

EL ANÁLISIS MULTICRITERIO, UN CASO ESPECÍFICO: PROYECTO PROLAND

Juan Rafael Mora Camacho¹

RESUMEN

La técnica del análisis multicriterio se aplicó en la evaluación de técnicas de manejo alternativo para áreas de pendiente deforestadas usadas en la agricultura en Costa Rica y Guatemala. Se identificaron objetivos de evaluación entre los actores locales, con la ayuda de diferentes herramientas; pudiéndose identificar la pérdida de suelo, el ingreso de la finca, los insumos agrícolas, el lavado de nitrógeno, protección de la biodiversidad y necesidades nutricionales. Luego mediante algoritmos y fórmulas matemáticas, fueron caracterizados todos los objetivos. Este modelo se utilizó como base para la construcción de una herramienta para apoyar la toma de decisiones que hace posible el cálculo del valor de cada objetivo bajo diferentes escenarios de producción y protección.

* Licenciado en Agronomía. Profesor de la Sede Brunca de la Universidad Nacional. Encargado para Costa Rica del proyecto BEST MANAGEMENT PRACTICES FOR THE PRODUCTIVE/ PROTECTIVE REHABILITATION OF DEFORESTED SLOPING LANDS (PROLAND), desarrollado en colaboración con la Unión Europea.

ABSTRACT

The multimedia analysis approach was applied to the evaluation of alternative management practices in deforested sloping areas used for farming in Central American countries (Guatemala, Costa Rica). A major number of major evaluation objectives were identified, with the help of workshop and local actors, including soil loss, farm income, agricultural inputs, nitrogen leaching, protection of biodiversity, and local nutrition needs. Then, appropriate algorithms and other mathematical formulas were put together for the quantitative characterization of all these objectives. This model was used as the basis for the construction of a user-friendly decision support tool, making possible the calculation of the values of the objectives for each scenario.

ANTECEDENTES

El enfoque científico que dominó en el mundo hasta la aparición de la Teoría de Sistemas, fue el reduccionismo, el cual sostenía que todo lo existente podía descomponerse en elementos simples e individuales. De acuerdo con este concepto, el primer paso en el análisis científico consistía en aislar el objeto de investigación, descomponiéndolo en partes individuales, y preferiblemente independientes; luego se explicaba el comportamiento de cada una de las partes y, por último, se juntaban las explicaciones de las partes para poder entender el conjunto.

En los inicios del siglo XX, esta práctica de la ciencia se modificó, y los esfuerzos se concentraron en analizar las interacciones entre los fenómenos, concibiendo la idea de que un organismo debe ser estudiado como un todo, ya que representa un sistema formado por múltiples elementos que interactúan dinámicamente.

Como tal, el enfoque sistémico se presentó como un nuevo paradigma, dirigido a integrar y relacionar las distintas escuelas del conocimiento ante una situación crítica de la ciencia. Con su aplicación se busca el análisis de los distintos elementos que componen el objeto de estudio, analizando además su organización e interacción dinámica. Sobre la base de estos elementos se trata de predecir el comportamiento de la realidad estudiada; la cual enmarca el concepto de sistema, que podrá ser definido de maneras muy diversas según los fines que se persigan en la investigación.

Gran cantidad de proyectos de desarrollo agrícola del Tercer Mundo han fracasado, al no considerar el concepto de Sistema; en los cuales se plantean soluciones técnicas sin tomar en cuenta la complejidad de los sistemas de producción (Dufumier, 1985, pág. 34). Tomando en cuenta que la realidad agropecuaria, los sistemas de producción están conformados no solo por factores agroecológicos, sino también por aspectos socioeconómicos, Berdegué y otros autores, citados por Maino et al. (1993, pág. 156), señalan que las unidades productivas campesinas son posibles de analizar desde un enfoque de sistemas, debido a que:

- tienen objetivos como unidad (objetivos sistémicos);
- forman una parte de una jerarquía de sistemas: están insertos en un suprasistema ecohistórico y están compuestos por subsistemas. Existen circuitos de flujo de materia y energía, de información y de dinero, entre cada uno de estos niveles jerárquicos;
- tienen estructura y funcionamiento. Es decir, procesan en forma organizada distintos niveles de materia y energía, de información y dinero;
- tienen permanencia en el tiempo.

Con el desarrollo de la Teoría de Sistemas surge la inquietud de aplicarla en las diferentes ciencias, y es así como la Investigación Operativa (I.O.), trata de aplicar el método científico a la solución de problemas que aparecen en la planificación, diseño, administración y operación de sistemas complejos como organizaciones y sistemas sociales.

La I.O. se distingue por dar énfasis a la toma de decisiones para la solución de problemas; la evaluación de las decisiones se fundamenta en factores económicos de eficiencia; y utiliza modelos matemáticos (modelación), para dicha evaluación (Wagner, 1970, págs. 2-10).

La I.O. trata de diseñar, estructurar y operar sistemas de la mejor forma posible, lo que también recibe el nombre de Análisis de Sistemas; basando su estrategia de solución de problemas en el método científico, dando participación importante a la construcción de un modelo y a la cuantificación del sistema en estudio. Sin embargo, la mayoría de los modelos cuantitativos, empleados para tomar decisiones, tienen dos limitaciones: una que es la dificultad de correspondencia biunívoca entre el sistema propuesto y el real; y la otra que solo

se puede considerar un criterio como elemento base en la toma de la decisión (Maino et al., 1993, págs. 23-43).

Con el fin de superar estas limitaciones, se han desarrollado una serie de técnicas; como son la programación dinámica, la programación estocástica, la programación no lineal y otras.

Dentro de la programación matemática existen diferentes enfoques paradigmáticos para analizar el problema de la toma de decisiones en el contexto de los objetivos múltiples, también conocidos como programación multicriterio o análisis multicriterio; y son ubicados en tres grandes grupos:

1. Técnicas que requieren “a priori” una definición de las preferencias por parte del centro decisor: Programación por metas, Método Haime-Hall, Programación compromiso.
2. Técnicas que requieren de una definición progresiva de las preferencias por parte del centro decisor: Método STEP, Método SEMOPS, Método Roy, etc.
3. Técnicas que requieren “a posteriori” una definición progresiva de las preferencias por parte del centro decisor: Programación multiobjetivo.

La programación multicriterio maneja una serie de conceptos que es necesario conocer para poder comprender su funcionamiento. Estos conceptos son:

- **Atributos:** son valores del centro decisor relacionados con una realidad determinada. Son medibles y pueden ser expresados por funciones matemáticas $f(x)$ de las variables de decisión. El margen bruto, el riesgo, etc., son ejemplos de atributos.
- **Objetivos:** dirección del cambio de un atributo. Es decir, los objetivos representan una maximización de las funciones matemáticas que representan los atributos. Así maximizar el margen bruto, minimizar el riesgo, etc., son ejemplos de objetivos.
- **Nivel de aspiración:** se define como el nivel aceptable de logro para un atributo.
- **Meta:** Es la combinación de un atributo con el nivel de aspiración. Así generar un margen bruto de $\$ 1 \times 10^6$, constituye un ejemplo típico de meta.

En general, las metas toman la forma $f(x) \leq b$, donde b representa el nivel de aspiración.

- **Restricción:** tienen la misma estructura matemática y apariencia de las metas, pero se diferencian en el significado que se le asigna al segundo miembro de ambas inecuaciones.
En las metas el segundo miembro corresponde a un nivel de aspiración que el centro decisor desea alcanzar, pudiendo no alcanzarlo; para las restricciones, el segundo miembro debe satisfacerse para poder tener una solución posible.
- **Criterios:** son los atributos, metas y objetivos de un centro decisor, los cuales son relevantes para la toma de decisiones.
- **Óptimos de Pareto:** el concepto de Pareto Óptimo juega un papel muy importante en la teoría económica y en los diferentes enfoques de la teoría de la decisión multicriterio.
- El conjunto eficiente está formado por las soluciones posibles, que cumplen las restricciones, que para cada solución no perteneciente al conjunto eficiente, pero dentro del dominio de lo posible, existe una solución Pareto Óptima para la que todas las funciones objetivo pueden alcanzar el mismo o mejor resultado, siendo necesariamente mejor para al menos un objetivo (Romero y Rehman, 1984, págs. 177-190).

Al respecto un ejemplo que comúnmente se emplea para ilustrar este concepto es el siguiente:

Un centro decisor, el área de la planificación agropecuaria, tiene tres objetivos: maximizar el margen bruto (MB), maximizar el empleo de mano de obra (MO) y minimizar el endeudamiento (ED), existiendo las siguientes soluciones posibles:

Solución	MB ^{1/}	MO ^{2/}	ED ^{1/}	Valoración
A	300	150	90	Eficiente
B	200	150	90	No eficiente
C	200	170	100	Eficiente

1/: Unidades monetarias

2/: Horas hombre

Según la definición de eficiente, podemos apreciar que la solución B no es eficiente, ya que es dominada por la solución A. Pues aunque coinciden respecto a “MO” y “ED”, el “MB” dado por la A es mayor que el dado por la B. Entonces la opción B nunca será elegida por un decisor. Al contrario la solución C es eficiente, pues no es dominada por A pues a pesar de que el “MB” y el “ED” son peores, el “MO” es mejor.

- Intercambios: el intercambio entre dos objetivos mide lo que se sacrifica de un objetivo, para mejorar en una unidad el otro. Entonces si se tienen dos soluciones eficientes x_1 y x_2 , el intercambio entre el j -ésimo y el k -ésimo criterio viene dado por:

$$T_{jk} = \frac{f_j(x^1) - f_j(x^2)}{f_k(x^1) - f_k(x^2)}$$

Las funciones $f_j(x^1)$ y $f_k(x^2)$ representan objetivos considerados, si seguimos el ejemplo:

$$T_{AC} = \frac{300-200}{100-90} = 10$$

El intercambio indica que por cada unidad que disminuye “ED”, se da una disminución de 10 unidades en el “MB”. O sea que el costo de oportunidad de una unidad de endeudamiento, es 10 unidades del margen bruto.

PROYECTO PROLAND, UN CASO ESPECÍFICO

El proyecto PROLAND se desarrolló en colaboración con el Programa de Ciencias y Tecnologías para Países en Desarrollo de la Comunidad Europea. Tuvo como objetivo validar una serie de mecanismos en la toma de decisiones y el uso de diferentes prácticas para el manejo, protección y recuperación de suelos. Estos mecanismos fueron aplicados en dos países de Centroamérica y en escenarios con características muy diversas. Para lo cual se trabajó en una zona agrícola de Pérez Zeledón, que se caracterizó económica, social, climática, geográfica, agrícola y energéticamente; se propusieron una serie de alternativas de manejo de las diferentes áreas, según el riesgo o avance del proceso de degradación de suelos.

Cada una de esas alternativas proporciona diferentes usos y grados de eficiencia en la protección del suelo y requiere de diferentes cantidades de inversión, lo cual incide en el ingreso neto del productor.

Para que un productor tome la decisión de adoptar una de esas prácticas se propone una herramienta, con la cual tomando en cuenta una serie de variables y objetivos, se facilita tomar una decisión sobre los cultivos y prácticas por adoptar.

En todos los tipos de análisis multicriterio se deben llevar a cabo los siguientes pasos:

1. Definición del problema
Grupo de alternativas de solución.
Grupo de criterios.
Sistema de preferencias.
Factores de incertidumbre.
2. Expresión matemática de los parámetros.
3. Selección del método apropiado de solución.
4. Modelación y soluciones.
5. Comparar soluciones para buscar una solución.

Para los puntos 1 y 2 a continuación se propusieron una serie de problemas con sus expresiones matemáticas que podrían ser utilizadas en la elaboración y modificación del modelo propuesto y que serían escogidas por los investigadores del proyecto.

A continuación se realiza una descripción de los procedimientos seguidos en la construcción del modelo.

a- Selección del cultivo (uso del suelo).

Cuando i cultivos ($i = 1, \dots, n$) son seleccionados para cultivar en un área agrícola, con s_i (ha) de área agrícola para el cultivo i .

$$S = \sum s_i$$

Donde S es el total del área agrícola. Los criterios para la selección de los cultivos se presentan más adelante.

b- Selección de las prácticas de manejo.

Para cada uno de los i cultivos, existen j diferentes prácticas de manejo para seleccionar y usar en cada área en particular. A continuación se presentan una serie de atributos y objetivos x_{ij} , que son afines con los objetivos del proyecto. Todos estos parámetros dependen de la selección de los i cultivos y de las j prácticas de manejo y técnicas.

y Producción agrícola por hectárea, Y , es calculada:

$$Y = \sum s_i \cdot y_i$$

p El precio de la producción; ingreso bruto total de las áreas cultivadas, P :

$$P = \sum s_i \cdot y_i \cdot p_i$$

c Costos de producción por hectárea; c usualmente está formada por un costo fijo c_0 , y por uno proporcional a la producción, c_1 :

$$c_i = c_{i0} + c_{i1} \cdot y_i$$

I Ingreso neto. Usando y , p y c podemos calcular el ingreso neto I , para una determinada área de cultivo:

$$I = \sum s_i \cdot [y_i \cdot p_i - c_i]$$

W Consumo de agua; por unidad de cultivo producido. Total de necesidades de irrigación, se calcula tomando en cuenta el aporte de la lluvia (R : mm/año):

$$W = \sum s_i \cdot [y_i \cdot w_i \cdot R]$$

f Las necesidades de combustible y/o energía para el desarrollo del cultivo (por hectárea) están compuestas por f_0 y una parte proporcional f_1 : $f_1 = f_{i0} + y_i \cdot f_{i1}$
El total de las necesidades de combustible, F para la producción agrícola puede calcularse:

$$F = \sum s_i \cdot f_i$$

e El efecto total de la erosión del campo de cultivo, E:

$$E = \sum s_i \cdot e_i$$

g El efecto de la actividad agrícola en la calidad de las aguas subterráneas (Ej. Lixiviación). El total de agua subterránea afectada se estima por:

$$G = \sum s_i \cdot g_i$$

a Las emisiones al aire (CO, CO₂, SO₂, Nox, partículas) asociadas con la producción, principalmente relacionada con la utilización de combustible en la finca, expresado en total de emisiones por unidad de combustible consumido:

$$A = \sum s_i \cdot f_i \cdot a_i$$

n Valor nutritivo de la producción, por unidad de producto, donde podrían distinguirse varios aspectos como contenido de proteínas, calorías, valor nutritivo, entre otros:

$$N = \sum s_i \cdot y_i \cdot n_i$$

b La bioenergía potencial (en unidades por unidad de producto) asociadas con la producción, por ejemplo, a través de subproductos y residuos de cosechas:

$$B = \sum s_i \cdot y_i \cdot b_i$$

l El empleo local necesario para la producción (por hectárea) se calcula:

$$L = \sum s_i \cdot l_i$$

d Otros efectos en el ecodesarrollo promovidos por la adopción de cultivos y las prácticas de manejo seleccionadas se estiman:

$$D = \sum s_i \cdot d_i$$

Usando los parámetros anteriormente definidos, es posible establecer un número de criterios x_{ij} de naturaleza económica, social, ecológica con base en cada i cultivo y j práctica de manejo; por su naturaleza tendremos criterios a ser reducidos (-) y otros a ser incrementados o favorecidos (+).

- Y Producción agrícola (+)
- I Ingresos netos por las cosechas (+)
- W Necesidades de irrigación (-)
- F Necesidades de combustible y energía (-)
- E Efecto de la erosión (-)
- G Efecto en la calidad de aguas subterráneas (-)
- A Emisiones al aire producto de la actividad agrícola (-)
- N Potencial nutritivo en la alimentación (+)
- B Bioenergía potencial (+)
- L Generación de empleo (+)
- D Otros efectos en el ecodesarrollo y/o la biodiversidad (+)

Comúnmente la elección entre un cultivo y las prácticas de manejo es determinada por el ingreso neto a obtener; y la participación de los otros criterios no es considerada, ya que es difícil poder visualizar su participación. Lo anterior requiere de la construcción de elaborados algoritmos.

EVALUACIÓN DE ALGORITMOS - ÍNDICE DE SOSTENIBILIDAD

Las diferentes alternativas Z_j pueden ser comparadas con el uso de los criterios anteriores y sus correspondientes pesos z_t ($t = 1, \dots, 11$) que son cantidades relativas expresadas en grados de preferencia de un determinado objetivo, combinados en una simple función objetivo, O .

$$O_j = \sum (+/-) z_t \cdot Z_t$$

Los valores positivos o negativos de cada criterio fueron definidos anteriormente y el valor de $Z_t = Y, I, W, G, F, A, E, N, B, L, D$.

La alternativa Z_1 es mejor que Z_2 , cuando $O_1 > O_2$.

Un aspecto por evaluar con particular interés es la sostenibilidad, que puede obtenerse al efectuar una comparación entre los objetivos Z_{jt} , caracterizando cada alternativa y las condiciones necesarias para soportar actividades locales, Z^*_t . Entonces Z es sostenible si:

$Z - Z^* > 0$ para criterios positivos, y
 $Z - Z^* < 0$ para criterios negativos.

Un índice de sostenibilidad general (SI) puede obtenerse por una combinación de todos los once aspectos, t , definidos arriba:

$$SI = \sum (+/-)h_t [Z - Z^*]_t$$

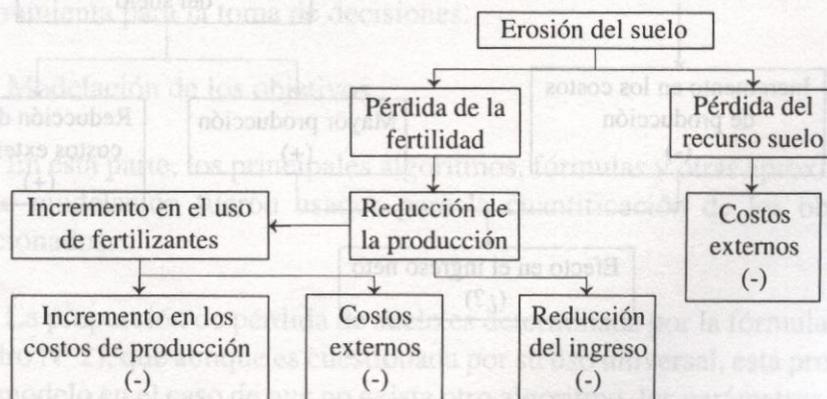
Donde h es el peso de cada factor expresando específicamente las preferencias de sostenibilidad, y (+/-), tal y como se utilizó para la función objetivo.

RESULTADOS

1. Estructura lógica. Uno de los principales objetivos del proyecto consistió en establecer el efecto de la erosión sobre la fertilidad del suelo, y sus posibles efectos en las prácticas de manejo de la finca. Los principales efectos de la erosión del suelo se ilustran en la Figura N° 1.

FIGURA N° 1

PRINCIPALES EFECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES DE LA EROSIÓN EN LAS ACTIVIDADES AGRÍCOLAS SIN LA ADOPCIÓN DE PRÁCTICAS DE PROTECCIÓN O MANEJO



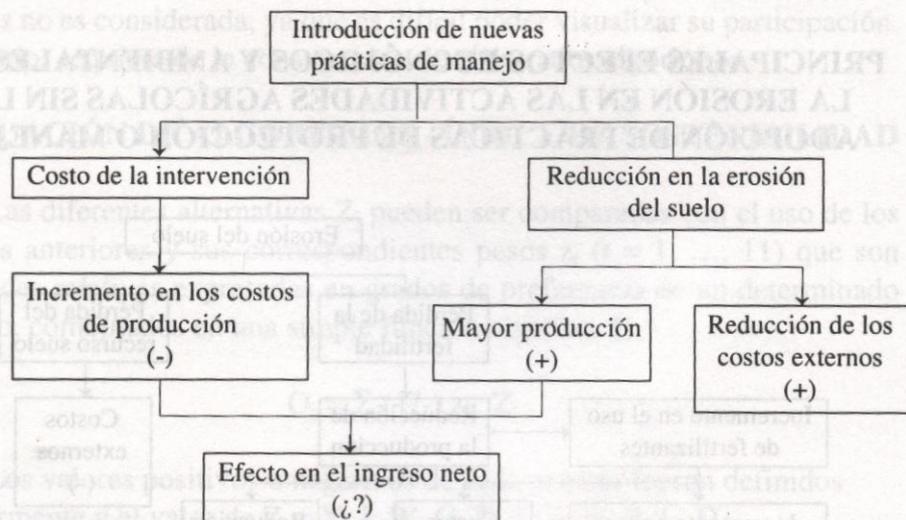
Una pérdida de la fertilidad se traduce en una reducción de la productividad y de los ingresos asociados a su comercialización.

Para compensar la pérdida de fertilidad, los productores deben invertir en el uso de más fertilizantes, lo cual incrementa sus costos y las consecuencias del uso de estos en el ambiente (costos externos por la contaminación de fuentes de agua superficiales y subterráneas). También tenemos las pérdidas en el recurso suelo, que se pueden considerar como una externalidad, por la contaminación de las aguas superficiales y el efecto irreversible en la sostenibilidad del sistema.

Con la adopción de nuevas prácticas de manejo y conservación del suelo los efectos de la erosión se pueden atenuar, siguiendo una lógica que se ilustra en la Figura N° 2. La pérdida de suelo puede ser limitada, resultando en beneficios económicos (fertilidad, producción sostenida, menor uso de fertilizantes), y ambientales (contaminación y costos externos por el uso de fertilizantes y la erosión).

FIGURA N° 2

**PRINCIPALES EFECTOS AMBIENTALES Y ECONÓMICOS
COMO PRODUCTO DE LA ADOPCIÓN DE NUEVAS PRÁCTICAS
DE MANEJO**



El costo adicional requerido por la adopción de nuevas prácticas de manejo incrementa los costos fijos en la finca.

Aunque el efecto ambiental es claramente positivo, el efecto económico debe obtenerse de un balance entre el resultado de mantener la fertilidad por un largo período y el incremento en los costos fijos. Lo cual puede ser una tarea de otro modelo.

2. Selección de los objetivos

Para una eficiente aplicación del análisis multicriterio, la lista de objetivos descrita en páginas anteriores, debe ser reducida de los once planteados, a una selección de los más significativos para los intereses de los pobladores de las comunidades abarcadas por el proyecto. Basándose en una serie de procedimientos se seleccionaron y usaron en la modelación y construcción del modelo los siguientes objetivos:

- Erosión del suelo como menor recurso suelo (externalidad).
- Nutrición humana (solo para cultivos comestibles).
- Ingresos (netos).
- Uso de insumos agrícolas, especialmente fertilizantes (costos).
- Contaminación del agua por el uso excesivo de fertilizantes (externalidad).

Otro objetivo al que se le atribuyó significativa importancia fue el de los *efectos en la biodiversidad*, pero este no fue considerado en la construcción de la herramienta para la toma de decisiones.

3. Modelación de los objetivos

En esta parte, los principales algoritmos, fórmulas y otras aproximaciones de modelación fueron usados para la cuantificación de los objetivos seleccionados.

La proporción de pérdida de suelo es determinada por la fórmula EUPS (Cuadro N° 2), que aunque es cuestionada por su uso universal, esta provee un buen modelo en el caso de que no exista otro algoritmo, los parámetros físicos

CUADRO N° 1

RELACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA REDUCCIÓN DE LA FERTILIDAD PRODUCTO DE LA EROSIÓN DEL SUELO

 Efecto de la erosión del suelo en la producción agrícola, por la reducción de la fertilidad del suelo. La predicción de la pérdida de fertilidad se hizo usando una simulación con EPIC⁽¹⁾. La forma de la ecuación es:

$$y = a - x^t$$

donde:

- y = es el porcentaje de pérdida de fertilidad
- a = es el valor inicial (100%)
- x = es una constante que depende de la práctica de manejo
- t = es el tiempo en años

CUADRO N° 2

CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DEL RECURSO SUELO COMO UNA FUNCIÓN CON CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y BIOLÓGICAS

E.U.P.S.

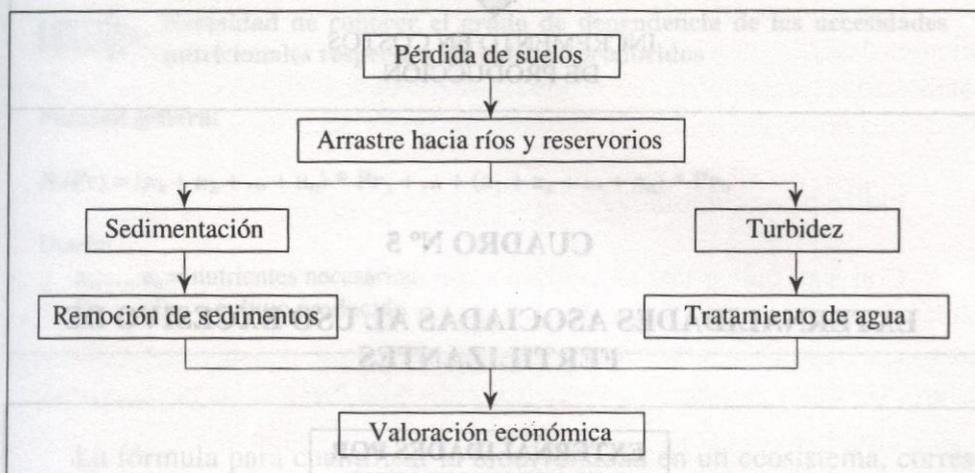
$$A = R * K * (L * S) * P * C$$

- A = Cantidad de masa de suelo perdido por unidad de área por año
R = Factor relativo a la precipitación
K = Factor de erodabilidad del suelo
L = Factor relativo a la longitud de la pendiente
S = Factor relativo al porcentaje de pendiente
P = Factor relativo a las prácticas de conservación
C = Factor relativo al cultivo y sus prácticas de manejo

y biológicos involucrados en la fórmula, se relacionan con los principales aspectos del fenómeno estudiado.

Las externalidades asociadas con la erosión del suelo (Cuadro 3), pueden ser aplicadas para cuantificar las externalidades en términos físicos y monetarios. Debido a que se carece de una validación económica de los efectos de este proceso se utiliza esta técnica para calcularla.

CUADRO N° 3
EXTERNALIDADES DE LA EROSIÓN DEL SUELO

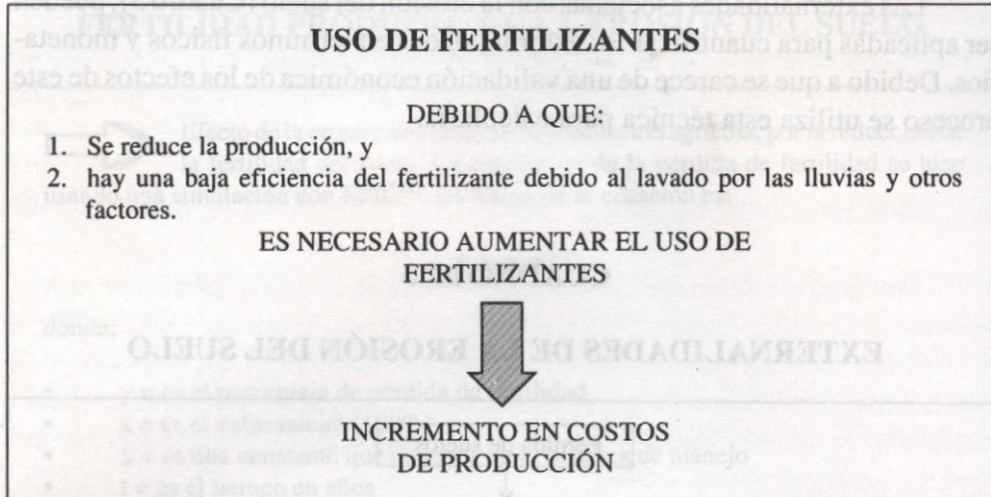


En el Cuadro N° 4 se resumen los principales puntos necesarios para calcular el efecto del uso de fertilizante en los costos de producción. Se asume en la fórmula que se utiliza el fertilizante necesario para restablecer los niveles de fertilidad a las condiciones iniciales.

Para la cuantificación de las externalidades producto del uso excesivo de fertilizantes, en términos físicos y económicos, también en este caso, no se cuenta con estudios que nos den una valoración económica de los daños causados por este tipo de contaminación, por lo que se utiliza esta estrategia sugerida por los investigadores extranjeros (Cuadro N° 5).

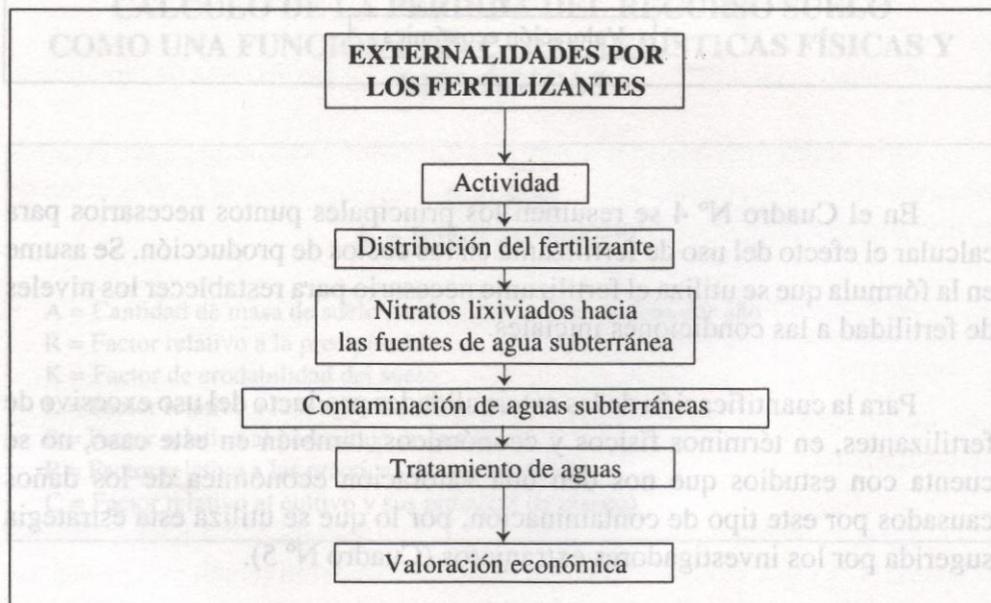
CUADRO N° 4

FACTORES RELACIONADOS CON EL USO DE FERTILIZANTES



CUADRO N° 5

EXTERNALIDADES ASOCIADAS AL USO EXCESIVO DE FERTILIZANTES



Una fórmula general para el cálculo del valor nutricional de la producción agrícola se presenta en el Cuadro N° 6; para aplicaciones prácticas se trabaja con dos tipos de nutrientes: el contenido de proteína y el contenido de calorías de la parte comestible del cultivo.

CUADRO N° 6

VALOR NUTRICIONAL

 **Efecto de la baja en producción respecto a las necesidades nutricionales de la población local**

 **Necesidad de conocer el grado de dependencia de las necesidades nutricionales respecto a los cultivos producidos**

Función general

$$N(\text{Pr}) = (a_1 + a_2 + \dots + a_n) * \text{Pr}_1 + \dots + (a_1 + a_2 + \dots + a_n) * \text{Pr}_n$$

Donde:
a₁, ..., a_n = nutrientes necesarios
Pr₁, ..., Pr_n = cultivo producido

La fórmula para cuantificar la biodiversidad en un ecosistema, corresponde al Índice Shannon.

$$H' = \sum p_i \ln p_i$$

Donde: p_i se refiere a la abundancia proporcional de la i-ésima especie.

Se requiere conocer la variedad de especies y la abundancia relativa de estas; enfrentando la dificultad de establecer el número de unidades a muestrear y el tamaño de esas unidades, así como poder cuantificar aquellas poblaciones de individuos con comportamientos fuera de la media.

4. Función objetivo

Basándose en los pasos anteriores la maximización de la función objetivo es calculada por la fórmula:

$$\text{Max } Z = w_1 * (\text{S.E}) - w_2 * F + w_3 * N + w_4 * B - w_5 * \text{Ext}_1 - w_6 * \text{Ext}_2$$

w_i = el peso de cada factor. B = Biodiversidad (máx).

S.E = Erosión del suelo. Ext = Externalidades.

F = Fertilizantes. N = Nutrición.

Los valores de cada objetivo fueron calculados siguiendo los procedimientos descritos con anterioridad y los pesos relativos a cada objetivo fueron establecidos tomando en cuenta las condiciones actuales ecológicas y económicas, así como encuestas realizadas a los entes decisorios.

5. Índice de sostenibilidad

Con este índice nos es posible expresar un valor para cada caso, y se obtiene comparando el valor de la función objetivo en las condiciones que prevalecen antes de la intervención respecto a lo que podríamos esperar en el futuro. Un valor de quince años es utilizado para realizar las proyecciones.

$$\text{S.I.} = \{Z_0, Z_{15}\}$$

Donde:

S.I.: es el índice de sostenibilidad.

Z_0 : es el valor de la función objetivo bajo las condiciones actuales y con las actuales prácticas de manejo.

Z_{15} : es el valor esperado del mismo objetivo luego de quince años de manejo, de acuerdo con las prácticas seleccionadas. Este período en particular se determinó luego de ensayos en las etapas anteriores del proceso.

Para poder comparar los dos valores es necesario ajustar el valor obtenido para los quince años considerando la depreciación para tener un valor presente.

HERRAMIENTA PARA APOYAR EL PROCESO DE DECISIÓN

Con el fin de apoyar el proceso de toma de decisiones, fue construida una herramienta con el lenguaje de programación C++ que funciona sobre la plataforma de Excel. Ella le permite al decisor realizar fácilmente los cálculos necesarios para poder comparar entre las diferentes opciones que maneja.

Los factores que se consideraron en esta herramienta fueron:

1- Fertilidad del suelo (Lámina 1), donde se usó una ecuación de la forma:

$$\text{fer}(t) = 1 - x^t / 100 \quad 0 < t < 4$$

$$\text{fert}(t) = 1 - y^t / 100 + b * y^t / 100 \quad t \geq 4$$

$$\frac{[1 - 10^{-c(dD_0 + D_n)}] * 10^{-k(dD_0 + D_n)^2}}{1 + 10^{[dD_0 + D_n]}}$$

2- Exceso de fertilizantes (Lámina 1): $R = R_m *$

R = rendimiento por hectárea

R_m = máximo rendimiento posible con $k = 0$ y $dD_0 + D_n$ cercano a infinito

c = coeficiente que indica la tendencia en el origen de la curva (entre 0,004 y 0,015)

dD_0 = disponibilidad de nutrientes en el suelo (kg/ha) (valores entre 24 y 208)

D_n = dosis de nutrientes (kg/ha/año de nitrógeno, no de fertilizantes totales)

k = coeficiente que indica la tendencia en la caída de la curva (entre 0 y $14 * 10^{-7}$)

Esta fórmula calcula el fertilizante nitrogenado adicional que es necesario agregar para mantener la producción similar a la de la primera cosecha, en el momento en que la producción inicia a decaer producto de la erosión del suelo. Para ese cálculo se trata de buscar el valor del fertilizante que debe agregarse para que sea cero la diferencia entre la producción inicial y la actual. Ambas son calculadas por la ecuación antes mencionada.

3. Lavado de nitrógeno: este es calculado en kilogramos de KNO_3 que debe ser removido del agua, producto del lavado de fertilizante por parte del agua de lluvia (Lámina N° 2).

$$P_i = \frac{L * D * W * A_p}{P * A}$$

P = kg NO_3 por remover
 L = nitrógeno [kg/m^2] adicionado en el fertilizante
 D = tasa de desnitrificación (valores entre 0,2-0,5)
 W = volumen de agua tratada [$\text{m}^3/\text{año}$] = [# de ciudadanos * 200 lt/día]
 A_p = área total de plantación (m^2)
 P = excedente de precipitación en % (m)
 A = área de captación de los ríos (m^2)

4. Pérdida de suelo: el cálculo de esta variable se basa en el uso de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo, la cual ya fue descrita con anterioridad (Figura N° 2).

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

Todos los cálculos mencionados con anterioridad son efectuados automáticamente por la herramienta, el tiempo necesario para completarlos depende de la computadora que se utilice. Los principales resultados se presentan en tablas y figuras.

El cálculo de la función objetivo puede hacer posible la identificación de la mejor práctica a seleccionar, es una ecuación simple que combina los resultados de las fórmulas anteriores con pesos que son definidos por el usuario, dependiendo de la importancia relativa de cada criterio en su producción.

Los mejores resultados se obtendrán de aquella práctica que presente la menor variación entre el primero y el último años de la predicción (Lámina N° 3).

CONCLUSIONES

Del proceso seguido, se comprueba la aplicabilidad del análisis multicriterio en el estudio de procesos agrícolas, en los que sea necesaria la consideración de varias variables. Con la incorporación de un grupo de variables, el proceso de cálculo se simplifica y puede cuantificarse por medio de la aplicación de pesos para cada una. La posibilidad, además, de considerar variables que sean de interés para cada zona de estudio o actividad agrícola, permite su aplicación en diferentes circunstancias y paisajes.

Siempre será necesaria la participación del decisor en el proceso, sin embargo, este podrá construir y utilizar una herramienta, como la usada en este proyecto, para facilitar su decisión.

Además, se comprobó que el análisis multicriterio puede ser funcional para la evaluación de prácticas alternativas de manejo de suelos, en condiciones de altas tasas de erosión del suelo. En este caso, la selección de cinco o seis criterios (objetivos) es suficiente para describir la complejidad de una situación de toma de decisión, sin eliminar el necesario criterio de la persona que toma la decisión.

La estructura de evaluación desarrollada en este caso específico, puede jugar el rol de cuantificar económica y ecológicamente la presión sobre los recursos locales, tanto económicos como sociales, así como ambientales y nutricionales.

BIBLIOGRAFÍA

- Benayoun, R., J. De Montgolfier, J. Tergny y O. Larichev. 1971. Linear Programming with Multiple Objective Functions: Step Method (STEM). *Mathematical Programming*, 1:366-375.
- Calatrava, J. 1980. La Programación Multicriterio: Consideraciones teóricas y estudio de las ventajas e inconvenientes de su empleo como instrumento de análisis en planificación agraria. *An. Inst. Nac. Inv. Agrarias. Secc. Econ. y Social. Agraria*. 5:131-145. Madrid.
- Dufumier, M. 1985. Sistema de producción y desarrollo agrícola en el Tercer Mundo. CIPCA, 34 pp. Piura, Perú.
- Maino, M., J., Pittier, C., Kobrich. 1993. Programación Multicriterio: Un instrumento para el diseño de sistemas de producción. Serie de Materiales Docentes N° 3. RIMISP, Chile. 97 pp.

Romero, C. y T. Rehman. 1984. Goal Programming and Multiple Criteria Decision-making un Farm Planning: An Expository Analysis. *J. Agri. Econ.* 35:177-190.

Wagner, H. 1970. The ABS's of OR. *Operation Research.* 19 (6):2-10. USA.

LECTURAS COMPLEMENTARIAS

Amador, F., A. Barco y C. Romero. 1985. "Maximización del empleo frente a estabilidad de la mano de obra en un programa de reforma agraria en Andalucía: Una aplicación de la programación compromiso". En: *Asociación Española Económica y Social Agraria. Trabajos elaborados por autores españoles para XIX Cong. Int. de Economistas Agrarios.* Pp. 19-26. Málaga, España.

Cohon, J.L. 1978. *Multiobjective Programming and Planning.* Academica Press. 296 pp. New York.

Kukios, E.G. 1997. *Best Management Practices for the Productive/Protective Rehabilitation of Deforested Sloping Lands. (Final Scientific Report).* Bioresource Technology Unit. National Technical University of Athens. 47 pp.

Mora, J. 1997. *Land Management for sustainable development. Presentación a la Reunión Internacional de Resultados, Proyecto PROLAND (Best Management Practices for the Productive/Protective Rehabilitation of Deforested Sloping Lands).* Guatemala. 32 pp.

Zeleny, M. 1973. "Compromise Programming". In: *Multiple Decision-Making.* (Cochrane, J.L. and Zeleny, M. Eds.). University of South Carolina Press, pp. 262-301.

LÁMINA N° 1. REDUCCIÓN DE LA FERTILIDAD Y EXCESO DE FERTILIZANTE, CALCULADOS PARA UNA PARCELA SIN INTERVENCIÓN

CURRENT PROTECTION

Fertility Rate of loss fertility

$$\text{fer}(t) = 1 - x^t/100 \quad 0 < t < 4$$

$$\text{fer}(t) = 1 - y^t/100 + b \cdot y^t/100 \quad 4 \leq t$$

x =	1.58
y =	1.257
b =	0

0 < t < 4

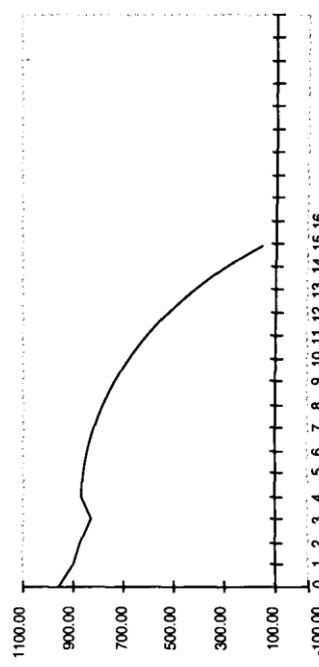
Cost / Production Unit

Cost of practice 0

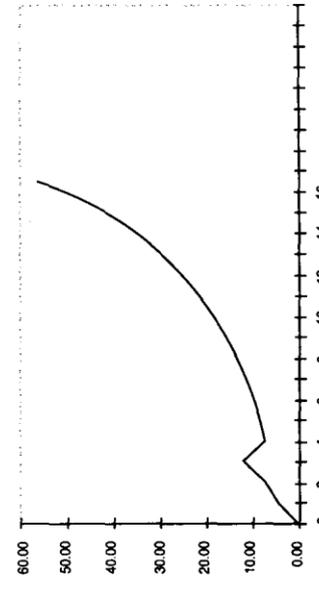
CALCULATION OF EXCESS FERTILIZER

Rm	Standard	Excess
c	0.014	10
dDo	100	0.014
K	1.0E-08	0
		1.0E-08

Year	Production	Price	Income	Fixed costs	Cost depending on production	Cost of practice	Total cost	Net income	Quantity of Fertilizer	Yield predicted by equation	Difference	Nitrogen to be added for reversing the reduction	Yield predicted using excess N by equation	Difference which must be 0
0	10.00	314.50	3145.00	1920.00	250.00	0.00	2170.00	975.00	160.00	9.96	-0.04	0.00	0.00	0.04
1	9.84	314.50	3095.31	1920.00	246.05	0.00	2166.05	929.26	160.00	9.96	0.12	3.90	0.00	0.00
2	9.75	314.50	3066.49	1920.00	243.76	0.00	2163.76	902.73	160.00	9.96	0.21	6.60	0.21	0.00
3	9.61	314.50	3020.95	1920.00	240.14	0.00	2160.14	860.81	160.00	9.96	0.35	10.60	0.36	0.00
4	9.75	314.50	3066.48	1920.00	243.76	0.00	2163.76	902.72	160.00	9.96	0.21	6.60	0.21	0.00
5	9.69	314.50	3046.30	1920.00	242.15	0.00	2162.15	884.15	160.00	9.96	0.27	8.40	0.27	0.00
6	9.61	314.50	3020.94	1920.00	240.14	0.00	2160.14	860.80	160.00	9.96	0.35	10.60	0.36	0.00
7	9.50	314.50	2989.06	1920.00	237.60	0.00	2157.60	831.45	160.00	9.96	0.46	13.10	0.46	0.00
8	9.38	314.50	2948.98	1920.00	234.42	0.00	2154.42	794.56	160.00	9.96	0.58	16.20	0.59	0.00
9	9.22	314.50	2898.60	1920.00	230.41	0.00	2150.41	748.19	160.00	9.96	0.74	19.70	0.75	0.00
10	9.02	314.50	2835.28	1920.00	225.38	0.00	2145.38	689.90	160.00	9.96	0.94	23.80	0.95	0.01
11	8.76	314.50	2755.62	1920.00	219.05	0.00	2139.05	616.63	160.00	9.96	1.20	28.40	1.20	0.00
12	8.44	314.50	2655.62	1920.00	211.10	0.00	2131.10	524.52	160.00	9.96	1.52	33.80	1.52	0.01
13	8.04	314.50	2529.85	1920.00	201.10	0.00	2121.10	408.75	160.00	9.96	1.92	39.80	1.92	0.00
14	7.54	314.50	2371.76	1920.00	188.53	0.00	2108.53	263.23	160.00	9.96	2.42	46.80	2.42	0.01
15	6.91	314.50	2173.04	1920.00	172.74	0.00	2092.74	80.30	160.00	9.96	3.05	54.70	3.05	0.00
16	6.12	314.50	1920.00	1920.00	172.74	0.00	2092.74	80.30	160.00	9.96	3.05	54.70	3.05	0.00



Serie 1



Serie 1

LÁMINA N° 2. REMOCIÓN DE NITRATOS DE AGUA Y PÉRDIDA DE SUELO CALCULADOS PARA UNA PARCELA SIN INTERVENCIÓN

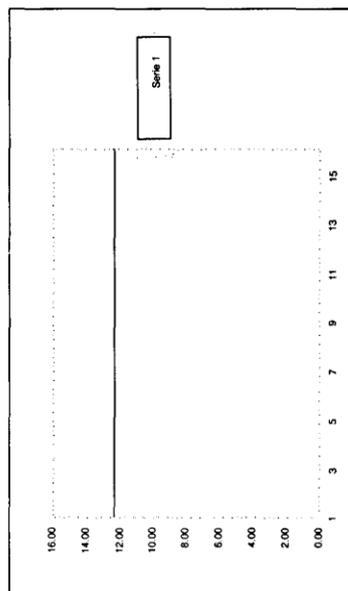
NITROGEN LEACHING

$Pi = (L * W * Ap) / (P * A)$

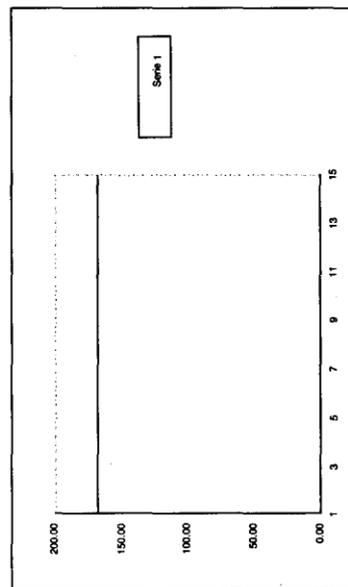
- L 0.016 Nitrogen [Kg/m²]
- D 0.2 Denitrification Rate
- W 10000 Volume of water treated [m³/yr] = number of Citizens * 200 lt/day
- Ap 4 Average precipitation surplus [m]
- P 10000 area of river cathments [m²]
- A Kg NO3 to be treated

Calcula **sing U.S.L.E.**
 $A = R * K(L * S) * P * C$

- Inputs
- R 100
- K 22.1
- L*S 0.78313
- C 0.1
- P 1
- A Soil Loss [tn/ha/yr]



Fuente: ventana activa de la herramienta diseñada.



- Pi 14.14
- 14.14
- 14.14
- 14.14
- 14.14
- 14.14
- 14.14
- 14.14
- 14.14
- 14.14
- 14.14
- 14.14
- 14.14
- 14.14
- 14.14

**LÁMINA N° 3. FUNCIÓN OBJETIVO CALCULADA PARA TODAS
LAS PARCELAS EVALUADAS EN EL PROYECTO**

OBJECTIVE FUNCTION

Year	Current Situation	Protection 1	Protection 2	Protection 3	Protection 4
0	196.95	187.04	133.91	121.83	89.09
1	184.54	177.24	124.11	112.75	80.58
2	177.23	174.63	121.50	111.21	79.72
3	165.75	171.39	118.26	109.42	78.81
4	177.23	167.32	121.46	111.22	83.59
5	172.13	162.23	119.92	110.37	83.04
6	165.75	155.84	118.20	109.44	82.41
7	157.78	147.88	116.26	108.46	81.74
8	147.79	137.88	114.08	107.39	81.00
9	135.32	125.41	111.64	106.21	80.20
10	119.72	109.82	108.90	104.98	79.34
11	100.25	90.35	105.86	103.63	78.37
12	75.88	65.97	102.43	102.16	77.31
13	45.43	35.53	98.61	100.61	76.15
14	7.30	-2.60	94.32	98.93	74.90
15	-40.40	-50.31	89.55	97.09	73.50

