poco el incentivo para los productores de introducir nuevas técnicas de protección de suelos que probablemente sean laboriosas y costosas y requieran cambios en las prácticas del productor. Se recomienda, desarrollar incentivos que favorezcan el manejo y la conservación de los suelos y de los recursos naturales.

Actualmente las actividades productivas de la cuenca dependen en gran medida de 2 cultivos: papa y cebolla. Por ello se recomienda investigar otros mercados y alternativas de producción, así como otras actividades productivas que se complementen con el manejo de los recursos naturales, como el ecoturismo. Todo esto en el marco de los tratados de libre comercio.

AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto IICA-GTZ sobre Agricultura Sostenible y Recursos Naturales por el financiamiento de esta investigación, en especial al M.Sc. Carlos Reiche por sus valiosas recomendaciones. A los productores de la cuenca media del río Reventado por contribuir en el desarrollo de esta investigación. A Fabio Blanco y Leonardo Cordero por su apoyo en los análisis estadísticos de esta investigación.

LITERATURA CITADA

- ACTON D., GREGORICH L. 1995. Understanding soil health. In: The health of our soils: toward sustainable agriculture in Canada. Centre for Land and Biological Resources Research. Ottawa, Ca. 135 p.
- ADRIAANSE A. 1993. Environmental policy performance indicators: a study of the development of indicators for environmental policy in the Netherlands. The Hague: Sdu Publishers. Amsterdam, Ho. 175 p.
- ALVARADO A. 1995. Uso de la consulta de expertos en la estimación del desarrollo sostenible en los países centroamericanos y las regiones de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 19(2):31-38.
- ALVARADO A., BUOL S. 1975. Toposequence relationships of Dystrandepts in Costa Rica. *Soil Science Society of America Proceedings* 39(5):932-937.
- ALVARADO A., BUOL S. 1985. Field estimation of phosphate retention by Andepts. *Soil Science Society of America Proceedings* 49:911-914.
- ALVARADO A., BERTSCH F., BORNEMIZA E., CABALCETA G., FORSYTHE W., HENRÍQUEZ C., MATA R., MOLINA E., SALAS R. 2001. Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica. ACCS. San José, CR. 111 p.
- ALVARADO G., VEGA E., CHAVES J., VÁSQUEZ M. 2004. Los grandes deslizamientos (volcánicos y no volcánicos) de tipo *debris avalanche* en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central* 30:83-99.
- ARAYA P., DIAZ R., FERNÁNDEZ L. 1995. El desarrollo sostenible: un desafío a la política económica agroalimentaria. San José, CR. 248 p.
- BALDARES M., GUTIÉRREZ E., ALVARADO A., BRENES L. 1993. Desarrollo de un sistema de información sobre indicadores de sostenibilidad para los sectores agrícola y de recursos naturales de los países de América Latina y el Caribe. In: Ciencias Económicas. Universidad de Costa Rica y Proyecto IICA/GTZ. San José, CR. 117 p.
- BEETS W.C. 1990. Raising and sustaining productivity of smallholder farming systems in the tropics: a handbook of sustainable agricultural development. AgBé Publishing. Alkmaar, Ho. 738 p.
- BERTSCH F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. ACCS. San José, CR. 157 p.
- BIANCHINI R. 1973. Ensayos de fertilización química en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.) en Costa Rica. Tesis de licenciatura. Ing. Agr. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 61 p.
- BORNEMIZA E., CONSTENLA M., ALVARADO A., ORTEGA E., VÁSQUEZ A. 1979. Organic carbon determination by the Walkley-Black and dry combustion methods in surface soils and Andept profiles from Costa Rica. *Soil Science Society of America Proceedings* 43(1):78-83.
- CABALCETA G., SALDIAS M., ALVARADO A. 2005. Absorción de nutrientes en el cultivar de papa MNF-80. *Agronomía Costarricense* 29(3):107-123.

- CARTER M.R. 1996. Analysis of soil organic matter storage in agroecosystems. In: *Advances in Soil Science. Structure and organic matter storage in agricultural soils*. M Carter and B Stewart. (eds) USA. 416 p.
- CASTRO A. 1985. Fertilización fosfórica de la papa en cinco suelos de la zona norte de Cartago. Tesis de licenciatura. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 53 p.
- COMERMA J. 1997. Directivas del proceso de evaluación de tierras y premisas para la descripción de unidades de tierras y tipos de utilización de la tierra (TUT). Curso: Evaluación de tierras y sostenibilidad de la agricultura en la Región Andina. PROCIANDINO/REDAMACS. Maracay, Vz. IICA. 97 p.
- CORTÉS V., OCONITRILLO G. 1987. Erosión de suelos hortícolas en el área de Cot y Tierra Blanca de Cartago. Tesis de licenciatura. Geografía. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 158 p.
- CHAVERRI B.A., BORNEMIZA E. 1977. Interacción fósforo-zinc en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.) en la zona de Pacayas. *Agronomía Costarricense* 1(2):83-92.
- DE CAMINO R., MÜLLER S. 1993. Sostenibilidad de la agricultura y los recursos naturales. Bases para establecer indicadores. Proyecto IICA/GTZ. San José, CR, IICA. 133 p. (Serie Documentos de Programas N.º 38).
- DE SOUZA SILVA J. 2005. La innovación de la innovación institucional: de lo universal, mecánico y neutral a lo contextual, iterativo y ético. *Red Nuevo Paradigma para la Innovación Institucional en América Latina*. Quito, Ec, IFPRI-ISNAR. 370 p.
- DÓNOLI C., TORRES J.A. 1954. Estudio geoagronómico de la región oriental de la Meseta Central. San José, CR, Ministerio de Agricultura e Industria. 180 p.
- ESTRADA R., QUINTERO M. 2004. El Agua: elemento fundamental para generar una nueva dinámica de desarrollo rural. In: *desarrollo rural y nueva ruralidad en América Latina y la Unión Europea*. E. Pérez y M. Farah (eds). Colombia. p. 337-349.
- ETCHEVERS J. 1999. Indicadores de la calidad del suelo. In: *Reunión conservación y restauración de suelos, Programa Universitario del Medio Ambiente*. UNAM. México DF, Mx. 22 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT) 1994. *Alternativas técnicas para las áreas piloto*. Tierra Blanca de Cartago, CR. 38 p. (Documento de campo N.º 5).
- GÓMEZ F. 2002. Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentos en tres cuencas de Costa Rica. Tesis de licenciatura. Ing. Civil. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 191 p.
- GÓMEZ O., ARROYO L. 1999. Evaluación de las tierras de la zona de Tierra Blanca, Potrero Cerrado, Llano Grande, para papa (*Solanum tuberosum*) con el sistema ALES (Automated Land Evaluation System). In: *XI Congreso Agronómico y III Congreso Nacional de Suelos*. San José, CR. 33 p.
- GUTIÉRREZ E. 1994. The approximated sustainability index: a tool for evaluating sustainability national performance. Contribution to the network seminar on sustainable development by NEF. San José, CR, UCR. 66 p.
- GUZMÁN E. 1997. Ecoeficiencia para medir. Programa del Consejo Empresarial Colombiano para el Desarrollo Sostenible, CECODES. Colombia. 105 p.
- HALL C.A.S., LEVITAN L., SCHLICHTER T. 2000. Land, energy and agricultural production in Costa Rica. In: *Quantifying sustainable development. The future of tropical economies*. CAS Hall (ed). Academic. California, USA. 761 p.
- HENRÍQUEZ C., CABALCETA G. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. San José, CR, ACCS. 111 p.
- HERRICK J.E. 2000. Soil quality: an indicator of sustainable land management? *Applied Soil Ecology* 15:75-83.
- HILJE L. 1994. *Lecturas sobre manejo integrado de plagas*. Programa de Agricultura Tropical Sostenible. Turrialba, CR, CATIE. 73 p.
- HOLDRIDGE L. 1987. *Ecología basada en zonas de vida*. Trad. H Jiménez. San José, CR, IICA. p. 8-9.
- HOPGOOD M. 1999. The formation of volcanic ash soils in the Parque Recreativo Ricardo Jiménez de Oreamuno. Tesis de bachillerato en Suelos. Universidad de Aberdeen. Inglaterra. 67 p.
- ICE (Instituto Costarricense Electricidad, CR). 2005. *Plan de manejo integral de la cuenca del río Reventazón*.

- Informe Anual 2004. Unidad de Manejo de la Cuenca Reventazón (UEN). Proyectos y Servicios Asociados. San José, CR. 201 p.
- INFOPOS (Instituto de la Potasa y el Fósforo, Ec). 1997. Manual internacional de fertilidad de suelos. Quito, Ec. 141 p.
- ITURRIAGA I. 2006. Fertilización de la papa con fósforo en Andisoles de la Hacienda Juan Viñas, Costa Rica. Tesis de licenciatura. Ing. Agr. Convenio Universidad de Costa Rica-Universidad Navarra. San José, Costa Rica, 97 p.
- JIMENEZ F., COLLINET J., MAZARIEGO M. 1998. Recuperación de suelos degradados con *Gliricidia sepium* o gallinaza en la microcuenca río Las Cañas, El Salvador. Agroforestería en las Américas 5(20):10-15.
- KACHINGAN S.K. 1991. Multivariate statistical analysis: a conceptual introduction. 2a. ed. Radius. New York, USA. p. 160-203.
- KARLEN D. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. Soil Science Society America Journal 61: 4-10. Consultado 12 de junio 2005. Disponible en <http://soil.usda.gov/contact/sqi/>.
- KYUMA K. 1990. Protection of the environment: Sustained agriculture, sustained ecosystems. In: International Rice Research Institute. Manila. p. 57-71.
- LAL R. 1998. Soil quality and sustainability. In: Advances in soil science. Methods for assessment of soil degradation. R Lal, W Blum, C Valentine, B Stewart (eds) Florida, USA. p. 17-30.
- LINDARTE E., BENITO C. 1991. Instituciones, tecnología y políticas en la agricultura sostenible de laderas en América Central. In: Memorias del taller de agricultura sostenible en las laderas centroamericanas. Coronado, CR. p. 77-188.
- LOBB D., GARY R. 1999. Modeling tillage erosion in the topographically complex landscapes of south western Ontario, Ca. Soil and Tillage Research 51:261-277.
- LOMELÍ M. 2004. La erosión del suelo. Consultado 8 noviembre 2004. Disponible en <http://www.sagan-gea.org/hojaredsuelo/paginas/22hoja.html>.
- LÜCKE O. 1999. Base conceptual y metodológica para los escenarios de ordenamiento territorial. In: Escenarios de uso del territorio para Costa Rica en el año 2025. J. Dengo, J. Cotera, O. Lucke, D. Orlich, A. Chavarría (eds). Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. San José, CR, SINADES.108 p.
- MA (Ministerio de Agricultura, CR). 1956. Memoria Anual. Sección de papas. San José, CR. p. 24-25.
- MAI (Ministerio de Agricultura e Industrias, CR). 1950. Memoria Anual. Sección de papas. San José, CR. p. 175-178.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, CR). 1991. Aspectos técnicos sobre cuarenta y cinco cultivos agrícolas de Costa Rica. San José, CR. 560 p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, CR). 1998. Memoria del curso nacional sobre manejo integrado del cultivo de la papa. MAG, UCR, PRECODEPA, Proyecto IICA-GTZ. Cartago, CR. 60 p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, CR)/FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1994. Análisis de los niveles de adopción y de conocimiento sobre prácticas de conservación de suelos de los grupos de agricultores de las áreas piloto de Tierra Blanca, Cartago, CR. 100 p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, CR)/FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT)/UNED (Universidad Estatal a Distancia, CR). 1994. Manual de manejo y conservación de suelos y aguas. D. Cubero (ed). EUNED. San José, CR. 278 p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, CR)/MIRENEM (Ministerio de Recursos Naturales Energía y Minas, CR). 1995. Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica. San José, CR. 59 p.
- MARCHAMALO M. 2004. Ordenación del territorio para la producción de servicios ambientales hídricos. Aplicación a la cuenca del río Birrís (Costa Rica). Tesis Ph.D. Universidad Politécnica de Madrid. España. 409 p.
- MARTÍNEZ L.J. 2006. Modelo para evaluar la calidad de las tierras: caso del cultivo de papa. Agronomía Colombiana 24(1):96-110.
- MASERA O., ASTIER M., LÓPEZ S. 1999. Sustentabilidad y manejo de recursos naturales. El marco de evaluación MESMIS. GIRA- Mundi-prensa, México.

- MIDEPLAN (Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, CR). 2006. Sistema de indicadores sobre desarrollo sostenible (SIDES). San José, CR. Consultado 15 marzo 2007. Disponible en <http://www.mideplan.go.cr/Sides>.
- MINAE (Ministerio del Ambiente y Energía, CR). 1996. Comisión de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca río Reventado. Sistema Nacional de Áreas de Conservación Cuencas Hidrográficas. Proyecto de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del río Reventado. San José, CR. 27 p.
- MÜLLER S. 1996. ¿Cómo medir la sostenibilidad? Una propuesta para el área de la agricultura y los recursos naturales. Proyecto IICA/GTZ. San José, CR, IICA. 55 p. (Serie Documentos de Discusión N.º 1).
- MÜLLER S. 1997. Evaluating the sustainability of agriculture. The case of the Reventado river watershed in Costa Rica. European University Studies Series V. Economics and Management. Alemania. 2194:1-223.
- NÚÑEZ J., MÜLLER S., RAMÍREZ L. 1998. Indicadores para el uso de la tierra: el caso de la cuenca del río Reventado, Costa Rica. Proyecto IICA/GTZ. San José, CR, IICA. 58 p. (Serie Documentos de Discusión N.º 5).
- OLESCHKO K., ARIAS H., CABRERA F. 1992. Unified index of soil structure stability. *Terra* 10:151-165.
- PARRAL A. 2004. Centro Investigaciones Agronómicas con nuevas variedades de papas. Boletín Girasol N.º 24. San José, CR, UCR. Consultado 20 febrero 2006. Disponible en http://www.vinv.ucr.ac.cr/girasol/archivo/girasol_24/ciapapa.html.
- PLA I. 1995. Degradación y conservación de suelos. Conceptos básicos. In: Reunión bienal de la red Latinoamericana de Labranza Conservacionista. I Pla y F Ovalles (eds). FONAIAP, FAO, ISSS, UNELLEZ, RELACO. Maracay, Vz. 386 p. (Series Especiales N.º 32).
- PÉREZ B. 1974. Respuesta de la papa (*Solanum tuberosum* L.) a la fertilización con N-P-K. Tesis Ing. Agr. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 51 p.
- PIERI C. 1995. Long-term soil management experiments in semi-arid Francophone Africa. In: soil Management: experimental basis for sustainability and environmental quality. R. Lal and B. Steward (eds). Lewis Publishers/CRC. Florida, USA. 266 p.
- RAMIREZ L. 2007. Caracterización física, socio-económica e indicadores de sostenibilidad agrícola en la cuenca media del río Reventado. Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 186 p.
- RICHTER D. deB. 2007. Humanity's transformation of earth's soil: pedology's new frontier. *Soil Science* 172(12):958-967.
- SÁNCHEZ E. 1993. Determinación de áreas críticas mediante sistemas de información geográfica, cuenca del río Reventado. Tesis de maestría, CATIE, Turrialba, Costa Rica. 116 p.
- SAS 2003. SAS 9.1.3 for Windows. Service Pack 4. Win_Pro plataforma. Copyright (c) 2002-2003 by SAS Institute Inc. Cary NC, USA.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria, CR). 2003. Estudios Económicos e Información. San José, CR. 55 p. (Boletín Estadístico Agropecuario N.º 14).
- SERAGELDIN I. 1996. El desarrollo sostenible: de la idea a la acción. *Finanzas y Desarrollo* 33(4):3.
- SHOJI S., NANZYO M., DAHLGREN R. 1993. Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization. Development in Soil Science 21. Netherlands, Elsevier. 288 p.
- SOTO J.A. 1998. Formas de fósforo y su liberación en andisoles de la región central oriental de Costa Rica. Tesis de doctorado. Universidad de Córdoba. España. 155 p.
- SPAANS E. 2007. Manejo de la estructura del suelo con precisión. Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda (EARTH). In: Memoria V Congreso Nacional de Suelos. Heredia, CR. 29 p.
- SQI (Soil Quality Institute, Ca). 1998. Indicators of soil. Land quality-examples. Alberta, Ca. Consultado 6 octubre

1998. Disponible en <http://www.statlab.iastate.edu/survey/sqi>.
- TENCIO R. 1998. Cómo llevar un registro de costos de producción. In: Memoria Curso Nacional sobre Manejo Integrado del Cultivo de Papa. MAG, UCR, Proyecto IICA/GTZ. Cartago, CR. 60 p.
- VILLEGAS J. 1995. Evaluación de la calidad del agua en la cuenca del río Reventado. Bajo el enfoque de indicadores de sostenibilidad. Tesis de maestría, CATIE, Turrialba, Costa Rica. 144 p.
- WCED (World Commission on Environment and Development, En). 1987. Our common future. Oxford University Press. Oxford, En. 400 p.
- WINOGRAD M. 1995. Indicadores ambientales para Latinoamérica y el Caribe: hacia la sustentabilidad en el uso de tierras. Proyecto IICA/GTZ. OEA, WRI. San José, CR, IICA. 84 p.
- ZAMORA C., BAO R. 1969. Uso actual de los suelos derivados de ceniza volcánica del Perú. In: Suelos derivados de cenizas volcánicas de América latina. Turrialba, CR, CATIE. p. 5.1-5.5.
- ZINCK J.A. 1977. Riesgos ambientales y suelos. Enfoques para la modelización de la erosión por cárcavas y movimientos en masa. In: Memorias 50 Aniversario de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. Madrid, Es. p. 283-297.