



**PROGRAMACIÓN LINEAL
PARA LA ELABORACIÓN
DE ESCENARIOS ÓPTIMOS
DE USO DE LA TIERRA**

**UN MÉTODO PARA EL
ORDENAMIENTO
TERRITORIAL BASADO EN LA
EVALUACIÓN DE TIERRA
CON ESTUDIOS DE CASO DE
BRASIL Y CHILE**



**PROYECTO REGIONAL "INFORMACIÓN SOBRE TIERRAS Y AGUAS PARA UN DESARROLLO
AGRÍCOLA SOSTENIBLE"**
(Proyecto GCP/RLA/126/JPN)

Santiago, Chile, enero 2001



**PROGRAMACIÓN LINEAL
PARA LA ELABORACIÓN
DE ESCENARIOS
ÓPTIMOS DE USO DE LA
TIERRA**

**UN MÉTODO PARA EL
ORDENAMIENTO
TERRITORIAL BASADO EN
LA EVALUACIÓN DE TIERRA
CON ESTUDIOS DE CASO DE
BRASIL Y CHILE**

Autores:

**Arthur C.J. Van Leeuwen
Claus Köbrich G.
Mario Maino M.**

La información, las denominaciones y los puntos de vista que aparecen en el presente documento son de la exclusiva responsabilidad de sus autores y no constituyen la expresión de ningún tipo de opinión de parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación o de su Oficina Regional para América Latina y el Caribe con respecto a la situación legal de cualquier país, territorio, ciudad o área o de sus autoridades, ni en lo concerniente a la delimitación de fronteras o límites.

La Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, en nombre del Proyecto "Información sobre Tierras y Aguas para un Desarrollo Agrícola Sostenible", autoriza y estimula la reproducción total o parcial del contenido de esta publicación, a condición de que se mencione la fuente del documento y se envíe a esta Oficina Regional un ejemplar del material reproducido.

PREFACIO

La degradación de las tierras tiene su raíz en factores económicos, sociales y culturales, que se traducen en la sobre-explotación de los recursos y en las prácticas inadecuadas del manejo de los suelos y aguas, que conllevan a la pérdida de la fertilidad del suelo y consecuentemente de su productividad, causando una reducción de los rendimientos de la producción agropecuaria, afectando la calidad de vida de las generaciones actuales y futuras.

La disponibilidad oportuna de información confiable y significativa sobre los potenciales y las limitaciones de los recursos naturales, es un pre-requisito para la planificación y el manejo integrado de los mismos. En particular, la información sobre diversas opciones de los usos de las tierras es de vital importancia para poder planificar un desarrollo silvoagropecuario sostenible y, por consiguiente, lograr la conservación de los recursos naturales.

El Proyecto "Información sobre Tierras y Aguas para un Desarrollo Agrícola Sostenible" (GCP/RLA/126/JPN) de la FAO desarrolla desde enero de 1996 y hasta la fecha, una metodología para la recolección de información sobre los recursos naturales, para posteriormente evaluar sus potenciales y debilidades y simular escenarios óptimos de los usos de la tierra, que finalmente contribuyan en la formulación de planes de desarrollo silvoagropecuario sostenible.

El Proyecto GCP/RLA/126/JPN es financiado por el Gobierno de Japón. Adicionalmente se encuentran vinculados algunos expertos asociados que son auspiciados por el Gobierno de Holanda. El Proyecto trabaja con seis países de América Latina: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay, en los cuales se desarrollan actividades en diferentes "niveles de área de trabajo": Nacional, Sub-Nacional, Municipal y Microcuenca.

El objetivo del Proyecto se orienta principalmente al establecimiento de un Sistema de Información de Tierras y Aguas con apoyo de un SIG (Sistema de Información Geográfica) y de otras herramientas de análisis para proveer más y mejor información. El sistema en cuestión se denomina SIRTPLAN: "*Sistema de Información de Recursos de Tierras para la Planificación*", el cual consiste en una metodología de evaluación de tierras y generación de escenarios de sus usos, que se apoya en una serie de herramientas que permiten almacenar, procesar, analizar y presentar información. Las herramientas que integran el SIRTPLAN son programas destinados a la aplicación de métodos específicos:

- SIG (ArcView) para el manejo de información georreferenciada;
- TeleSAT desarrollado por el Proyecto y destinado al análisis de los cambios de vegetación por medio de imágenes satelitales;
- ALES desarrollado por la FAO para la evaluación de aptitud de las tierras;
- Programación Lineal (SOLVER) para la optimización de escenarios; y
- AHP (Analytic Hierarchy Process) para facilitar los procesos de toma de decisión.

El objetivo del Proyecto no solo es desarrollar una metodología teórica sino también realizar aplicaciones específicas a diferentes niveles con el objeto de validar dicha

metodología en los seis países contrapartes. Por ende, se han llevado a cabo varias actividades de asistencia técnica, y seguramente una de las más importantes y relevantes ha sido la ejecución de las Cartas de Acuerdo entre el Proyecto e instituciones pertenecientes a los seis países mencionados anteriormente.

A fines del año 1998, se dieron por terminadas las primeras Cartas de Acuerdo; producto de ello, a comienzos del año 1999 se comenzaron las segundas Cartas de Acuerdo, algunas de las cuales se suscribieron con las mismas instituciones que participaron en las primeras Cartas, y en otros casos, se firmaron con nuevas instituciones. En este sentido, los criterios claves para la selección de las instituciones participantes en esta segunda etapa fueron:

- Llevar a cabo actividades relacionadas con el tema del desarrollo agrícola y el uso sostenible de tierras;
- Mostrar interés y entusiasmo por las actividades propuestas en la Carta de Acuerdo;
- Disponer de equipos SIG y de personal capacitado;
- Tener la voluntad y motivación para dedicar personal, equipos y tiempo a las actividades de la Carta de Acuerdo.

Las siguientes son las instituciones contrapartes del Proyecto:

Argentina: DGI (Departamento General de Irrigación) de la Provincia de Mendoza, perteneciente a la Secretaría de Gestión Hídrica de dicha Provincia, como ejecutora técnica.

Bolivia: CISTEL (Centro de Investigaciones y de Servicios en Teledetección) de la Universidad Mayor de San Simón de Cochabamba como entidad ejecutora junto con la coordinación política y administrativa de la DGPO (Dirección General de Planificación y Ordenamiento Territorial) del Viceministerio de Planificación Estratégica y Participación Popular.

Brasil: CIRAM (*Centro Integrado de InformaVoes de Recursos Ambientais de Santa Catarina*) perteneciente a EPAGRI (*Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensao Rural de Santa Catarina S.A.*) como ejecutora técnica.

Chile: SAG (Servicio Agrícola y Ganadero) de la V Región, perteneciente al Ministerio de Agricultura como entidad ejecutora.

Paraguay: DIA (Dirección de Investigación Agrícola) como ejecutora técnica, con la participación de la DGP (Dirección General de Planificación), ambas pertenecientes al Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Uruguay: DSA (División de Suelos y Aguas) como ejecutora técnica, perteneciente a la DGRNR (Dirección General de Recursos Naturales Renovables) del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP).

El presente es un documento técnico que trata sobre la herramienta de 'optimización por medio de programación lineal' dentro de la metodología y sistema SIRTPLAN. Las

aplicaciones de esta herramienta específica se realizaron en dos países y que también contó con la participación de una institución contraparte.

Akihide Enoki,
Coordinador del Proyecto
*"Información sobre Tierras y Aguas
para un Desarrollo Agrícola Sostenible"*

Los miembros del Proyecto GCP/RLA/126/JPN desean manifestar su reconocimiento y agradecimiento a todos aquellos que de una u otra forma contribuyeron en la elaboración, análisis y revisión de cada una de las publicaciones.

Sr. Hideo Ago, Asesor Técnico Principal/Coordinador, desde enero de 1996 hasta diciembre de 1997.

Sra. Ruth Ávila, Experta Asociada en Desarrollo Rural Sostenible, desde marzo de 2000 hasta junio de 2001.

Sr. Enrique Castillo, Experto Nacional en Sistemas de Información Geográfica, desde enero de 1997 hasta junio de 2001.

Sr. Akihide Enoki, Asesor Técnico Principal/Coordinador, desde enero de 1998 hasta diciembre de 2000.

Sra. Johanna Gijzen, Experta Asociada en Uso de Tierras y Aguas, desde julio de 1997 hasta noviembre de 1998.

Sr. Paul Janssen, Experto Asociado en Sistemas de Geo-Información, desde junio de 1999 hasta junio de 2001.

Sr. Adriaan Kessler, Experto Asociado en Manejo de Cuencas, desde enero de 1996 hasta diciembre de 1996.

Sr. Horacio Merlet, Experto Nacional en Recursos Tierra/Suelo, desde enero de 1997 hasta junio de 2000.

Sr. Arthur Mutsaers, Experto Asociado en Sistemas de Producción, desde diciembre de 1996 hasta diciembre de 1998.

Sr. Sergio Torres, Experto Asociado en Sistemas de Información Geográfica, desde noviembre de 1996 hasta octubre de 1999.

Sra. Loreto Valencia, Secretaria, desde enero de 1996 hasta enero de 1999.

Sra. Macarena Valencia, Secretaria, desde marzo de 1999 hasta junio de 2001.

Sr. Arturo van Leeuwen, Experto Asociado en Planificación Participativa, Ordenamiento Territorial y Sistemas de Producción, desde septiembre de 1999 hasta junio de 2001.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestra gratitud a las siguientes personas quienes han revisado y mejorado cuidadosamente el manuscrito del actual documento: Paul Janssen, Giorgio Castellaro, Jacques Antoine, Enrique Castillo y Macarena Valencia.

Arthur C.J. van Leeuwen	(FAO)
Claus Köbrich G.	(Universidad de Chile)
Mario Maino M.	(Universidad de Chile)

Indice

PREFACIO	I
AGRADECIMIENTOS	V
INDICE.....	VII
I. INTRODUCCIÓN	1
II. PROGRAMACIÓN LINEAL: TÉCNICA DE OPTIMIZACIÓN	3
2.1 LA TOMA DE DECISIONES CON CRITERIOS MÚLTIPLES	3
2.2 PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA EVALUAR DECISIONES ÓPTIMAS	4
2.3 CONCEPTOS FUNDAMENTALES PARA LA PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA	5
2.4 MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA LA OPTIMIZACIÓN	8
2.5 EJEMPLO DE MODELACIÓN SENCILLA DE PROGRAMACIÓN LINEAL PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL	10
III. UTILIZACIÓN DE PROGRAMACIÓN LINEAL PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL	15
3.1 ORDENAMIENTO TERRITORIAL	15
3.2 PROGRAMACIÓN LINEAL DENTRO DE LA METODOLOGÍA Y EL SISTEMA SIRTPLAN	17
3.3 MODELO BÁSICO DE PROGRAMACIÓN LINEAL PARA LA GENERACIÓN DE ESCENARIOS OPTIMOS DE USO DE LA TIERRA	19
3.3.1 <i>Conceptualización del Modelo de Asignación de Suelo</i>	19
3.3.2 <i>Construcción de un Modelo Inicial de una Unidad de Tierra</i>	21
3.3.3 <i>Análisis del Modelo Inicial y Cálculo del Escenario Óptimo bajo un Enfoque Monocriterio</i>	24
3.3.4 <i>Análisis del Modelo Inicial y Cálculo del Escenario Óptimo bajo un Enfoque Multicriterio</i>	27
3.3.5 <i>Construcción del Modelo Regional</i>	28
3.3.6 <i>Optimización del Modelo Regional</i>	38
3.4 INTERPRETACIÓN Y USO DE LOS RESULTADOS	41
IV. ESTUDIOS DE CASO: APLICACIÓN DE PROGRAMACIÓN LINEAL PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL EN BRASIL Y CHILE.....	43
4.1 INTRODUCCIÓN A LOS CASOS DE ESTUDIO.....	43
4.2 ORDENAMIENTO DE LA MICROCUENCA “ARROIO DO TIGRE”: SANTA CATARINA, BRASIL.....	43
4.2.1 <i>Optimización para el Ordenamiento de la Microcuenca “Arroio do Tigre”: El Contexto</i>	43
4.2.2 <i>Objetivos de la Modelación y Optimización</i>	44
4.2.3 <i>Construcción del Modelo</i>	45
4.2.4 <i>Análisis del Modelo: Calcular Escenarios Óptimos</i>	47
4.2.5 <i>Conclusiones y Lecciones</i>	51
4.3 ESCENARIOS PARA EL USO DE LA TIERRA DE LA COMUNA DE PORTEZUELO: VIII REGIÓN, CHILE	52
4.3.1 <i>Optimización para el Ordenamiento de la Comuna de Portezuelo: El Contexto</i>	52
4.3.2 <i>Objetivos de la Modelación y Optimización</i>	53
4.3.3 <i>Construcción del Modelo</i>	53
4.3.4 <i>Análisis del Modelo: Calcular Escenarios Óptimos</i>	54
4.3.5 <i>Conclusiones y Lecciones</i>	57
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	59

I. Introducción

El ordenamiento territorial, la evaluación de tierra y su utilización, el procesamiento y el análisis de información en los países de América del Sur son temas con los cuales la FAO a través del proyecto "*Información sobre Tierras y Aguas para un Desarrollo Agrícola Sostenible*" (GCP/RLA/126/JPN) brinda asistencia técnica a instituciones nacionales y regionales. El objetivo es desarrollar e implementar una metodología para definir usos de la tierra óptimos y sostenibles, partiendo del desarrollo de un sistema de información sobre los recursos de tierra y por medio de una evaluación de tierra se evalúa el potencial que tenga la tierra para los distintos usos: agrícola, forestal y pastoril (FAO, 1976; FAO, 1984; FAO, 1985). Este proceso está integrado en un sistema computarizado y en una metodología denominada SIRTPLAN (*Sistema de Información del Recurso Tierra para la Planificación*).

Dentro del SIRTPLAN, la base de información inicialmente generada y los análisis son mayormente biofísicos; los cuales proporcionan un conocimiento y una visión consistente sobre los posibles usos de la tierra, sus limitantes y cualidades. Sin embargo, para hacer útil dicha información, acumulada en el sistema computarizado, a los tomadores de decisión, tanto a nivel institucional como a nivel del productor, se deben considerar los aspectos socioeconómicos relacionados con la realidad del uso de la tierra. Por tanto, la realidad de la toma de decisiones será determinada por criterios socioeconómicos, como margen bruto, costos, mercados, organización, asistencia técnica, etc.

La programación lineal se introdujo como herramienta y componente de la metodología SIRTPLAN (véase Sección 3.2) para analizar las combinaciones óptimas de los distintos tipos de uso de la tierra evaluados, teniendo en consideración los diferentes puntos de vista que existen entre tomadores de decisiones sobre uso de la tierra. En estos análisis se enfatizan los aspectos socioeconómicos pertinentes, que serán integrados con los factores biofísicos ya incluidos en los análisis. Con los modelos de programación lineal se desarrollan diferentes opciones óptimas para las combinaciones de usos de la tierra dentro de un proceso de ordenamiento territorial de un área, ya sea un país, una provincia, una comuna, un municipio, o una cuenca hidrográfica. La aplicación de la programación lineal tiene como fin generar escenarios para el uso de la tierra según diferentes objetivos e intereses.

El presente documento trata sobre el método de 'programación lineal' como herramienta para el ordenamiento territorial; es una aplicación precisa dentro del sistema de información SIRTPLAN desarrollado por el Proyecto FAO. Además informa sobre la base teórica y cómo elaborar modelos y realizar análisis por medio de la programación lineal (Capítulos 2 y 3); y a su vez, se presentan los resultados de dos aplicaciones de la herramienta mencionada tanto en Chile como en Brasil (Capítulo 4).

II. Programación Lineal: Técnica de Optimización

2.1 La Toma de Decisiones con Criterios Múltiples

Los procesos de toma de decisiones se han analizado tradicionalmente en base a un paradigma que considera un solo criterio de evaluación; éste funciona de la siguiente forma: primero, se establece el conjunto de soluciones posibles o factibles del problema; luego, fundándose en un cierto criterio (por ejemplo beneficio), se asocia con cada solución o alternativa un valor que indica el grado de deseabilidad de cada solución para el centro de tomadores de decisión, es decir, se establece una ordenación de las soluciones factibles. Finalmente, utilizando técnicas matemáticas más o menos sofisticadas, se procede a buscar entre las soluciones factibles aquella que posee un mayor grado de deseabilidad. Dicha alternativa es la "solución óptima" (Romero, 1993).

Por ejemplo, si el problema de decisión consiste en determinar qué cultivar en un predio, entonces de acuerdo con este paradigma en primer lugar se deben buscar todos los cultivos posibles (considerando las limitaciones de suelo, clima, capital, mano de obra, maquinaria, etc.). Luego, se define un criterio que indicará cuál es el cultivo preferido, por ejemplo, el margen bruto. Una vez que se determina el margen bruto de cada cultivo, será muy fácil ordenar los cultivos de acuerdo con este criterio y, de este modo, será posible seleccionar aquella combinación que tenga el mayor margen bruto; en consecuencia, ésta será la solución óptima.

Esta forma de elegir la mejor solución a un problema determinado posee una gran solidez lógica. No obstante, desde el punto de vista empírico, se presentan serias debilidades que lo desvía de la manera real de cómo se desarrollan los procesos de toma de decisión. Este desencuentro es aún más cierto en el ámbito de las decisiones relacionadas con el ordenamiento territorial y el desarrollo sostenible, en las cuales se hace explícita la consideración de aspectos económicos, ambientales y sociales. Desde esta perspectiva, es difícil que, por ejemplo, al tomar una decisión respecto de la asignación de uso de la tierra, se encuentre una alternativa que genere los mayores ingresos y a la vez sea la que conlleve la menor degradación del suelo. De igual forma los diseñadores de políticas públicas en otros ámbitos pueden querer ordenar las alternativas en función de criterios como crecimiento, equidad o impacto ambiental.

Estos y otros ejemplos ratifican el hecho que los centros de tomadores de decisión *reales* tomen sus decisiones en presencia de objetivos múltiples. En definitiva, los centros decisores cuya racionalidad queda adecuadamente reflejada por el paradigma tradicional son representaciones abstractas, cuyo comportamiento queda considerablemente alejado de los centros decisores de carne y hueso que pueblan el mundo en el que vivimos (Romero, 1993).

Al llegar a este punto es importante mencionar que la imposibilidad de poder incorporar más de un objetivo a la hora de decidir, no constituye la única restricción que tienen los métodos tradicionales de análisis. En efecto, existen otros dos tipos de problemas que estos métodos son incapaces de resolver adecuadamente y que

pueden hacerse evidentes a la hora de decidir sobre problemas reales. Estos son (Garuti y Spencer, 1993):

- i. Problemas cualitativos: No siempre las ventajas y desventajas asociadas con una decisión se pueden convertir en una unidad de medida común, como por ejemplo pesos (\$).
- ii. El problema de los diversos actores: La teoría económica normalmente parte del supuesto que las personas se comportan de forma tal que maximizan su utilidad personal (o beneficio en el sentido más amplio). Sin embargo, este supuesto no puede cumplirse cuando consideramos que en el proceso de planificación seguramente participarán múltiples actores, cada uno de los cuales pueden perseguir objetivos propios que sean conflictivos con los objetivos de los demás. La negociación, el compromiso y otras estrategias políticas a menudo producen decisiones que son aceptables para cada actor individualmente, pero que no son la solución óptima para ninguno de ellos. En estos casos los métodos tradicionales de análisis costo-beneficio y de asignación de recursos no proveen de técnicas explícitas para analizar y sintetizar (de forma científica) las preferencias de los distintos decisores.

Se ha desarrollado el paradigma del análisis multicriterio con el propósito de superar las deficiencias planteadas, mejorando así los procesos reales de decisión. Básicamente, el paradigma de la decisión multicriterio sustenta que los agentes económicos no optimizan sus decisiones en base a un criterio único, sino que por el contrario pretenden buscar un equilibrio o compromiso entre un conjunto de objetivos usualmente en conflicto o bien pretenden satisfacer, en la medida de lo posible, una serie de metas asociadas con dichos objetivos (Romero y Rehman, 1989).

2.2 Programación Matemática para Evaluar Decisiones Óptimas

Las técnicas de optimización y la programación matemática son herramientas importantes para la investigación de operaciones, una disciplina explícitamente dedicada a buscar mayor eficacia y eficiencia en los procesos de toma de decisión (Hendriks y Van Beek, 1991), por ejemplo, los mencionados en la sección anterior. La investigación de operaciones se puede definir como la aplicación del método científico al estudio y a la solución de problemas relacionados con la planificación, administración y operación de sistemas complejos, principalmente en empresas y organizaciones (Maino et al., 1993).

Una característica fundamental de la investigación de operaciones es que se intenta cuantificar al máximo los diferentes aspectos del problema y así construir *un modelo cuantitativo*, matemático. Los motivos más importantes para construir tales modelos son (Hendriks y Van Beek, 1991:3):

- ◆ Es necesario obtener un profundo entendimiento de los procesos y el contexto en que se toman las decisiones; así se obtiene una mayor comprensión del problema, lo que ya puede solucionar parte de éste;
- ◆ Un modelo se puede desarrollar en forma rápida y barata para evaluar decisiones;
- ◆ Un modelo se puede desarrollar para generar alternativas destinadas a solucionar el problema.

Existen cuatro fases que se pueden distinguir en un proceso de elaboración de modelos para apoyar un proceso de toma de decisión (véase Figura 2.1):

1. Análisis de la situación respecto del proceso en el cual se toma la decisión;
2. Construcción de un modelo matemático, que representa al máximo las relaciones reales;
3. Analizar el modelo y calcular los resultados o las alternativas óptimas;
4. Traducción de los resultados de los cálculos por medio del modelo, para ser útiles en el actual proceso de toma de decisión.

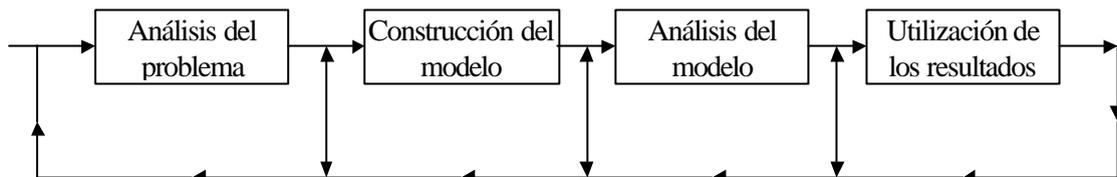


Figura 2.1 Las cuatro fases del proceso de modelación para apoyar la toma de decisiones (Hendriks and van Beek, 1991:3)

Cabe señalar que los modelos nunca son representaciones completas de la realidad. Por lo tanto, los resultados obtenidos a través del análisis y de los cálculos del modelo deben ser comprobados en cuanto a su utilidad dentro del proceso de toma de decisiones. Debe existir una continua interacción entre el modelador y el tomador de decisiones desde la formulación del problema hasta la implementación del resultado o la alternativa.

2.3 Conceptos Fundamentales para la Programación Matemática

Antes de entrar a un análisis más profundo sobre los diferentes métodos de programación matemática y con el fin de tener una buena comprensión de lo que implica trabajar en un espacio multicriterio, es necesario definir algunos conceptos. Para una mejor comprensión de los diferentes conceptos se llevará a cabo un pequeño ejemplo, el que consiste en un agricultor que desea establecer un programa de cultivos para su predio.

Atributo

El primer concepto es el de **atributo**, que es un aspecto o tema relacionado con el problema que tiene un valor para el o los tomadores de decisión. Esos valores son medibles. Se pueden definir atributos de la más diversa índole, tales como superficie predial, uso de mano de obra, capital invertido, riesgo económico, erosión del suelo, pérdida de nitrógeno, consumo de forraje, producción de papas, etc. En el ejemplo que veremos más adelante los atributos considerados son margen bruto, tierra, mano de obra y capital.

Los atributos pueden expresarse por medio de funciones matemáticas que relacionan un conjunto de variables (conocidas como variables de decisión) con el valor que toma el atributo. A modo de ejemplo, el margen bruto (atributo) que genere el plan predial que establezca el agricultor, estará determinado por la superficie dedicada a cada uno de los cultivos que él realice. En este caso el atributo margen bruto puede ser medido

o estimado a partir de una función matemática que relaciona la superficie dedicada a cada cultivo o rubro con el margen bruto de dicha actividad.

Variables de Decisión

Las cuales asociadas con el concepto de atributo darán como resultado las **variables de decisión**. Ellas corresponden a las variables que conforman y definen las soluciones factibles. Las variables de decisión en un modelo de asignación de tierra pueden ser de la más diversa índole, incluyendo tipo de cultivo, especie animal, mano de obra, capital o insumos. Estas variables de decisión también consumen o generan recursos, afectando las restricciones. Como se verá más adelante, frecuentemente se definen variables de decisión que permiten calcular ciertos niveles de logro o bien transferir recursos de una restricción a otra.

Volviendo al ejemplo del plan de cultivos de un productor, las variables de decisión serán las superficies dedicadas al cultivo de arvejas, lentejas, trigo y cebada. Cada una de estas variables de decisión se relacionará con los atributos del problema (margen bruto, tierra, mano de obra y capital) a través de un **coeficiente**. En el caso del trigo, cada coeficiente indicará cuál es la relación que existe entre el trigo y el atributo, en otras palabras, cuánto aporta por ejemplo, una unidad de superficie de trigo al margen bruto predial.

Objetivo

Un tercer concepto, asociado con el atributo es el objetivo. Éste combina un atributo con una dirección deseada de cambio, es decir, los objetivos representan la maximización o la minimización de las funciones matemáticas que representan los atributos; así maximizar el margen bruto, minimizar la erosión o el riesgo son ejemplos de objetivos.

Nivel de Aspiración y Meta

Un cuarto concepto es el **nivel de aspiración**. En este caso, el tomador de decisión es capaz de asignar a un atributo un nivel aceptable de logro. La combinación de un atributo con un nivel de aspiración constituye el concepto de **meta**. Esta meta se diferencia de un objetivo en el cual, ahora el tomador de decisión cuantificó o expresó cuál es el valor aceptable, en lugar de sólo indicar la dirección deseable del cambio. En general, las metas toman la forma de una inecuación, ya que indican el valor máximo o mínimo que debe alcanzar el atributo. De este modo, por ejemplo en lugar de querer maximizar el margen bruto (lo que corresponde a un objetivo), el agricultor desea que éste no sea inferior a \$ 7 millones/año, por lo tanto, el número 7.000.000 corresponderá al nivel de aspiración.

Restricción

El siguiente concepto es el de la **restricción**. Al igual que las metas, son inecuaciones en que se relacionan los atributos con las variables de decisión e indican un valor determinado. El valor (máximo o mínimo) de las restricciones indica una obligación mínima a cumplir o una máxima disponibilidad de recurso y su respectivo aprovechamiento. Todas las restricciones se deben satisfacer para poder tener una solución posible. En otras palabras, no existe solución cuando alguna de las restricciones no se logra respetar, por pequeña que sea la diferencia. En cambio, en el caso de las metas su valor corresponde a un nivel de aspiración que el tomador de decisión desea alcanzar, pudiendo o no lograrse este propósito. Por lo tanto, las metas permiten ciertas violaciones de las inecuaciones, situación que no es posible en el dominio de las restricciones.

Dominación y Óptimo de Pareto

Finalmente, y dentro del paradigma de la decisión multicriterio, es necesario definir el concepto de **óptimo de Pareto**. Al trabajar con un objetivo único, la alternativa óptima es aquella en que se logra el máximo (o mínimo) valor para la función objetivo. Normalmente esta solución es única, todas las demás soluciones tendrán un menor logro para ese objetivo, diciéndose que ellas están **dominadas** por esa solución óptima. Sin embargo, al considerar objetivos múltiples lo óptimo para cada objetivo no necesariamente trae asociado lo óptimo en el otro objetivo. Cuando esto sucede, y generalmente se da el caso, se dice que los objetivos son conflictivos y se encontrará un número indefinido de soluciones. Para reducir este número de soluciones, en primer lugar se procede a desechar aquellas que están dominadas; se dice que una solución es dominada por otra cuando el nivel de logro de todos los objetivos es igual o peor que el nivel de logro de los objetivos de otra solución.

Supongamos que para un problema de asignación de tierra con los objetivos de maximizar el margen bruto y minimizar la pérdida de suelo, existe el conjunto de soluciones presentado en el Cuadro 2.1. La solución A genera un margen bruto de \$ 1.000 y una pérdida de suelo de 10 t, mientras que la solución B genera un margen bruto de \$ 1.200 y una erosión de 8 t. En este caso, la solución B domina a la A, ya que tiene un mayor (mejor) margen bruto y una menor (mejor) pérdida de suelo. De esta forma, al comparar todas las soluciones factibles, es posible encontrar un conjunto de soluciones no dominadas, que son las que definen el óptimo de Pareto. En este caso el conjunto de soluciones eficientes es el formado por las soluciones B y D. La solución C a pesar de tener igual margen bruto que la solución B, produce una mayor pérdida de suelo, y es por lo tanto dominada por ella.

Cuadro 2.1 Soluciones para un problema de asignación de uso de la tierra

Solución	Margen bruto	Pérdida de suelo	Dominación
A	\$ 1000	10 t	Dominada por B y C
B	\$ 1200	8 t	No dominada
C	\$ 1200	9 t	Dominada por B
D	\$ 900	7 t	No dominada
E	\$ 900	8 t	Dominada por B y D

En general, se dice que un conjunto de soluciones es eficiente u óptimo según Pareto cuando está formado por soluciones factibles (esto es, que cumplen las restricciones) y que no están dominadas, por lo que no existe otra solución factible que proporcione una mejora en un atributo sin producir un empeoramiento en al menos uno de los otros atributos.

Es importante destacar que la dominación depende del conjunto de soluciones disponibles. En caso de no ser factible la solución B, las soluciones eficientes serían la C y la D. Y si además apareciera una nueva solución F con margen bruto de \$ 1.000 y erosión de 7 t, todas las demás soluciones pasarán a ser dominadas y, por tanto, no son eficientes.

2.4 Métodos de Programación Matemática para la Optimización

Los métodos considerados relevantes en el ámbito de ordenamiento territorial se clasifican aquí en tres grandes grupos, de acuerdo con el momento en que el tomador de decisión requiere definir su preferencia por determinados valores que alcancen los distintos objetivos. Expresar una preferencia significa que el tomador de decisión debe asignar de alguna forma un valor relativo a cada función objetivo o solución. A modo de ejemplo, puede indicar que el margen bruto es tres veces más importante que la pérdida de suelo, que no le gusta la erosión asociada con una determinada solución o que prefiere la solución B por sobre la C. Esta definición de preferencia se puede dar en alguna de las siguientes tres situaciones (Cohon 1978, Hwang y Masud, 1979 y Duckstein, 1984):

- i. El tomador de decisión expresa sus preferencias antes de generar el conjunto de soluciones eficientes. En otras palabras es necesario asignarle una importancia relativa a cada objetivo. La programación por metas y la programación compromiso emplean procedimientos de este tipo para encontrar la solución eficiente.
- ii. El tomador de decisión expresa en forma progresiva sus preferencias; es decir, se enfrenta a una solución determinada y él debe decidir si le satisface el valor que alcanza alguno de los objetivos o si no le parece apropiado, por lo que debe ser modificada. Con esta nueva información (preferencia) se genera otra solución, la que nuevamente es evaluada por el tomador de decisión. El método STEP y el método del valor de las sustituciones utilizan esta forma iterativa para encontrar una solución.
- iii. El tomador de decisión, una vez enfrentado a un conjunto de soluciones no dominada, debe escoger aquella que le parezca más apropiada. Así por ejemplo, la programación multiobjetivo genera un número limitado de soluciones no dominadas de las cuales el tomador de decisión debe escoger una.

A continuación se describen algunos de estos métodos. Ellos se caracterizan por ser conceptualmente más simples y porque son fáciles de implementar utilizando planillas de cálculo con optimizadores tales como Lindo® o Solver® (véase Capítulo 4).

1. Programación por Meta

La programación por metas constituye quizás uno de los primeros métodos que utilizó la programación matemática para resolver problemas en el campo de la toma de decisiones cuando existían objetivos múltiples.

El primer paso para formular un modelo de este tipo consiste en establecer el conjunto de objetivos que se desea optimizar. Una vez establecido el conjunto de objetivos, se procede a determinar para cada objetivo un nivel de aspiración, es decir, un valor que el tomador de decisión encuentra adecuado para el objetivo. Al hacer esto, se está pasando desde el concepto de objetivo al de metas. En el ejemplo discutido anteriormente, los objetivos son maximizar el margen bruto y minimizar la pérdida de suelo. Transformar éstos en una meta significa que en lugar de indicar una dirección deseada de cambio (maximizar o minimizar) se le asocia un valor, que corresponde a un nivel deseado de margen bruto y erosión.

Como el propósito de este método es acercarse lo más posible a estos niveles de aspiración, se introducen *variables de desviación* que miden la diferencia entre el valor alcanzado y el nivel de aspiración de cada meta.

2. Programación Compromiso

Zeleny (1973) introdujo este método para generar soluciones que logran un compromiso entre los atributos a optimizar. La base de este método es definir la existencia de un punto ideal, entendiendo éste como el punto donde todos los objetivos alcanzan el valor óptimo. Al existir objetivos conflictivos, este óptimo será necesariamente inalcanzable. Luego de especificar este ideal, la programación compromiso define la mejor solución a aquella que se encuentra más próxima al punto ideal. Entonces, la idea central de este método es que es posible “medir” la distancia entre este ideal y cada solución eficiente, y a partir de esta distancia se puede establecer un compromiso conjunto, que no es otra cosa que un subconjunto del conjunto eficiente.

Para estructurar el modelo y generar una solución compromiso, es necesario en primer término definir cuál es la solución ideal. Este ideal se construye fácilmente a partir de los valores óptimos que alcanza cada objetivo. Como hemos visto anteriormente, no existe problema para generar una solución que optimice un objetivo y que genere adicionalmente los valores de logro de los demás objetivos.

3. Programación Multiobjetivo

A diferencia de los métodos antes descritos, las técnicas de Programación Multiobjetivo, también llamadas técnicas de optimización vectorial, buscan por medio de algún procedimiento matemático, reducir el número de soluciones eficientes. En otras palabras, buscan a través de algún procedimiento seleccionar algunas soluciones eficientes, para que el tomador de decisión opte por alguna de ellas. Los procedimientos o algoritmos que emplean para encontrar este subconjunto de soluciones eficientes incluye la programación multiobjetivo propiamente tal, el método NISE (*Non Inferior Set Estimation*, estimación del conjunto no inferior), el método de las Ponderaciones y el Método de las Restricciones. A continuación se describirán los dos últimos métodos, debido a su simpleza y a que pueden ser resueltos con programas de programación lineal (Lindo® y Solver®).

De los distintos enfoques utilizados para generar el conjunto de soluciones eficientes, el Método de las Ponderaciones fue el primero en desarrollarse (Zadeh, 1963). La idea básica de este enfoque consiste en combinar (agregar) todos los objetivos en una función única. Con este propósito, se asocia un peso o coeficiente de ponderación con cada uno de los objetivos, procediéndose luego a agregar todos los objetivos y luego, parametrizando los valores de los coeficientes de ponderación, se consigue generar el conjunto eficiente.

La idea básica del Método de las Restricciones consiste en que, se optimiza solo uno del total de objetivos considerados, siendo el resto incluido dentro del conjunto de restricciones. Con respecto a la selección del objetivo a optimizar, ella es arbitraria y no afecta a la generación de la solución eficiente (Willis y Perlack, 1980). Luego, por medio de variaciones paramétricas de los términos independientes de los objetivos incluidos como restricciones, se va generando el conjunto de soluciones eficientes (Marglin, 1967).

2.5 Ejemplo de Modelación Sencilla de Programación Lineal para el Ordenamiento Territorial

Con el fin de desarrollar y mejorar la comprensión de los conceptos antes expuestos, se desarrollará un ejemplo. La situación es la siguiente: se desea establecer un plan de uso de tierra para un predio de 10 ha, en el cual se pueden cultivar lentejas, arvejas, trigo y cebada. El margen bruto asociado con una hectárea de cada uno de estos cultivos es \$ 200, \$ 220, \$ 120 y \$ 120, respectivamente. Para producir se dispone de 80 días/hombre de mano de obra y \$ 600 de capital. Las necesidades de cada cultivo se observan en el Cuadro 2.2., el cual indica que al cultivar por ejemplo una hectárea de arvejas, se requerirá 1 ha de tierra, 10 días de mano de obra y \$ 40 de capital.

Cuadro 2.2 Necesidades de tierra, mano de obra y capital para cada cultivo incluido en el ejemplo.

Atributo	Variables de decisión			
	Arvejas	Lentejas	Trigo	Cebada
Tierra (ha)	1	1	1	1
Mano de obra (días)	10	10	5	8
Capital (\$)	40	70	80	90

Al relacionar los conceptos antes descritos (Sección 2.3) con la información entregada en este ejemplo encontraremos las siguientes relaciones:

Concepto	Característica en el ejemplo
Función objetivo	Maximizar margen bruto
Atributos	Margen bruto, tierra, mano de obra, capital
Variables de decisión	Arveja, lenteja, trigo, cebada
Restricciones	Disponibilidad de tierra, mano de obra y capital
Valor de la restricción (miembro derecho)	10 ha de tierra, 80 jornales de mano de obra y \$ 600 de capital
Coeficientes	Aportes de los cultivos a la función objetivo
	Cantidad de tierra, mano de obra y capital usados por 1 ha de cada cultivo

Bajo una perspectiva de un solo criterio, el problema consiste en maximizar el margen bruto sujeto a las restricciones de tierra, mano de obra y capital. A partir de la información entregada en el Cuadro 2.2 y los conceptos definidos, se construyó un modelo lineal que permite encontrar la solución óptima a este problema (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3 Modelo de Programación Lineal: Maximizar Margen Bruto.

$$\begin{aligned} & \max 200 \text{ \$/ha} * \text{arveja} + 220 \text{ \$/ha} * \text{lenteja} + 120 \text{ \$/ha} * \text{trigo} + 120 \text{ \$/ha} * \text{cebada} \\ & \text{sujeto a:} \\ & 1 \text{ ha/ha} * \text{arveja} + 1 \text{ ha/ha} * \text{lenteja} + 1 \text{ ha/ha} * \text{trigo} + 1 \text{ ha/ha} * \text{cebada} = 10 \text{ ha} \\ & 10 \text{ d/ha} * \text{arveja} + 10 \text{ d/ha} * \text{lenteja} + 5 \text{ d/ha} * \text{trigo} + 8 \text{ d/ha} * \text{cebada} \leq 80 \text{ d} \\ & 40 \text{ \$/ha} * \text{arveja} + 70 \text{ \$/ha} * \text{lenteja} + 80 \text{ \$/ha} * \text{trigo} + 90 \text{ \$/ha} * \text{cebada} \leq 600 \text{ \$} \end{aligned}$$

arveja = superficie (ha) de arvejas a cultivar;
lenteja = superficie (ha) de lenteja a cultivar;
trigo = superficie (ha) de trigo a cultivar; y
cebada = superficie (ha) de cebada a cultivar.

En este primer modelo se han incluido todas las unidades de medida (\$, d, ha) a fin de resaltar que las unidades de los coeficientes de los modelos lineales deben ser consistentes. Esto es un requisito indispensable al momento de construir el modelo. Como regla general, las variables de decisión deben mantener siempre la misma unidad en todas las restricciones (en este caso hectáreas). En las restricciones los coeficientes deben indicar cuántas unidades de ese atributo requiere una unidad de la variable de decisión. Así, la primera línea del modelo representa la función objetivo, la maximización del margen bruto predial. Los coeficientes, por su parte, indican cuál es el margen bruto por hectárea de cada uno de los cultivos. La segunda línea representa la restricción de uso de tierra e indica que al cultivar una hectárea de cualquier cultivo se "consume" 1 ha de las 10 ha de tierra disponible. Además establece que se debe utilizar toda la superficie disponible (signo "=" en la ecuación). La tercera línea representa la restricción de mano de obra e indica que no se puede utilizar más de 80 días de mano de obra (signo " \leq " en la ecuación). La última restricción del modelo establece las necesidades de capital, indicando que en total no se puede usar más de \$ 600. Cada coeficiente (número en el miembro izquierdo de la restricción) indica cuánto del recurso tierra, de lamano de obra o del capital es utilizado por el cultivo correspondiente.

Al resolver este modelo¹ se encontrará que lo óptimo es cultivar 4,70 ha de lentejas; 1,30 ha de arvejas; 4,00 ha de trigo y nada de cebada. Ello implica un margen bruto predial de \$ 1.707, que utilizará toda la tierra, toda la mano de obra y \$ 599 de capital.

Si en lugar de querer maximizar el margen bruto, el agricultor desea minimizar la pérdida de suelo sin importarle el margen bruto, el mismo problema tiene que ser reformulado, reemplazando la función objetivo original (maximizar el margen bruto) por el nuevo objetivo destinado a minimizar la erosión. Si sabemos que la erosión asociada con los cultivos es 0,2 t por ha de arveja; 0,4 t por ha de lenteja; 0,05 t por ha de trigo y 0,1 t por ha de cebada. El resultado del nuevo modelo se representa en el Cuadro 2.4.

1 En el Capítulo 3 se verá cómo se resuelve un modelo de programación lineal utilizando, planillas de cálculo con un programa de optimización.

Cuadro 2.4 Modelo de Programación Lineal: Minimizar Erosión.

$$\begin{aligned} & \min 0,2 \text{ t/ha} * \text{arveja} + 0,4 \text{ t/ha} * \text{lenteja} + 0,05 \text{ t/ha} * \text{trigo} + 0,1 \text{ t/ha} * \text{cebada} \\ & \text{sujeto a:} \\ & 1 * \text{arveja} + 1 * \text{lenteja} + 1 * \text{trigo} + 1 * \text{cebada} = 10 \\ & 10 * \text{arveja} + 10 * \text{lenteja} + 5 * \text{trigo} + 8 * \text{cebada} \leq 80 \\ & 40 * \text{arveja} + 70 * \text{lenteja} + 80 * \text{trigo} + 90 * \text{cebada} \leq 600 \end{aligned}$$

En este modelo (Cuadro 2.5) nuevamente la primera línea representa la función objetivo. Ahora se trata de minimizar la erosión y por ello los coeficientes indican qué cantidad de pérdida de suelo produce una hectárea de cada cultivo. Las restricciones son las mismas, ya que los cultivos continúan usando la misma cantidad de tierra, de mano de obra y de capital que en el Cuadro 2.4.

Bajo este nuevo escenario, la solución óptima es cultivar 5,00 ha de lentejas y 5,00 ha de trigo, sin cultivar arvejas ni cebada. Ello implica una pérdida de suelo total a nivel del predio de 1,25 t, utilizándose toda la tierra, todo el capital y 65 días de mano de obra.

Sin embargo, es posible que el agricultor desee plantear el problema bajo un escenario de objetivos múltiples (margen bruto y erosión). En otras palabras, desea considerar simultáneamente ambos objetivos. La especificación matemática de este modelo se representa en el Cuadro 2.5.

Cuadro 2.5 Modelo de Programación Lineal: Objetivos Múltiples.

$$\begin{aligned} & \max 200 * \text{arveja} + 220 * \text{lenteja} + 120 * \text{trigo} + 120 * \text{cebada} \\ & \min 0,2 * \text{arveja} + 0,4 * \text{lenteja} + 0,05 * \text{trigo} + 0,1 * \text{cebada} \\ & \text{sujeto a:} \\ & 1 * \text{arveja} + 1 * \text{lenteja} + 1 * \text{trigo} + 1 * \text{cebada} = 10 \\ & 10 * \text{arveja} + 10 * \text{lenteja} + 5 * \text{trigo} + 8 * \text{cebada} \leq 80 \\ & 40 * \text{arveja} + 70 * \text{lenteja} + 80 * \text{trigo} + 90 * \text{cebada} \leq 600 \end{aligned}$$

Más adelante mostraremos algunas formas para optimizar este modelo. Sin embargo, ya sabemos lo siguiente: no es posible conseguir un margen bruto superior a \$ 1.707 ni una erosión inferior a 1,25 t (soluciones extremas). También podemos calcular cuál es la erosión asociada con la solución que cuenta con un máximo margen bruto y cuál es el margen bruto asociado con la solución que presenta una mínima erosión. Ello se logra simplemente completando la función respectiva del modelo del Cuadro 2.5 con la cantidad de hectáreas dedicadas a cada cultivo (Cuadro 2.6).

Cuadro 2.6 Forma de calcular el nivel de logro para una función no incluida en el modelo de optimización.

Solución	Cálculo del nivel de logro de objetivo no considerado
Max margen bruto	$\begin{aligned} \text{erosión} &= 0,2 \text{ t/ha} * \text{arveja} + 0,4 \text{ t/ha} * \text{lenteja} + 0,05 \text{ t/ha} * \text{trigo} + 0,1 \text{ t/ha} * \text{cebada} \\ &= 0,2 \text{ t/ha} * 1,30 \text{ ha} + 0,4 \text{ t/ha} * 4,7 \text{ ha} + 0,05 \text{ t/ha} * 4,0 \text{ ha} + 0,1 \text{ t/ha} * 0,0 \text{ ha} \\ &= 1,667 \text{ t} \end{aligned}$
Min erosión	$\begin{aligned} \text{MB} &= \$ 200 * \text{arveja} + \$ 220 * \text{lenteja} + \$ 120 * \text{trigo} + \$ 120 * \text{cebada} \\ &= \$ 200/\text{ha} * 5,0 \text{ ha} + \$ 220/\text{ha} * 0,0 \text{ ha} + \$ 120/\text{ha} 5,0 \text{ ha} + \$ 120/\text{ha} * 0,0 \text{ ha} \\ &= \$ 1600 \end{aligned}$

Finalmente, al combinar el valor que alcanzan ambos objetivos, se encuentran las soluciones extremas de este ejemplo (Cuadro 2.7).

Cuadro 2.7 Soluciones extremas para el ejemplo.

Solución	Margen bruto	Erosión
Max margen bruto	\$ 1707	1,667 t
Min erosión	\$ 1600	1,250 t

Es importante destacar que las soluciones encontradas de esta forma siempre pertenecerán al conjunto de soluciones no-dominadas, ya que no es posible generar un margen bruto superior a \$ 1.707 ni una erosión inferior a 1,250 t. Además pueden ser graficadas en un espacio bidimensional, en el que cada eje representa el nivel de logro de cada objetivo (Figura 2.2). A partir de este gráfico, se puede intuir que existe un número indeterminado de soluciones no dominadas intermedias, las que forman una recta o curva que une estos dos puntos extremos. En otras palabras es razonable pensar que existen otras soluciones no dominadas, tales como:

- margen bruto igual a \$ 1.600 con una erosión menor a 1,667 t y mayor a 1,25 t²;
- erosión igual a 1,5 t y margen bruto mayor que \$ 1.600 y menor que \$ 1.707².

De ser posible encontrar estas soluciones intermedias, se generará un conjunto de soluciones eficientes, en lugar de únicamente soluciones extremas.

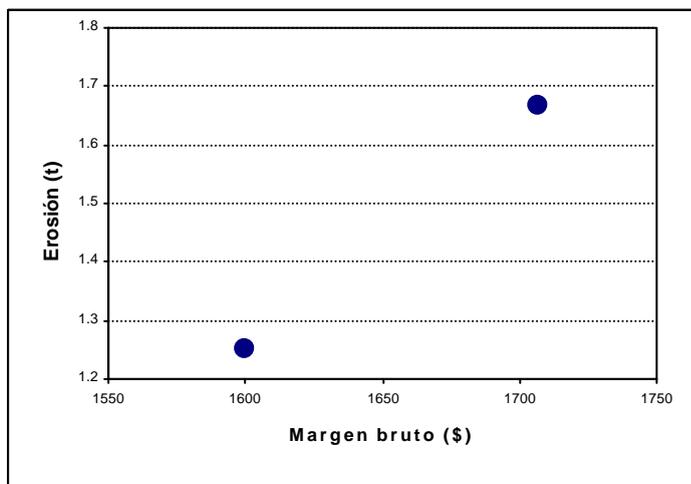


Figura 2.2 Ubicación de las soluciones extremas.

2 Este rango está dado por los valores mínimos y máximos que alcanzan por este objetivo.

Tal como veremos más adelante existen distintos métodos para generar estas soluciones intermedias, de tal forma que se obtiene una curva que une todos los puntos eficientes u óptimos en el sentido Pareto. La curva representa las soluciones no-dominadas. La Figura 2.3 presenta el conjunto completo de soluciones eficientes para el ejemplo que aquí se desarrolla.

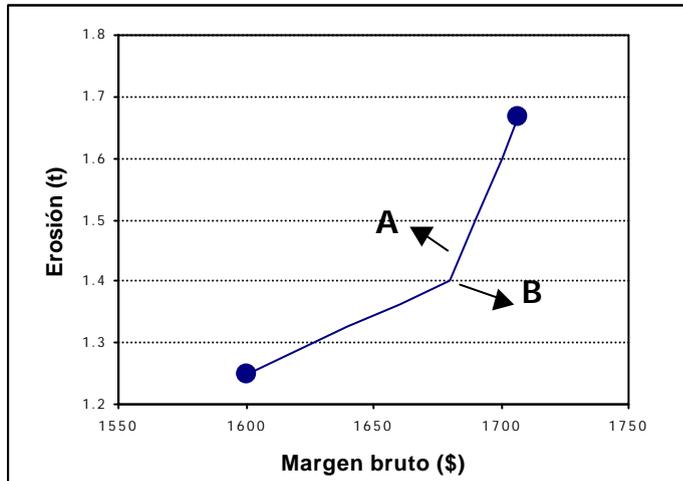


Figura 2.3 Conjunto de soluciones eficientes para el ejemplo.

En esta figura la línea establece además el límite entre las soluciones factibles (la línea en sí más todas las soluciones que se encuentran sobre y a la izquierda de la línea, **A**) y las no-factibles (soluciones que están debajo y a la derecha de la línea, **B**). Las soluciones dominadas se encuentran en el espacio que está por sobre la línea de las soluciones eficientes, no-dominadas.

III. Utilización de Programación Lineal para el Ordenamiento Territorial

3.1 Ordenamiento Territorial

El ordenamiento territorial es un proceso en el cual se busca elaborar un plan o una visión sobre cómo organizar el uso y la conservación de la tierra dentro de un territorio y cómo utilizar los recursos a fin de satisfacer las necesidades y deseos de los diferentes grupos de interés, tanto hoy en día como en el futuro. Es un proceso destinado a ordenar un área determinada, que puede ser una nación, una provincia, un municipio, una comuna, una (micro) cuenca hidrográfica, etc. El ordenamiento se basa en la situación actual, las necesidades y los intereses de la gente, y en el potencial de los recursos disponibles. Uno de los recursos más importantes y destacados es el recurso tierra. Por tanto, tierra en este sentido se refiere no solo al suelo sino también a las formaciones geológicas, la vegetación, la fauna, el clima, la hidrología, y los resultados de la intervención humana (e.g. FAO, 1976).

El proceso de ordenamiento territorial incluye todos los sectores que influyen o dependen del territorio (agricultura, sector ambiental y urbano, servicios públicos, etc.). Se puede distinguir como componente dentro de un proceso de ordenamiento territorial la 'planificación del aprovechamiento de la tierra'. FAO (1994:88), lo cual se define como:

"Evaluación sistemática del potencial de tierras y aguas, modelos alternativos del aprovechamiento de la tierra y otras condiciones físicas, sociales y económicas con el fin de seleccionar y adoptar las opciones de aprovechamiento de la tierra que sean más beneficiosas para los usuarios de tierras sin degradar los recursos o el medio ambiente, junto con la selección de medidas más adecuadas para fomentar esas formas de aprovechamiento de la tierra. La planificación del aprovechamiento de la tierra puede hacerse a nivel internacional, nacional, de distrito (proyecto) o local (aldea). Incluye la participación de usuarios de tierras, planificadores e instancias de decisión, y abarca disposiciones de enseñanza, así como, legales, fiscales y financieras."

Si delimitamos el ordenamiento territorial a las áreas rurales, prácticamente nos limitamos a realizar una planificación del aprovechamiento de la tierra. Por lo tanto, en el presente caso los dos términos son casi sinónimos.

El ordenamiento territorial en las áreas rurales se caracteriza entre otros por estos cuatro aspectos (FAO, 1994):

1. La planificación se hace en bien de la población;
2. La tierra no es igual en todas partes;
3. La tecnología recomendada debe ser apropiada; y
4. Es un tipo de planificación integral, que incluye diferentes sectores y no solo la aptitud del suelo sino también el mercado, las preferencias culturales, la organización, etc.

Los diferentes niveles de ordenamiento territorial estarían, en una situación ideal, coordinados e integrados. Sin embargo, en muchos casos, especialmente cuando el ordenamiento territorial es todavía un concepto novedoso, se comienza el proceso

únicamente abarcando un solo nivel.

Cuando la filosofía y la experiencia hayan sido adoptadas por una mayor cantidad de personas y cuando ya existan más procesos de ordenamiento territorial finalizados en diferentes niveles, en ese momento se puede considerar la integración de los planes y de los procesos en los distintos niveles de planificación.

La Figura 3.1 presenta las diferentes fases que pueda tener un proceso de ordenamiento territorial (o planificación del aprovechamiento de la tierra) y que son las siguientes (FAO, 1994:11/12):

1. *Establecer las metas y determinar las tareas;*
2. *Organizar el trabajo;*
3. *Analizar los problemas;*
4. *Identificar las oportunidades de cambio;*
5. *Evaluar la aptitud de la tierra;*
6. *Evaluar las alternativas: análisis medioambiental, económico y social;*
7. *Elegir la mejor opción;*
8. *Preparar el plan de aprovechamiento de la tierra;*
9. *Realizar el plan; y*
10. *Seguir de cerca y revisar el plan.*

Dentro de este proceso, el presente documento trata sobre el uso de una herramienta o método específico para el ordenamiento territorial: la programación lineal. Este método se aplica sobre todo en el paso 6, "*evaluar las alternativas: análisis medioambiental, económico y social*". Con la construcción y el análisis de modelos de programación lineal se pretende evaluar las diferentes alternativas que se han identificado para el uso de la tierra sobre criterios socioeconómicos.

Los modelos de programación lineal son exigentes en cuanto a la cantidad de datos necesarios. Por lo tanto, este método está integrado en un sistema de información basado en el procedimiento global de ordenamiento territorial. El sistema de información SIRTPLAN (Sistema de Información del Recurso Tierra para la PLANificación) se introducirá a continuación.

3.2 Programación Lineal dentro de la Metodología y el Sistema SIRTPLAN

Para apoyar los procesos de ordenamiento territorial y otros tipos de planificación territorial, la FAO mediante el proyecto GCP/RLA/126/JPN ha elaborado una metodología que se apoya en varios métodos de análisis que cuentan con herramientas computacionales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la Evaluación de Tierras, la Programación Lineal y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, Analytic Hierarchy Process). A este sistema descrito se le denominó SIRTPLAN: *Sistema de Información del Recurso Tierra para la PLANificación del uso del suelo.*

El SIRTPLAN permite la generación de escenarios del uso de la tierra económicamente viable, socialmente aceptable, tecnológicamente implementable y ambientalmente sustentable, para áreas definidas ya sea a nivel municipal, provincial o nacional, en donde se pretenda realizar algún tipo de planificación del uso de la tierra.

El objetivo general del SIRTPLAN es la generación y el manejo de la información de los recursos naturales y del contexto socioeconómico para el desarrollo agrícola sostenible. Este sistema permite la evaluación de condiciones físicas y socioeconómicas actuales y potenciales de un lugar geográfico determinado a fin de elaborar proyecciones (o escenarios) de las alternativas de uso de la tierra. Además, consiste en componentes metodológicos y computacionales destinados a analizar los escenarios óptimos desde diferentes puntos de vista, a fin de lograr una decisión consensuada sobre la decisión final del ordenamiento territorial a implementar.

El esquema metodológico del SIRTPLAN (Figura 3.2) consiste en una secuencia de etapas:

1. Recopilación, selección, generación de información;
2. Definición de Unidades Básicas de Análisis (UBA), que implica la estratificación del espacio físico y de la población, lo que se basa principalmente en los conceptos de la Zonificación Ecológica Económica desarrollados por FAO (1996);
3. Evaluación de Tierras de FAO (1976), que define la aptitud biofísica y socioeconómica para los diferentes usos de la tierra definidos;
4. Generación de escenarios se realiza a través de un proceso de optimización del uso de la tierra, utilizando la programación lineal sobre criterios proporcionados por el planificador y la comunidad; y
5. Presentación de los resultados y su introducción en el proceso de toma de decisión, que pueda ser elaborado utilizando el AHP (Proceso Analítico Jerárquico) (Saaty, 1995).

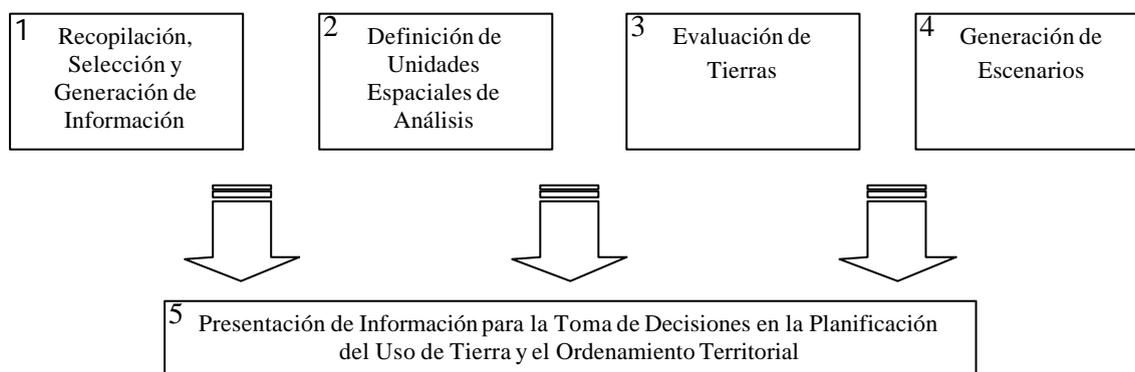


Figura 3.2 Esquema metodológico del SIRTPLAN.

La programación lineal dentro del SIRTPLAN se aplica para generar los escenarios óptimos del uso de la tierra (Etapa 4). Los modelos se basan en la información generada en la Evaluación de Tierras que provee una matriz con el nivel de aptitud de los usos pertinentes evaluados y las unidades de análisis (o unidades de tierra) definidas. Basado en la aptitud específica de cada cultivo en cada unidad se calculan los parámetros, tanto biofísicos y socioeconómicos. El método de programación lineal se incorpora justamente para integrar los aspectos biofísicos con los aspectos socioeconómicos del uso de la tierra.

A continuación, se introduce un modelo básico y sencillo, que enseña los principios fundamentales de la elaboración de modelos de programación lineal en el contexto

específico del ordenamiento territorial y con el objetivo de generar un óptimo escenario del uso de la tierra.

3.3 Modelo Básico de Programación Lineal para la Generación de Escenarios Óptimos de Uso de la Tierra

El modelo básico y la propuesta metodológica consisten en utilizar las ventajas de las aplicaciones computacionales conocidas como planillas de cálculo junto a programas de optimización y la información generada por el SIRTPLAN sobre el uso de la tierra. El objetivo para la modelación es identificar alternativas óptimas para la asignación de tierras en los distintos usos, bajo un enfoque de objetivos múltiples. Esencialmente se pueden identificar cuatro etapas o pasos en este proceso:

- a) Conceptualización del modelo, determinando los objetivos, las restricciones, los atributos y los coeficientes;
- b) Construcción de hojas con información básica: atributos y coeficientes;
- c) Construcción del modelo a optimizar; y
- d) Optimización vía un programa de optimización (por ejemplo Solver®).

3.3.1 Conceptualización del Modelo de Asignación de Suelo

El objetivo global es desarrollar un modelo aplicado de asignación de tierras, poniendo especial énfasis en la construcción del modelo y en la interpretación de los resultados. Para tal fin, se usa una base de datos generada por la metodología SIRTPLAN solo con fines demostrativos. A modo de ejemplo se ha dividido un área en cuatro unidades de tierra de acuerdo con criterios agroecológicos y socioeconómicos. Para cada unidad se determinó la superficie de tierra disponible, la disponibilidad de mano de obra para la agricultura, los tipos de uso de tierra (cultivos), la aptitud de cada cultivo en cada unidad de tierra, y la rotación agronómica recomendada. Además se construyó una ficha técnica de producción para cada tipo de uso de la tierra y según el nivel de aptitud (incluido el margen bruto, la erosión asociada con el cultivo y el uso estacional de mano de obra). El tamaño de cada unidad así como la disponibilidad de mano de obra en cada unidad de tierra se presentan en el Cuadro 3.1. Para estimar la disponibilidad de mano de obra, se estimó que cada persona que trabaja en la agricultura destina 180 días al año para labores directamente relacionadas con los cultivos. Por lo tanto, al multiplicar el número de personas que trabajan en la agricultura en cada unidad (Cuadro 3.1) por 180 se obtuvo la disponibilidad anual de mano de obra, correspondiendo el 25% de ella a la disponibilidad por temporada.

Cuadro 3.1 Superficie, número de hogares/personas dedicadas a actividades agrícolas y mano de obra disponible en cada unidad de tierra.

		Tierra (ha)	Número de familias	Número de personas que trabajan en agricultura	Mano de obra disponible (jornadas)
Unidad de tierra	LC-1	8	2	1	180
	CF-1	16	12	2	360
	CQ-1	22	20	2	360
	CQ-2	54	72	5	900

En el área bajo estudio se puede cultivar, desde el punto de vista agronómico: lenteja mejorada, arveja verde, trigo bajo mínima labranza, cebada, maíz para consumo humano, poroto grano, vid vinífera de cepa fina, cerezo, y olivo. De acuerdo con criterios agroecológicos se determinó si cada cultivo era apto (A1), moderadamente apto (A2), marginalmente apto (A3) o no apto (NA) en cada unidad de tierra (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2 Aptitud de los cultivos en cada unidad de tierra.

		Lenteja	Arveja	Trigo	Cebada	Maíz	Poroto	Viña	Cerezo	Olivo
Unidad de tierra	LC-1	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A3	A3
	CF-1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1
	CQ-1	A2	A2	A2	A2	N	N	A2	A3	A2
	CQ-2	A3	A3	N	N	N	N	N	A3	A3

A1-Apto; A2 – Moderadamente apto; A3 – Marginalmente apto; NA – No apto

A continuación se determinó el margen bruto asociado con cada cultivo en la respectiva unidad de tierra. El margen bruto para un cultivo cambia entre unidades de tierra, fundamentalmente debido a las distintas productividades y aptitudes asociadas con cada unidad de tierra (Cuadro 3.3).

Cuadro 3.3 Margen bruto asociado con los cultivos en cada unidad de tierra (m\$/año/ha).

		Lenteja	Arveja	Trigo	Cebada	Maíz	Poroto	Viña	Cerezo	Olivo
Unidad de tierra	LC-1	88,8	194,8	195,0	118,5	302,3	177,0	1439,0	769,0	450,0
	CF-1	71,0	155,8	156,0	94,8	241,8	141,6	1151,2	615,2	360,0
	CQ-1	35,5	77,9	78,0	47,4	120,9	70,8	575,6	307,6	180,0
	CQ-2	17,8	39,0	39,0	23,7	60,5	35,4	287,8	153,8	90,0

Luego se estimó la erosión asociada con cada cultivo en la unidad de tierra (Cuadro 3.4) y la mano de obra necesaria para alcanzar la producción estimada (Cuadro 3.5).

Cuadro 3.4 Erosión asociada con los cultivos en cada unidad de tierra (t/ha).

		Lenteja	Arveja	Trigo	Cebada	Maíz	Poroto	Viña	Cerezo	Olivo
Unidad de tierra	LC-1	0,35	0,35	0,02	0,02	0,80	0,95	0,25	0,45	0,40
	CF-1	0,35	0,35	0,02	0,02	0,80	0,95	0,25	0,45	0,40
	CQ-1	2,50	2,50	0,03	0,03	1,50	2,00	1,80	2,20	2,10
	CQ-2	24,00	24,00	0,65	0,65	28,00	32,00	8,00	18,50	12,50

En una primera etapa se procederá a describir el proceso de construcción y de optimización de un modelo para una unidad de tierra en particular. Luego se procederá a ampliar el modelo incorporando otras unidades de tierra, a fin de generar la solución óptima para todo el área bajo estudio.

Cuadro 3.5 Necesidades de mano de obra para los cultivos en cada unidad de tierra según temporada (jornadas hombre/año/ha).

		Lenteja	Arveja	Trigo	Cebada	Maíz	Poroto	Viña	Cerezo	Olivo
Necesidades en otoño										
Unidad de tierra	LC-1	2,66	1,52	4,40	2,00	2,55	2,50	3,00	2,52	17,55
	CF-1	2,80	1,60	4,18	1,90	2,30	2,25	3,00	4,20	29,25
	CQ-1	2,66	1,52	4,18	1,90	1,91	1,88	2,25	2,52	21,94
	CQ-2	2,24	1,20	3,30	1,50	1,91	1,88	1,20	2,52	17,55
Necesidades en invierno										
Unidad de tierra	LC-1	2,66	4,56	1,10	0,50	0,85	7,50	12,00	2,52	17,55
	CF-1	2,80	4,80	1,05	0,48	0,77	6,75	12,00	4,20	29,25
	CQ-1	2,66	4,56	1,05	0,48	0,64	5,63	9,00	2,52	21,94
	CQ-2	2,24	3,60	0,83	0,38	0,64	5,63	4,80	2,52	17,55
Necesidades en primavera										
Unidad de tierra	LC-1	10,64	4,56	4,40	2,00	2,55	7,50	12,00	22,68	1,95
	CF-1	11,20	4,80	4,18	1,90	2,30	6,75	12,00	37,80	3,25
	CQ-1	10,64	4,56	4,18	1,90	1,91	5,63	9,00	22,68	2,44
	CQ-2	8,96	3,60	3,30	1,50	1,91	5,63	4,80	22,68	1,95
Necesidades en verano										
Unidad de tierra	LC-1	10,64	4,56	1,10	0,50	2,55	7,50	3,00	22,68	1,95
	CF-1	11,20	4,80	1,05	0,48	2,30	6,75	3,00	37,80	3,25
	CQ-1	10,64	4,56	1,05	0,48	1,91	5,63	2,25	22,68	2,44
	CQ-2	8,96	3,60	0,83	0,38	1,91	5,63	1,20	22,68	1,95

3.3.2 Construcción de un Modelo Inicial de una Unidad de Tierra

Definición de los objetivos

Como el objetivo para este ejemplo es determinar para cada unidad de tierra la combinación óptima de cultivos, considerando simultáneamente el margen bruto y la

pérdida de suelo asociada con cada cultivo, se definieron dos funciones objetivo: maximización del margen bruto y minimización de la erosión. Para la primera unidad de tierra (LC-1) y, utilizando la información presentada en los Cuadros 3.4 y 3.5 se construyeron las siguientes funciones objetivo:

Max MB	=	88,8 * Le + 194,8 * Ar + 195,0 * Tr + 118,5 * Cb + 302,3 * Ma + 177,0 * Po + 1439,0 * Vi + 769,0 * Cr + 450,0 * Ol
Min erosión	=	0,35 * Le + 0,35 * Ar + 0,02 * Tr + 0,02 * Cb + 0,80 * Ma + 0,95 * Po + 0,25 * Vi + 0,45 * Cr + 0,40 * Ol

Cada cultivo (Le, Ar, Tr, Cb, Ma, Po, Vi y Cr) corresponde a una variable de decisión y su valor representará la cantidad de hectáreas que se deben dedicar a cada uno de los cultivos. Para mantener la simplicidad y facilitar la interpretación de los resultados, se identificó a los cultivos (las variables de decisión) con letras en lugar de X_i . Las correspondencias son las siguientes:

Le = lenteja mejorada (ha)	Ar = arveja verde (ha)	Tr = trigo bajo mínima labranza (ha)
Cb = cebada (ha)	Ma = maíz para consumo humano (ha)	Po = poroto grano (ha)
Vi = vid vinífera de cepa fina (ha)	Cr = cerezo (ha)	Ol = olivo (ha)

Por lo tanto, si 'Le' toma un valor de 3,47, significa que se deben plantar 3,47 ha de lentejas para alcanzar la solución óptima.

La definición de los objetivos de las otras unidades sigue exactamente el mismo patrón. Por lo tanto, enseguida sólo se presentará en extenso la construcción del modelo para la unidad LC-1.

Definición de las restricciones

La primera restricción para la unidad LC-1 relaciona el uso de la tierra con la disponibilidad de tierra. Según ésta, se debe usar toda la tierra; es decir, la suma de las superficies dedicadas a cada cultivo debe ser igual a la tierra disponible (Cuadro 3.1). En términos matemáticos:

Uso de la tierra: $1 * Le + 1 * Ar + 1 * Tr + 1 * Cb + 1 * Ma + 1 * Po + 1 * Vi + 1 * Cr + 1 * Ol = 8 \text{ ha}$

A cada cultivo se le asoció un coeficiente 1, ya que una hectárea de cultivo usa una hectárea del atributo de tierra disponible.

Una segunda restricción incorpora al atributo de flexibilidad del uso de la tierra y corresponde a una superficie máxima dedicada a cultivos permanentes. Su racionalidad radica en que la decisión de plantar árboles implica una pérdida de flexibilidad en el sistema de producción. La restricción se estructuró definiendo que la suma de la superficie dedicada a cultivos permanentes debía ser inferior al 20% de la superficie disponible (en este caso 1,6 ha). Matemáticamente, esto se expresa del siguiente modo:

Flexibilidad:	$1 * Vi + 1 * Cr + 1 * Ol \leq 1,6$
---------------	-------------------------------------

La tercera restricción determina las rotaciones de cultivos recomendadas para la zona en estudio. De acuerdo con éstas, la secuencia es de cereales seguidos de leguminosas. Para mantener esta rotación, es necesario que la superficie de leguminosas sea igual a la de cereales, es decir:

$1 * Le + 1 * Ar + 1 * Po = 1 * Tr + 1 * Cb + 1 * Ma$

Como en la programación lineal todas las variables deben incluirse en el lado izquierdo de la ecuación, es necesario pasar las variables con sus coeficientes desde el miembro derecho al izquierdo. De esta forma la restricción para 'rotación' será:

Rotación:	$1 * Le + 1 * Ar + 1 * Po - 1 * Tr - 1 * Cb - 1 * Ma = 0$
-----------	---

A continuación se especificará un conjunto de restricciones que definen el uso de mano de obra en cada temporada, utilizando para ello los coeficientes presentados en el Cuadro 3.5. Las siguientes restricciones relacionan el uso de la mano de obra con su disponibilidad en cada una de las cuatro estaciones:

Otoño:	$2,66 * Le + 1,52 * Ar + 4,40 * Tr + 2,00 * Cb + 2,55 * Ma + 2,50 * Po + 3,00 * Vi + 2,52 * Cr + 17,55 * Ol \leq 90$ jornales
Invierno:	$2,66 * Le + 4,56 * Ar + 1,10 * Tr + 0,50 * Cb + 0,85 * Ma + 7,50 * Po + 12,00 * Vi + 2,52 * Cr + 17,55 * Ol \leq 90$ jornales
Primavera:	$10,64 * Le + 4,56 * Ar + 4,40 * Tr + 2,00 * Cb + 2,55 * Ma + 7,50 * Po + 12,00 * Vi + 22,68 * Cr + 1,95 * Ol \leq 9$ jornales
Verano:	$10,64 * Le + 4,56 * Ar + 1,10 * Tr + 0,50 * Cb + 2,55 * Ma + 7,50 * Po + 3,00 * Vi + 22,68 * Cr + 1,95 * Ol \leq 90$ jornales

Finalmente y debido a que los campesinos requieren de trigo para consumo familiar, se define que para satisfacer esta necesidad se debería cultivar al menos 0,1 ha de trigo por cada familia que vive en el área. Esto significa que se agregó la siguiente restricción para la unidad LC-1 donde viven dos familias:

Mínimo trigo:	$1 * Tr \geq 0,2$ ha
---------------	----------------------

La Figura 3.3 presenta el modelo para la unidad de tierra LC-1 en una planilla de cálculo para ser optimizada utilizando el programa Solver®. Mayores detalles sobre cómo exactamente se construyen los modelos en hojas de cálculo, favor referirse a Köbrich y Maino (1999).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	LC1		Lenteja	Arveja	Trigo	Cebada	Maiz	Poroto	Yiña	Cerezo	Olivo		Logro		Total
2	SOLUCION		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
3															
4	Margen Bruto		88.80	194.80	195.00	118.50	302.30	177.00	1439.00	769.00	450.00		0		
5	Erosión		0.35	0.35	0.02	0.02	0.80	0.95	0.25	0.45	0.40		0.00		
6															
7	Uso tierra (ha)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.00	=	8.00
8	Flexibilidad								1.00	1.00	1.00		0.00	<=	1.60
9	Rotación		1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00					0.00	=	0.00
10	M/IO Otoño		2.66	1.52	4.40	2.00	2.55	2.50	3.00	2.52	17.55		0.00	<=	45.00
11	M/IO Invierno		2.66	4.56	1.10	0.50	0.85	7.50	12.00	2.52	17.55		0.00	<=	45.00
12	M/IO Primavera		10.64	4.56	4.40	2.00	2.55	7.50	12.00	22.68	1.95		0.00	<=	45.00
13	M/IO Verano		10.64	4.56	1.10	0.50	2.55	7.50	3.00	22.68	1.95		0.00	<=	45.00
14	Mínimo de trigo				1.00								0.00	=>	0.20
15															

Figura 3.3 Modelo lineal para la unidad LC-1 previo a su optimización.

3.3.3 Análisis del Modelo Inicial y Cálculo del Escenario Óptimo bajo un Enfoque Monocriterio

Un programa como Solver®, que está basado en el uso de una hoja de cálculo, no permite optimizar simultáneamente dos objetivos en modelos lineales. Como estos modelos se resolverán utilizando el Método de las Restricciones (véase Sección 2.4); por tanto, es necesario transformar una función objetivo en una restricción. En este caso se transformó el objetivo de minimizar erosión en la siguiente restricción:

$$\text{Erosión: } 0,35 * Le + 0,35 * Ar + 0,02 * Tr + 0,02 * Cb + 0,80 * Ma + 0,95 * Po + 0,25 * Vi + 0,45 * Cr + 0,40 * Ol \leq 8 \text{ t}$$

El valor del miembro derecho (en este caso '8') es absolutamente arbitrario, lo único importante es que sea mayor que la erosión total generada al maximizar el margen bruto, ya que de otra forma actuará efectivamente como una restricción en el modelo. Como en este caso la superficie total es 8 ha y ningún cultivo erosiona más que 1 t/ha, se concluye que es imposible que la erosión total sea mayor a 8 t, utilizándose esta cifra en el miembro derecho de la desigualdad.

El modelo con esta nueva "restricción" fue optimizado para encontrar la combinación de cultivos que genere el máximo margen bruto total (Figura 3.4).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	LC1		Lenteja	Arveja	Trigo	Cebada	Maiz	Poroto	Yiña	Cerezo	Olivo		Logro		Total
2	SOLUCION		0.00	3.20	0.20	0.00	3.00	0.00	1.60	0.00	0.00				
4	Margen Bruto		88.80	194.80	195.00	118.50	302.30	177.00	1439.00	769.00	450.00		3872	>=	0.00
5	Erosión		0.35	0.35	0.02	0.02	0.80	0.95	0.25	0.45	0.40		3.92	<=	8.00
7	Uso tierra (ha)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		8.00	=	8.00
8	Flexibilidad								1.00	1.00	1.00		1.60	<=	1.60
9	Rotación		1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00					0.00	=	0.00
10	M/O Otoño		2.66	1.52	4.40	2.00	2.55	2.50	3.00	2.52	17.55		18.19	<=	45.00
11	M/O Invierno		2.66	4.56	1.10	0.50	0.85	7.50	12.00	2.52	17.55		36.56	<=	45.00
12	M/O Primavera		10.64	4.56	4.40	2.00	2.55	7.50	12.00	22.68	1.95		42.32	<=	45.00
13	M/O Verano		10.64	4.56	1.10	0.50	2.55	7.50	3.00	22.68	1.95		27.26	<=	45.00
14	Mínimo de trigo				1.00								0.20	=>	0.20

Figura 3.4 Solución óptima para la unidad LC-1 al maximizar el margen bruto.

Este modelo fue luego modificado, transformando el objetivo de maximizar el margen bruto en una restricción y la restricción de pérdida de suelo en un objetivo. Así se obtiene un modelo similar de optimización pero desde el punto de vista de la erosión (mínima erosión, el otro objetivo definido). El propósito de ello, entonces, es estimar la mínima pérdida de suelo que se puede producir con estos cultivos en esta unidad de tierra. El modelo transformado fue luego optimizado (Figura 3.5).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	LC1		Lenteja	Arveja	Trigo	Cebada	Maiz	Poroto	Yiña	Cerezo	Olivo		Logro		Total
2	SOLUCION			4.00	4.00										
4	Margen Bruto		88.80	194.80	195.00	118.50	302.30	177.00	1439.00	769.00	450.00		1559	>=	
5	Erosión		0.35	0.35	0.02	0.02	0.80	0.95	0.25	0.45	0.40		1.46	<=	8.000
7	Uso tierra (ha)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		8	=	8.00
8	Flexibilidad								1.00	1.00	1.00			<=	1.60
9	Rotación		1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00					0	=	
10	M/O Otoño		2.66	1.52	4.40	2.00	2.55	2.50	3.00	2.52	17.55		24	<=	45.00
11	M/O Invierno		2.66	4.56	1.10	0.50	0.85	7.50	12.00	2.52	17.55		23	<=	45.00
12	M/O Primavera		10.64	4.56	4.40	2.00	2.55	7.50	12.00	22.68	1.95		36	<=	45.00
13	M/O Verano		10.64	4.56	1.10	0.50	2.55	7.50	3.00	22.68	1.95		22.64	<=	45.00
14	Mínimo de trigo				1.00								4.00	=>	0.20

Figura 3.5 Solución óptima para la unidad LC-1 al minimizar la erosión.

Si el lector optimiza este modelo es muy posible que llegue a una solución óptima que sea distinta, como la que se presenta en la Figura 3.6. En dicha solución³ se observa que se produce igual pérdida de suelo, pero que el margen bruto es menor, debido a que en lugar de cultivar 4,0 ha de arvejas, se siembran 1,51 ha de lenteja. Este reemplazo se debe a que ambos cultivos producen igual erosión, por lo que al optimizar, al programa Solver® "le da lo mismo" cuál de los cultivos utiliza, siempre y cuando se respeten las restricciones. Sin embargo, como el margen bruto de ambos cultivos es sustancialmente diferente, el tomador de decisión siempre preferirá las arvejas por sobre las lentejas. El problema de las soluciones múltiples siempre podrá presentarse cuando existan variables de decisión (en este caso cultivos) que realicen el mismo aporte en la función objetivo hasta la millonésima.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	LC1		Lenteja	Arveja	Trigo	Cebada	Maiz	Poroto	Viña	Cerezo	Olivo		Logro		Total
2	SOLUCION		1.51	2.49	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
4	Margen Bruto		88.80	194.80	195.00	118.50	302.30	177.00	1439.00	769.00	450.00		1400	>=	0.00
5	Erosión		0.35	0.35	0.02	0.02	0.80	0.95	0.25	0.45	0.40		1.46	<=	8.00
7	Usos tierra (ha)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		8.00	=	8.00
8	Flexibilidad								1.00	1.00	1.00		0.00	<=	1.60
9	Rotación		1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00					0.00	=	0.00
10	M/O Otoño		2.66	1.52	4.40	2.00	2.55	2.50	3.00	2.52	17.55		25.40	<=	45.00
11	M/O Invierno		2.66	4.56	1.10	0.50	0.85	7.50	12.00	2.52	17.55		19.78	<=	45.00
12	M/O Primavera		10.64	4.56	4.40	2.00	2.55	7.50	12.00	22.68	1.95		45.00	<=	45.00
13	M/O Verano		10.64	4.56	1.10	0.50	2.55	7.50	3.00	22.68	1.95		31.80	<=	45.00
14	Mínimo de trigo				1.00								4.00	=>	0.20

Figura 3.6 Solución óptima para la unidad LC-1 al minimizar la erosión.

La forma más simple de resolver este problema es modificando precisamente estos coeficientes. En el ejemplo, el tomador de decisión prefiere las arvejas en lugar de las lentejas, debido a que producen un mayor margen bruto e igual erosión. Para lograr que el programa Solver® también "prefiera" las arvejas, se "castiga" a las lentejas, aumentando su erosión con un valor muy pequeño, por ejemplo 0,000001 (lo que equivale a un gramo por hectárea). Así al optimizar, el programa Solver® favorecerá la inclusión de las arvejas ya que producen una menor erosión (¡1 gramo por hectárea!). Análogamente se deberán "castigar" todas las variables de decisión que producen igual erosión pero en un menor margen bruto (en el ejemplo lentejas y cebada). Como el programa Solver® normalmente trabaja con una precisión de seis decimales, los cálculos son exactos.

³ En realidad existe un conjunto de soluciones no dominadas, si se considera únicamente la pérdida de suelo. La solución que presentará el programa Solver® dependerá del punto de partida (solución inicial) que utilice el algoritmo de optimización.

3.3.4 Análisis del Modelo Inicial y Cálculo del Escenario Óptimo bajo un Enfoque Multicriterio

Las dos soluciones extremas generadas por medio del análisis anterior se presentan en el Cuadro 3.6. Las soluciones indican que para disminuir la erosión se deben reemplazar las viñas y el maíz por el trigo en rotación con las arvejas.

Cuadro 3.6 Soluciones extremas para la unidad LC-1.

	Lenteja (ha)	Arveja (ha)	Trigo (ha)	Cebada (ha)	Maíz (ha)	Poroto (ha)	Viña (ha)	Cerezo (ha)	Olivo (ha)	MB (\$)	Erosión (t)
Max MB		3,20	0,20		3,00		1,60			3.872	3,92
Min E		4,00	4,00							1.559	1,46

Como la propuesta metodológica utiliza el método de las restricciones, es necesario definir qué objetivo se empleará como restricción y cuáles serán los valores a usar en el miembro derecho de la restricción. En este caso se utilizará la pérdida de suelo como restricción.

Para generar las soluciones intermedias se dividirá la diferencia entre la cantidad de erosión con el máximo margen bruto (3,92 t) y la mínima erosión posible (1,46 t) en 10 segmentos iguales, es decir, se calculará la diferencia entre las soluciones intermedias ($3,92 - 1,46 = 2,46$), se dividirá esta diferencia por 10 ($2,46/10 = 0,246$) y finalmente se disminuirá sucesivamente el miembro derecho de la restricción de erosión en este valor. De esta forma, el modelo será optimizado varias veces, reduciendo la erosión máxima a 3,920; 3,674; 3,428; 3,182; 2,936; 2,690; 2,444; 2,198; 1,952; 1,706 y finalmente a 1,460. El Cuadro 3.7 y la Figura 3.7 presentan las soluciones eficientes u óptimas generadas de esta forma para la unidad LC-1.

Cuadro 3.7 Soluciones eficientes para la unidad LC-1.

	Lenteja (ha)	Arveja (ha)	Trigo (ha)	Cebada (ha)	Maíz (ha)	Poroto (ha)	Viña (ha)	Cerezo (ha)	Olivo (ha)	MB (\$)	Erosión (t)
Max MB		3,20	0,39		2,81		1,60			3872	3,92
1		3,20	0,52		2,68		1,60			3838	3,67
2		3,20	0,83		2,37		1,60			3804	3,43
3		3,20	1,14		2,06		1,60			3770	3,18
4		3,20	1,46		1,74		1,60			3737	2,94
5		3,20	1,68	0,09	1,43		1,60			3696	2,69
6		3,20	1,75	0,34	1,12		1,60			3644	2,44
7		3,20	1,82	0,58	0,80		1,60			3592	2,20
8		3,20	1,89	0,82	0,49		1,60			3540	1,95
9		3,20	1,96	1,06	0,18		1,60			3487	1,71
Min E		4,00	4,00							1559	1,46

De estos resultados se desprende que para disminuir la pérdida de suelo se produce un reemplazo paulatino de maíz por trigo, en primer lugar, y luego por cebada y trigo, manteniéndose constantes las superficies dedicadas a viñas (generan el máximo margen bruto) y a arvejas (debido a la rotación con cereales). Sólo cuando la erosión es llevada a su mínimo se reemplaza la viña (erosiona 0,25 t/ha) por la rotación trigo/lenteja (erosiona en promedio 0,185 t/ha).

Finalmente, la Figura 3.7 presenta las 10 soluciones no-dominadas. Se observa que al disminuir la erosión, también disminuye el margen bruto. La relación entre el cambio de un objetivo por otro (la pendiente de la curva) se conoce como costo de oportunidad y refleja la pérdida que se debe asumir en un objetivo al mejorar el logro en otro.

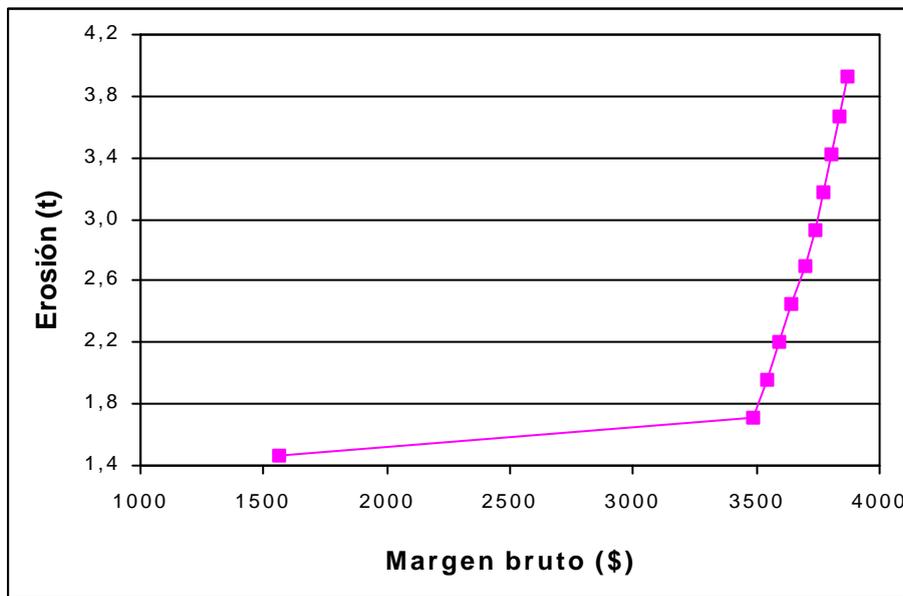


Figura 3.7 Margen bruto y erosión para las soluciones no dominadas de la unidad LC-1.

3.3.5 Construcción del Modelo Regional

Como el propósito es construir un modelo que optimice el uso de la tierra, considerando simultáneamente varias unidades de tierra, es necesario construir en primer lugar los modelos para las otras tres unidades (CF-1, CQ-1 y CQ-2). La estructura básica de estos modelos es la misma que para LC-1, cambiando sólo los coeficientes asociados con los objetivos, las restricciones y el miembro derecho de las desigualdades. Los valores de éstos ya fueron presentados en los Cuadros 3.1 hasta 3.5, por lo que sólo se presentarán posteriormente los modelos y los resultados en el formato del programa SOLVER®.

Modelo y soluciones para la unidad CF-1

Las Figuras 3.8 y 3.9, y el Cuadro 3.8 presentan los resultados para la unidad CF-1. Se observa que el máximo margen bruto es de \$ 6.126 con una erosión de 7,22 t (Figura 3.8). Por otro lado, es posible disminuir la erosión hasta 2,92 t, generando un margen bruto de sólo \$ 2.495. Al disminuir progresivamente el nivel máximo de erosión, se produce un reemplazo progresivo de maíz por trigo y cebada (Cuadro 3.8). En un último paso, se procede a reemplazar las viñas por trigo y arvejas (ésta última debido a la rotación cereal leguminosa), por lo que baja fuertemente el margen bruto y sólo marginalmente la erosión. Este último cambio se aprecia mejor en el gráfico que compara el margen bruto con la erosión (Figura 3.9).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
47															
48	CF1														
49	SOLUCION		Lenteja	Arveja	Trigo	Cebada	Maiz	Poroto	Viña	Cerezo	Olivo		Logro		Total
50			0,00	6,40	1,20	0,00	5,20	0,00	3,20	0,00	0,00				
51	Margen Bruto		71,04	155,84	156,00	94,80	241,84	141,60	1151,20	615,20	360,00		6126	=>	0,00
52	Erosión		0,35	0,35	0,02	0,02	0,80	0,95	0,25	0,45	0,40		7,22	<=	8,00
53															
54	Uso tierra (ha)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		16,00	=	16,00
55	Flexibilidad								1,00	1,00	1,00		3,20	<=	3,20
56	Rotación		1,00	1,00	-1,00	-1,00	-1,00	1,00					0,00	=	0,00
57	M/O Otoño		2,80	1,60	4,18	1,90	2,30	2,25	3,00	4,20	29,25		36,79	<=	90,00
58	M/O Invierno		2,80	4,80	1,05	0,48	0,77	6,75	12,00	4,20	29,25		74,35	<=	90,00
59	M/O Primavera		11,20	4,80	4,18	1,90	2,30	6,75	12,00	37,80	3,25		86,07	<=	90,00
60	M/O Verano		11,20	4,80	1,05	0,48	2,30	6,75	3,00	37,80	3,25		53,51	<=	90,00
61	Mínimo de trigo					1,00							1,20	=>	1,20
62															

Figura 3.8 Solución óptima al maximizar el margen bruto para la unidad CF-1.

Cuadro 3.8 Soluciones eficientes para la unidad CF-1.

	Lenteja (ha)	Arveja (ha)	Trigo (ha)	Cebada (ha)	Maíz (ha)	Poroto (ha)	Viña (ha)	Cerezo (ha)	Olivo (ha)	MB (\$)	Erosión (t)
Max MB		6,40	1,20	0,00	5,20		3,20			6.126	7,22
1		6,40	1,75	0,00	4,65		3,20			6.079	6,79
2		6,40	2,30	0,00	4,10		3,20			6.032	6,36
3		6,40	2,84	0,00	3,56		3,20			5.985	5,93
4		6,40	3,30	0,09	3,01		3,20			5.933	5,50
5		6,40	3,40	0,54	2,46		3,20			5.858	5,07
6		6,40	3,49	0,99	1,91		3,20			5.783	4,64
7		6,40	3,59	1,45	1,37		3,20			5.708	4,21
8		6,40	3,68	1,90	0,82		3,20			5.634	3,78
9		6,40	3,78	2,35	0,27		3,20			5.559	3,35
Min E		8,00	8,00							2.495	2,92

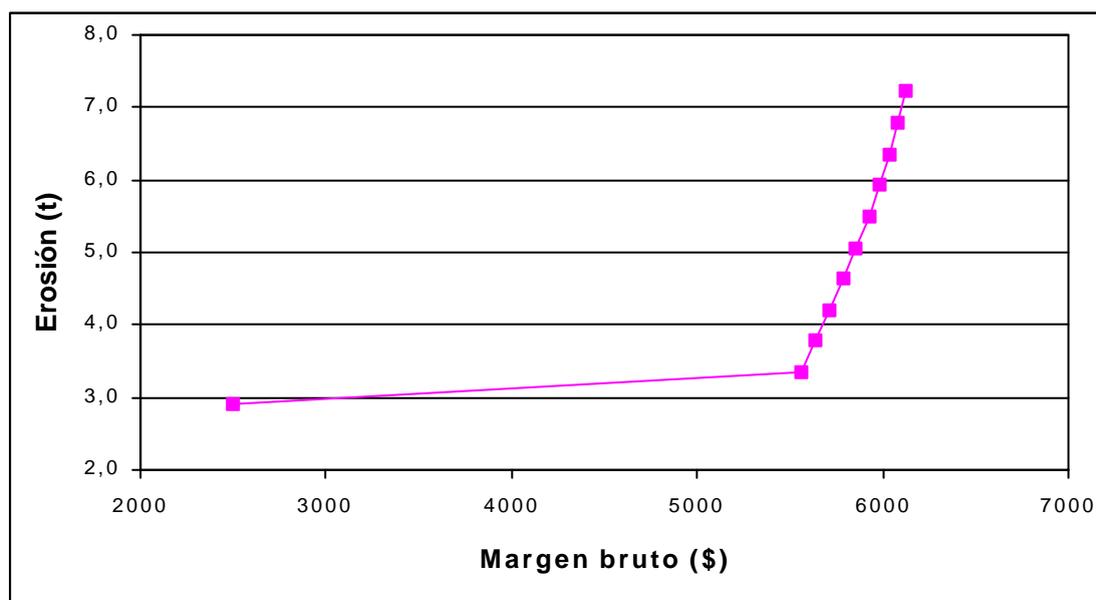


Figura 3.9 Margen bruto y erosión para las soluciones no dominadas de la unidad CF-1.

Modelo y soluciones para la unidad CO-1

Las Figuras 3.10 y 3.11, y el Cuadro 3.9 presentan las soluciones óptimas para la unidad CO-1. Se observa que el máximo margen bruto es de \$ 3.397 con una erosión de 40,61 t (Figura 3.10). Por otro lado, es posible disminuir la erosión hasta 22,28 t, generando un margen bruto de sólo \$ 1.397. Al disminuir progresivamente el nivel máximo de erosión, se produce un reemplazo progresivo de maíz por cebada, de arvejas por porotos y de viña por olivos (Cuadro 3.9). En una última etapa se procede a reemplazar los olivos por trigo y porotos, por lo que baja fuertemente el margen

bruto y sólo en una pequeña cantidad la erosión. En este caso se observa que disminuir la erosión implica una reducción cada vez mayor en el margen bruto, produciéndose una línea bastante más convexa (Figura 3.11).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
95															
96	CQ1														
97	SOLUCION	0,00	9,31	2,00	0,00	7,31	0,00	2,59	0,00	0,80			Logro		Total
98															
99	Margen Bruto	35,52	77,92	78,00	47,40	120,92	70,80	575,60	307,60	180,00			3397	=>	0,00
100	Erosión	2,50	2,50	0,03	0,03	1,50	2,00	1,80	2,20	2,10			40,61	<=	46,00
101															
102	Uso tierra (ha)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			22,00	=	22,00
103	Flexibilidad								1,00	1,00	1,00		3,39	<=	4,40
104	Rotación	1,00	1,00	-1,00	-1,00	-1,00	1,00						0,00	=	0,00
105	M/O Otoño	2,66	1,52	4,18	1,90	1,91	1,88	2,25	2,52	21,94			59,84	<=	90,00
106	M/O Invierno	2,66	4,56	1,05	0,48	0,64	5,63	9,00	2,52	21,94			90,00	<=	90,00
107	M/O Primavera	10,64	4,56	4,18	1,90	1,91	5,63	9,00	22,68	2,44			90,00	<=	90,00
108	M/O Verano	10,64	4,56	1,05	0,48	1,91	5,63	2,25	22,68	2,44			66,27	<=	90,00
109	Mínimo de trigo			1,00									2,00	=>	2,00
110															

Figura 3.10 Solución óptima al maximizar el margen bruto para la unidad CQ-1.

Cuadro 3.9 Soluciones eficientes para la unidad CQ-1.

	Lenteja (ha)	Arveja (ha)	Trigo (ha)	Cebada (ha)	Maíz (ha)	Poroto (ha)	Viña (ha)	Cerezo (ha)	Olivo (ha)	MB (\$)	Erosión (t)
Max MB		9,31	2,00		7,31		2,59		0,80	3397	40,61
1		9,30	2,00	1,24	6,06		2,59		0,81	3309	38,78
2		9,29	2,00	2,49	4,81		2,59		0,82	3220	36,95
3		9,29	2,00	3,73	3,56		2,60		0,83	3131	35,11
4		9,28	2,00	4,97	2,31		2,60		0,84	3042	33,28
5		9,27	2,00	6,22	1,06		2,61		0,85	2953	31,44
6		8,83	2,00	7,31		0,48	2,52		0,86	2830	29,61
7		6,02	2,00	7,59		3,57	1,95		0,88	2519	27,78
8		3,20	2,00	7,86		6,66	1,39		0,90	2208	25,94
9		0,38	2,00	8,13		9,75	0,82		0,92	1898	24,11
Min E			3,17	7,83		11,00				1397	22,28

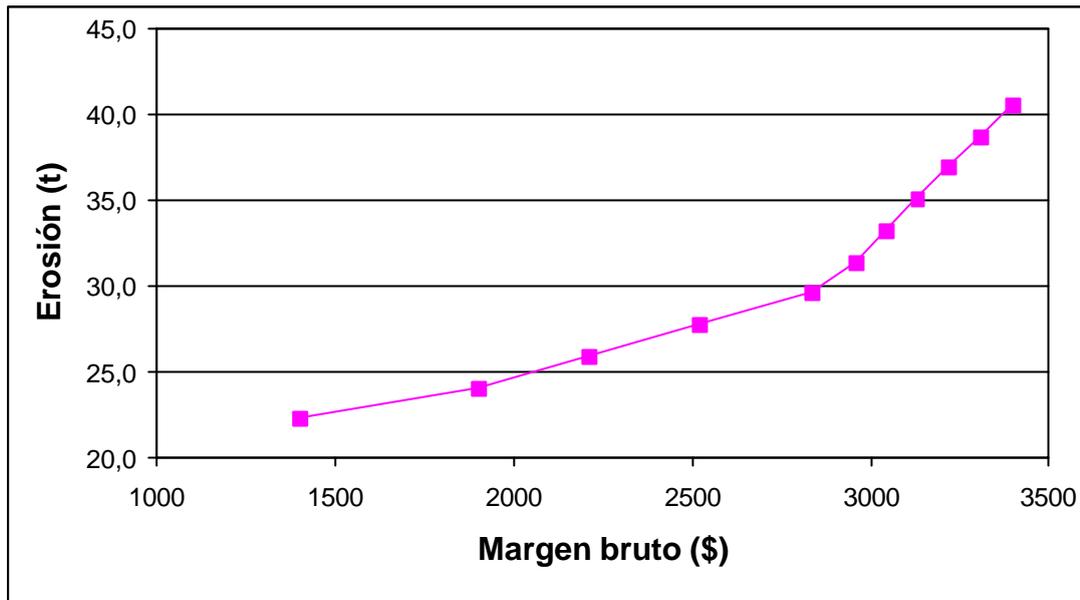


Figura 3.11 Margen bruto y erosión para las soluciones no dominadas de la unidad CQ-1.

Modelo y soluciones para la unidad CO-2

		Lenteja	Arveja	Trigo	Cebada	Maiz	Poroto	Yiña	Cerezo	Olivo	Logro	Total
144	CQ2											
145	SOLUCION	0,00	21,60	7,20	0,00	14,40	0,00	10,80	0,00	0,00		
147	Margen Bruto	17,76	38,96	39,00	23,70	60,46	35,40	287,80	153,80	90,00	5101	4696,00
148	Erosión	24,00	24,00	0,65	0,65	28,00	32,00	8,00	18,50	12,50	1012,680	1100,000
150	Uso tierra (ha)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	54,00	54,00
151	Flexibilidad							1,00	1,00	1,00	10,80	10,80
152	Rotación	1,00	1,00	-1,00	-1,00	-1,00	1,00				0,00	0,00
153	M/O Otoño	2,24	1,20	3,30	1,50	1,91	1,88	1,20	2,52	17,55	90,18	225,00
154	M/O Invierno	2,24	3,60	0,83	0,38	0,64	5,63	4,80	2,52	17,55	144,72	225,00
155	M/O Primavera	8,96	3,60	3,30	1,50	1,91	5,63	4,80	22,68	1,95	180,90	225,00
156	M/O Verano	8,96	3,60	0,83	0,38	1,91	5,63	1,20	22,68	1,95	124,20	225,00
157	Mínimo de trigo			1,00							7,20	7,20

Figura 3.12 Solución óptima al maximizar el margen bruto para la unidad CQ-2.

Las Figuras 3.12 y 3.13, y el Cuadro 3.10 presentan las soluciones óptimas para la unidad CQ-2. Se observa que el máximo margen bruto es de \$ 5.101 con una erosión de 1.012,7 t (Figura 3.12). Sin embargo, es posible disminuir la erosión hasta 618,84 t, generando un margen bruto de \$ 4.792. Al disminuir progresivamente el

nivel máximo de erosión, se produce un reemplazo progresivo de maíz por trigo, permaneciendo constante la superficie cultivada con arvejas y viñas (Cuadro 3.10). El hecho que el cambio afecte únicamente a estos dos cultivos determina que al graficar el margen bruto y la erosión, se observe una recta en lugar de una línea convexa (Figura 3.13).

Cuadro 3.10 Soluciones eficientes para la unidad CQ-2.

	Lenteja (ha)	Arveja (ha)	Trigo (ha)	Cebada (ha)	Maíz (ha)	Poroto (ha)	Viña (ha)	Cerezo (ha)	Olivo (ha)	MB (\$)	Erosión (t)
Max MB		21,60	7,20		14,40		10,80			5101	1012,7
1		21,60	8,64		12,96		10,80			5070	973,3
2		21,60	10,08		11,52		10,80			5039	933,9
3		21,60	11,52		10,08		10,80			5008	894,5
4		21,60	12,96		8,64		10,80			4978	855,1
5		21,60	14,40		7,20		10,80			4947	815,8
6		21,60	15,84		5,76		10,80			4916	776,4
7		21,60	17,28		4,32		10,80			4885	737,0
8		21,60	18,72		2,88		10,80			4854	697,6
9		21,60	20,16		1,44		10,80			4823	658,2
Min E		21,60	21,60		0,00		10,80			4792	618,84

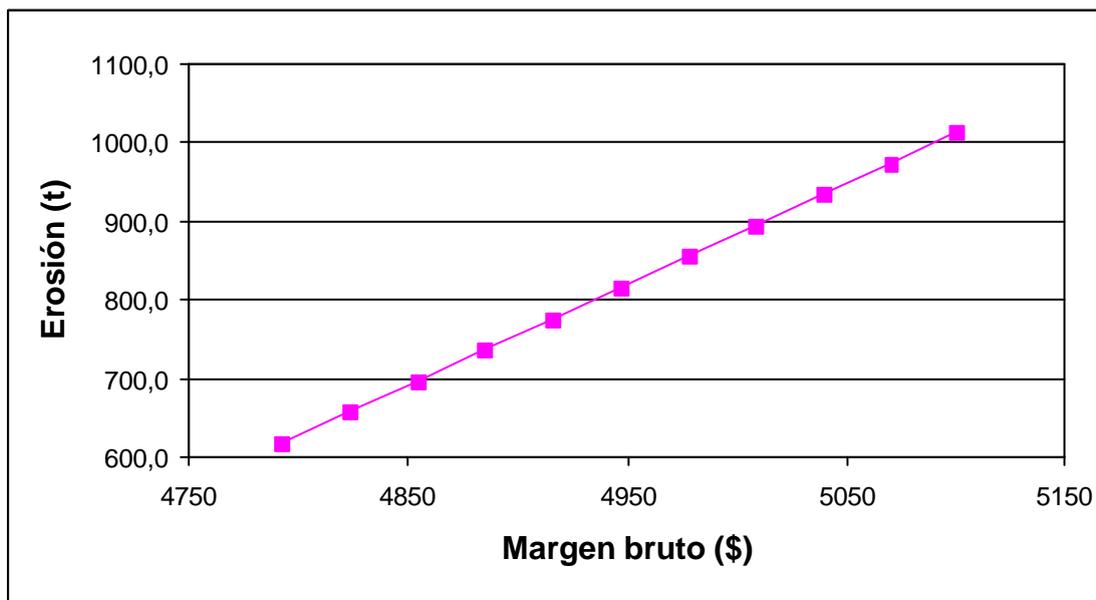


Figura 3.13 Margen bruto y erosión para las soluciones no dominadas de la unidad CQ-2.

Agregación de los modelos para cada unidad

Una vez que se han construido los modelos para cada unidad de tierra, es necesario combinar o agregar dichos modelos para obtener el modelo completo para toda el área en estudio. Al realizar esta agregación se debe tener en cuenta que tanto las restricciones como las variables de decisión son independientes en cada unidad, es decir, el trigo ya no es simplemente trigo, sino que se debe diferenciar en trigo LC-2,

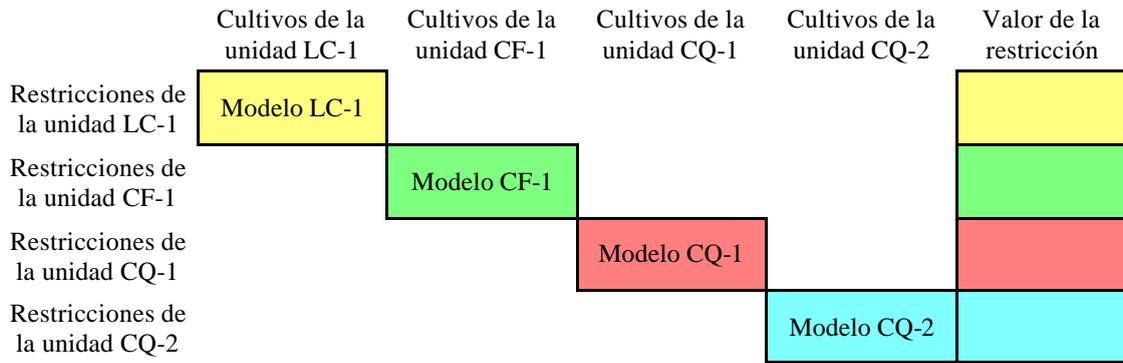


Figura 3.14 Esquema del modelo regional completo.

trigo CF-1, trigo CQ-1 y trigo CQ-2. Esto se debe a que el hecho de cultivar trigo en LC-1 no usa, por ejemplo, tierra en CF-1 ni mano de obra en CQ-2. Lo mismo sucede para todos los demás cultivos y todas las restricciones. Esto es muy simple de realizar, especialmente si ya se han construido los modelos con una planilla de cálculo. La Figura 3.14 presenta en forma esquemática la estructura del modelo regional. En ella cada bloque sombreado corresponde a un conjunto de filas y celdas de la planilla que contiene el modelo para la unidad correspondiente. La última columna presenta la dirección de la restricción y su valor (miembro derecho de la desigualdad).

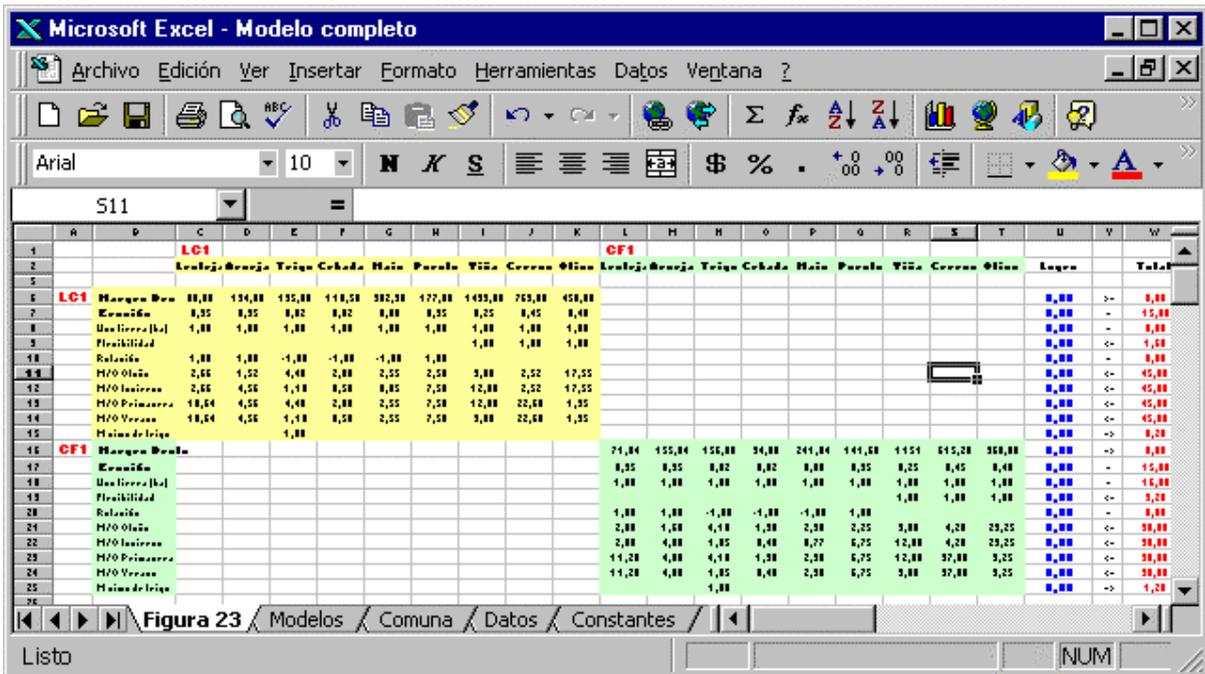


Figura 3.15 Agregación de los modelos para LC-1 y CF-1 en una planilla Excel®.

A modo de ejemplo la Figura 3.15 presenta las restricciones y variables de decisión para las unidades LC-1 y CF-1 en la planilla Excel® (por motivos de espacio se hace imposible presentar el modelo completo).

Una vez agregados los cuatro modelos, sólo falta definir las funciones objetivo ya que hasta ahora cada unidad tenía dos (margen bruto y erosión). Ello es sencillo si se desea maximizar el margen bruto total o minimizar la erosión total, ya que éstas son simplemente la suma de los valores alcanzados en cada unidad.

En la Figura 3.16 se presentan las nuevas funciones objetivo. En esta figura los valores de las restricciones y su logro han sido desplazados a la izquierda para mejorar la visualización del modelo. Se observa que en la línea 5 se construyó la función de margen bruto, que simplemente corresponde a la suma del margen bruto alcanzado en la unidad LC-1, CF-1, CQ-1 y CQ-2. Análogamente la línea 6 representa el objetivo de pérdida de suelo y corresponde a la suma de las cuatro unidades.

	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1					LC1									CF1
2	Logro		Total		Lenteja	Arveja	Trigo	Cebada	Maiz	Poroto	Viña	Cerezo	Olivo	Lenteja
3			Solución		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4														
5	0		Margen bruto total											
6	0,0		Erosión Total											
21														
22	0	>=	0	Margen Bruto	88,8	194,8	195,0	118,5	302,3	177,0	1439,0	769,0	450,0	
23	0,00	=	15,00	Erosión	0,35	0,35	0,02	0,02	0,80	0,95	0,25	0,45	0,40	
24	0,00	=	8,00	Uso tierra (ha)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
25	0,00	<=	1,60	Flexibilidad							1,00	1,00	1,00	
26	0,00	=	0,00	Rotación	1,00	1,00	-1,00	-1,00	-1,00	1,00				
27	0,00	<=	45,00	MPO Otoño	2,66	1,52	4,40	2,00	2,55	2,50	3,00	2,52	17,55	
28	0,00	<=	45,00	MPO Invierno	2,66	4,56	1,10	0,50	0,85	7,50	12,00	2,52	17,55	
29	0,00	<=	45,00	MPO Primavera	10,64	4,56	4,40	2,00	2,55	7,50	12,00	22,68	1,95	
30	0,00	<=	45,00	MPO Verano	10,64	4,56	1,10	0,50	2,55	7,50	3,00	22,68	1,95	
31	0,00	=>	0,20	Mínimo de trigo			1,00							
32	0	=>	0,00	Margen Bruto										71,04
33	0,00	=	15,00	Erosión										0,35
34	0,00	=	16,00	Uso tierra (ha)										1,00

Figura 3.16 Funciones objetivo para el modelo regional.

Al maximizar el margen bruto en el modelo regional, lo óptimo necesariamente coincidirá con los óptimos de cada unidad optimizada individualmente (es decir las soluciones de máximo margen bruto presentadas en los Cuadros 3.7, 3.8, 3.9, y 3.10). Ello debido a que no existen restricciones ni actividades que de alguna forma "amarren" los modelos de las unidades entre sí (por medio de 'restricciones regionales'). Igual cosa sucederá al minimizar la pérdida de suelo. Sin embargo, si se buscan soluciones intermedias, a través de variaciones paramétricas, del máximo de pérdida de suelo si aparecerán nuevas soluciones, ya que el modelo buscará disminuir la erosión en aquella unidad en que la disminución del margen bruto por cada unidad de disminución de pérdida de suelo (intercambio entre objetivos) sea menor. En otras

palabras, en la unidad en que el costo (en términos de un menor margen bruto) de reducir la erosión sea menor.

Construcción de restricciones regionales

A fin de construir un modelo en que la solución para cada unidad esté influida por el nivel que tienen las actividades en las otras unidades, se especificarán las restricciones de tipo regional. Éstas se caracterizarán por incluir variables de decisión de varias unidades. Pueden incluir a modo de ejemplo, superficies máximas o mínimas de un determinado cultivo, disponibilidad total de riego o capital, etc.

La Figura 3.17 presenta en forma esquemática la estructura del modelo regional con restricciones regionales.

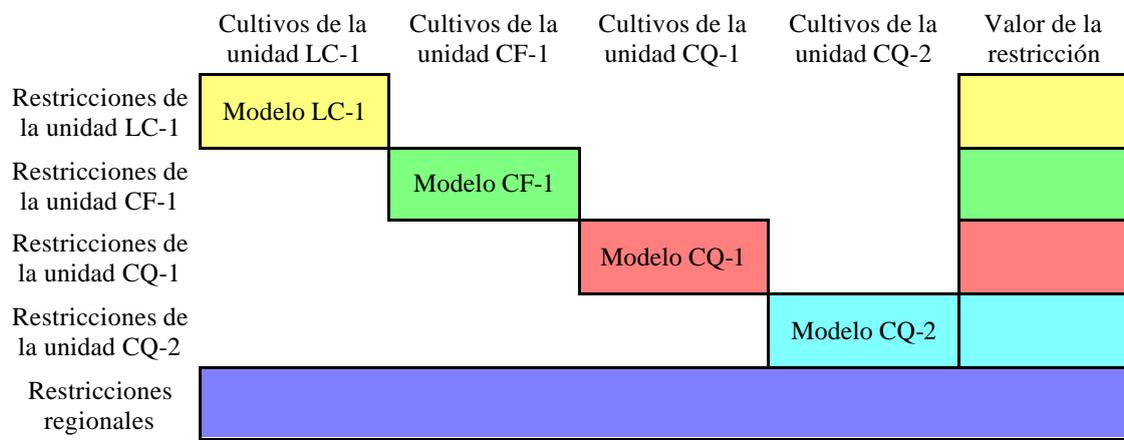


Figura 3.17 Esquema del modelo regional.

Para el caso particular de este ejercicio, se incluirá una serie de restricciones regionales para esquematizar la especificación de este tipo de restricciones de modo de ejemplo. En el supuesto, que se utilizará en el desarrollo de las restricciones, es que existe una determinada disponibilidad de capital (crédito) para invertir en los distintos cultivos, debido a que los agricultores (campesinos) carecen del capital para plantar o cultivar sus tierras. Por otro lado, a través del mecanismo de asignación de créditos, se pueden establecer dentro de ciertos rangos las superficies mínimas y máximas dedicadas a cada cultivo.

Entonces, la primera restricción representa las restricciones al capital o a la inversión. En su formulación se requiere definir primero cuáles son las necesidades de capital de cada cultivo (Cuadro 3.11). De acuerdo con esta tabla las necesidades de capital sólo dependen del cultivo y no de la unidad de tierra considerada.

Cuadro 3.11 Requerimientos de capital para cada cultivo (miles de \$).

Lenteja	Arveja	Trigo	Cebada	Maíz	Poroto	Viña	Cerezo	Olivo
60	120	120	100	180	120	450	250	200

Si consideramos que el monto total de dinero disponible para cultivos es de \$ 15.000.000, entonces la restricción tendrá la siguiente forma:

Capital	: 60 * Le(LC-1) + 120 * Ar(LC-1) + 120 * Tr(LC-1) + 100 * Cb(LC-1) + 180 * Ma(LC-1) + 120 * Po(LC-1) + 450 * Vi(LC-1) + 250 * Cr(LC-1) + 200 * Ol(LC-1)
	+ 60 * Le(CF-1) + 120 * Ar(CF-1) + 120 * Tr(CF-1) + 100 * Cb(CF- 1) + 180 * Ma(CF-1) + 120 * Po(CF-1) + 450 * Vi(CF-1) + 250 * Cr(CF-1) + 200 * Ol(CF-1)
	+ 60 * Le(CQ-1) + 120 * Ar(CQ-1) + 120 * Tr(CQ-1) + 100 * Cb(CQ-1) + 180 * Ma(CQ-1) + 120 * Po(CQ-1) + 450 * Vi(CQ-1) + 250 * Cr(CQ-1) + 200 * Ol(CQ-1)
	+ 60 * Le(CQ-2) + 120 * Ar(CQ-2) + 120 * Tr(CQ-2) + 100 * Cb(CQ-2) + 180 * Ma(CQ-2) + 120 * Po(CQ-2) + 450 * Vi(CQ-2) + 250 * Cr(CQ-2) + 200 * Ol(CQ-2) ≤ 15.000

En esta restricción las variables Le(LC-1), Ar(LC-1), Tr(LC-1), etc., representan cada cultivo (lenteja, arveja, trigo, etc.) en la respectiva unidad de tierra (en este caso LC-1).

Un segundo conjunto de restricciones determina que la superficie dedicada ya sea a viñas, cerezos u olivos debe ser mayor a 2 ha y menor a 10 ha., es decir:

Mínimo viña	: 1 * Vi(LC-1) + 1 * Vi(CF-1) + 1 * Vi(CQ-1) + 1 * Vi(CQ-2) ≥ 2
Máximo viña	: 1 * Vi(LC-1) + 1 * Vi(CF-1) + 1 * Vi(CQ-1) + 1 * Vi(CQ-2) ≤ 10
Mínimo cerezos	: 1 * Cr(LC-1) + 1 * Cr(CF-1) + 1 * Cr(CQ-1) + 1 Cr(CQ-2) ≥ 2
Máximo cerezos	: 1 * Cr(LC-1) + 1 * Cr(CF-1) + 1 * Cr(CQ-1) + 1 Cr(CQ-2) ≤ 10
Mínimo olivos	: 1 * Ol(LC-1) + 1 * Ol(CF-1) + 1 * Ol(CQ-1) + 1 * Ol(CQ-2) ≥ 2
Máximo olivos	: 1 * Ol(LC-1) + 1 * Ol(CF-1) + 1 * Ol(CQ-1) + 1 * Ol(CQ-2) ≤ 10

Finalmente, la Figura 3.18 da una visión general de la estructura del modelo regional en formato de una planilla de cálculo.

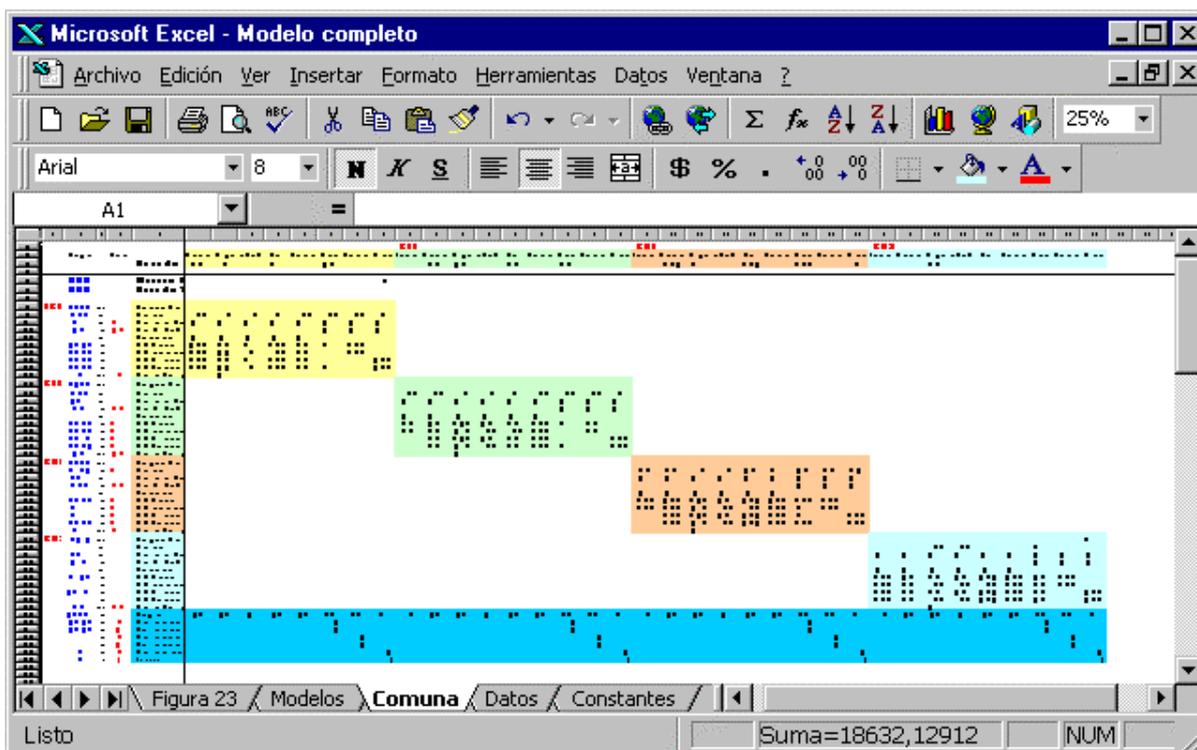


Figura 3.18 Modelo regional en una planilla Excel®.

3.3.6 Optimización del Modelo Regional

La optimización del modelo regional no es lo mismo que la suma de los modelos de cada unidad de tierra. Si consideramos únicamente los modelos para las unidades, sin restricciones regionales, la solución óptima sería la suma de las soluciones para cada unidad (Cuadro 3.12)⁴.

Cuadro 3.12 Soluciones óptimas para la región (modelo sin restricciones regionales).

	Lenteja (ha)	Arveja (ha)	Trigo (ha)	Cebada (ha)	Maíz (ha)	Poroto (ha)	Viña (ha)	Cerezo (ha)	Olivo (ha)	MB (\$)	Erosión(t)
Max MB		40,51	10,60		29,91		18,19		0,80	18.496	1.064,4
Min E		33,60	22,37	22,23		11,00	10,80			10.023	645,5

Sin embargo, debido a que se han incluido restricciones regionales, probablemente se generarán nuevos óptimos, los que necesariamente tendrán menores niveles de logro debido a que las restricciones reducirán los niveles óptimos de los cultivos más rentables o menos erosivos.

El modelo con restricciones regionales fue optimizado, primero maximizando el margen bruto y luego minimizando la erosión para calcular los valores extremos de

4 Como el objetivo de este capítulo no es analizar las distintas opciones, sino que sólo desarrollar las consideraciones metodológicas, los resultados se presentan en forma agregada, es decir, el total de margen bruto, erosión y superficie por cultivo a nivel regional.

cada objetivo (Cuadro 3.13). (Le da igual si comienza con minimizar la erosión y luego maximizar el margen bruto.)

Cuadro 3.13 Soluciones óptimas para la región (modelo con restricciones regionales).

	Lenteja (ha)	Arveja (ha)	Trigo (ha)	Cebada (ha)	Maíz (ha)	Poroto (ha)	Viña (ha)	Cerezo (ha)	Olivo (ha)	MB (\$)	Erosión(t)
Max MB	6,49	37,81	10,60	18,63	15,07		7,39	2,00	2,00	15.344	729,23
Min E	5,61	26,41	23,83	19,17		10,98	10,00	2,00	2,00	10.628	649,93

Finalmente, se utilizará el método de las restricciones para encontrar el conjunto de soluciones eficientes. Para ello se generará en el espacio de las soluciones para pérdida de suelo nueve soluciones intermedias, al igual como se hizo para cada unidad de tierra. El Cuadro 3.14 presenta el valor de las funciones objetivo de las soluciones eficientes para cada uno de los nueve niveles de pérdida de suelo. También presenta la relación de compensación recíproca o "trade-off" entre objetivos, que corresponde al cambio que se produce en un objetivo al cambiar el otro. Así por ejemplo, disminuir la erosión regional de 729,23 t a 721,30 t (es decir reducirla en 7,93 t), implica una disminución del margen bruto regional de \$ 47 mil. Entonces el intercambio entre estos objetivos es de \$ 47.000/7,93 t, lo que corresponde a \$ 5.927 por tonelada. Este valor se interpreta de la siguiente forma: el costo para disminuir la erosión en 1 t es de \$ 5.927, ya que se pierde este monto en margen bruto. Este valor se calcula entre pares de soluciones adyacentes.

Cuadro 3.14 Valor e intercambio entre los objetivos de las soluciones eficientes para la región (modelo con restricciones regionales).

	Margen bruto (miles de \$)	Erosión (t)	Intercambio (\$/t)
Max MB	15.344	729,23	
1	15.297	721,30	5.927
2	15.250	713,37	5.927
3	15.052	705,44	24.968
4	14.838	697,51	26.986
5	14.595	689,58	30.643
6	14.072	681,65	65.952
7	13.362	673,72	89.533
8	12.620	665,79	93.569
9	11.823	657,86	100.504
Min E	10.628	649,93	150.606

Tal como se desprende del Cuadro 3.14, este valor no es constante, sino que aumenta a medida que se reduce la erosión. En otras palabras, al agricultor se le hace cada vez más caro reducir la pérdida de suelo. Esta situación se puede observar aún más claramente al graficar el margen bruto y la erosión (Figura 3.19). El intercambio corresponde a la pendiente de la curva ahí graficada, la que va cambiando a medida que uno se desplaza sobre la curva.

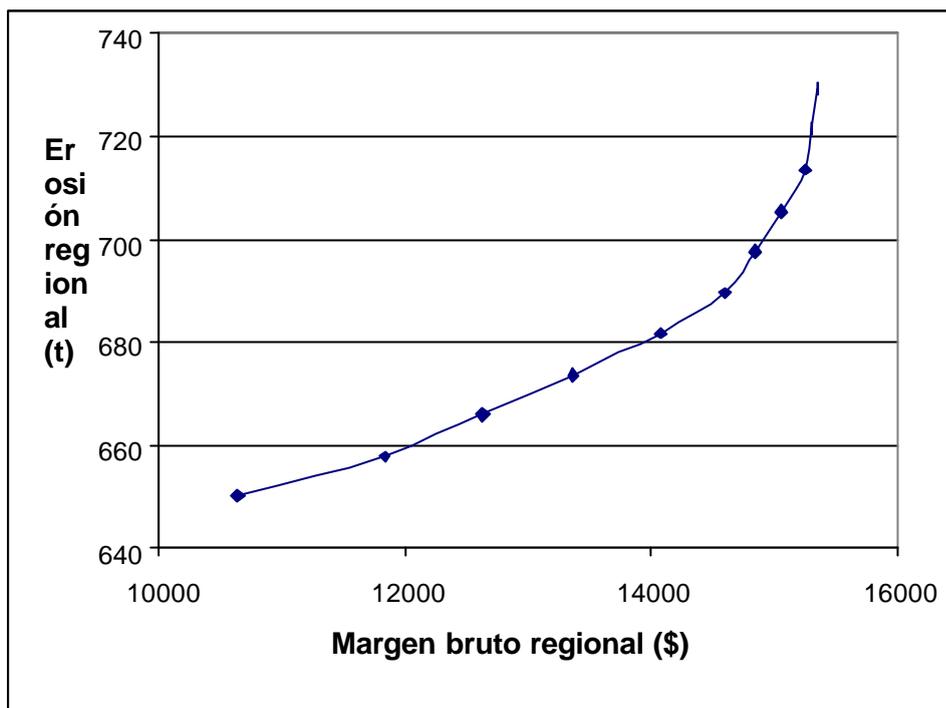


Figura 3.19 Margen bruto y erosión para las soluciones regionales no dominadas.

Finalmente, se presentan las soluciones eficientes en términos de las superficies regionales dedicadas a cada cultivo (Cuadro 3.15). Se observa que exceptuando los cultivos de trigo, cerezo y olivo, los demás presentan una gran dinámica en términos de aumento o disminución. La ausencia de dinámica se debería fundamentalmente a que estos cultivos se asocian a superficies mínimas, por lo que deben ser consideradas aún cuando su rentabilidad y la cantidad de recursos que utilicen no lo indiquen. Esto es especialmente cierto en el caso de las cerezas, las que siempre se cultivan en su nivel mínimo. Ello también implica que una disminución en la superficie mínima de cerezos aumentará el margen bruto regional y/o disminuirá la erosión.

Cuadro 3.15 Soluciones eficientes para la región (modelo con restricciones regionales).

	Lenteja (ha)	Arveja (ha)	Trigo (ha)	Cebada (ha)	Maíz (ha)	Poroto (ha)	Viña (ha)	Cerezo (ha)	Olivo (ha)
Max MB	6,49	37,81	10,60	18,63	15,07		7,39	2,00	2,00
1	6,19	37,75	10,60	21,57	11,77		8,11	2,00	2,00
2	5,89	37,69	10,60	24,51	8,47		8,83	2,00	2,00
3	6,86	36,61	10,60	24,67	8,20		9,07	2,00	2,00
4	7,63	35,77	10,60	24,60	8,20		9,21	2,00	2,00
5	8,02	35,16	12,68	24,38	6,12		9,64	2,00	2,00
6	9,41	33,59	10,60	26,24	6,16		10,00	2,00	2,00
7	9,01	26,72	10,60	26,54	5,86	7,27	10,00	2,00	2,00
8	8,79	23,52	10,60	26,71	5,69	10,69	10,00	2,00	2,00
9	9,37	22,60	10,60	26,40	5,90	10,93	10,00	2,00	2,20
Min E	5,61	26,41	23,83	19,17	0,00	10,98	10,00	2,00	2,00

3.4 Interpretación y Uso de los Resultados

El modelo básico de la programación lineal que se elabora es muy sencillo y, por lo tanto, es una importante abstracción de la problemática a analizar. El modelo es una herramienta destinada a estudiar determinados temas relacionados con el uso de la tierra, que se reflejen en los objetivos del modelo y en las restricciones. Se estudian solamente los aspectos cuantitativos tanto los socioeconómicos (financieros) como los biofísicos.

Los resultados de los cálculos iterativos del modelo (*runs*) son escenarios óptimos del uso de la tierra en el área bajo estudio según el objetivo definido en el modelo. Sin embargo, en la realidad existen muchos objetivos que determinan al mismo tiempo las decisiones respecto del uso de la tierra. Además, hay también muchos aspectos cualitativos que no se pueden incluir en los modelos de programación lineal. Entonces los resultados o los escenarios calculados son orientaciones para el uso de la tierra cuando se busca lograr el objetivo definido. Los escenarios indican qué tipos de usos de la tierra se deben considerar para un cierto objetivo y a la vez el modelo calcula otras condiciones, por ejemplo, la cantidad de mano de obra necesaria o la inversión, pero sólo cuando el modelo incluye restricciones al respecto.

La utilización de los escenarios calculados se debería hacer en un proceso participativo e interactivo con los tomadores de decisión, porque el modelo es muy sencillo y los resultados son también sencillos y concretos. Sin embargo, el modelo es una abstracción de la realidad y, por lo tanto, los resultados son también bastante abstractos, o sea son orientaciones globales sobre un ordenamiento o uso de la tierra óptimo, que incluye solo ciertos aspectos de la problemática del ordenamiento territorial y la planificación del uso de la tierra. Por esta razón es importante en primera instancia para los tomadores de decisión estar activamente involucrados en el proceso de análisis para entender y apropiarse de los resultados. Por otro lado, son los tomadores de decisión quienes deben indicar la validez y la utilidad de los resultados; son ellos quienes deben orientar el análisis para lograr un resultado que refleje lo suficiente la realidad y que incluya todos los aspectos necesarios para la toma de decisión.

En el próximo capítulo se presentan dos ejemplos de aplicaciones del método y el modelo básico desarrollado.

IV. Estudios de Caso: Aplicación de Programación Lineal para el Ordenamiento Territorial en Brasil y Chile

4.1 Introducción a los Casos de Estudio

Los dos estudios de caso a presentar se refieren a la aplicación del método de programación lineal desarrollado en los capítulos anteriores. Cada caso tiene su contexto y objetivo específico. El primer caso, Brasil, es el resultado de los trabajos de EPAGRI, institución enfocada a la extensión agrícola en el Estado de Santa Catarina, con el objetivo de lograr un ordenamiento territorial que posea un enfoque de uso sostenible de la tierra. El segundo caso, Chile, fue desarrollado por el Proyecto FAO (GCP/RLA/126/JPN) dentro del proceso destinado a desarrollar la metodología y el sistema automatizado SIRTPLAN, que se hizo en la comuna (municipio) de Portezuelo, VIII Región, a fin de elaborar escenarios óptimos de uso de la tierra dentro de un contexto de uso sostenible de la tierra y desarrollo sostenible de las familias campesinas.

La técnica utilizada es en ambos casos similares. Se desarrollan y optimizan modelos con el método de restricciones en base a una hoja de cálculo (EXCEL) y al programa integrado SOLVER.

Los casos de estudio son desarrollados y presentados según las siguientes fases (véase también Sección 3.3):

1. Análisis de la situación respecto del proceso en el cual se toma la decisión;
2. Construcción de un modelo matemático, que representa al máximo las relaciones reales;
3. Análisis del modelo y cálculo de los resultados o alternativas óptimas; e
4. Interpretación de los resultados de los cálculos mediante el modelo para ser útiles en el actual proceso de toma de decisión.

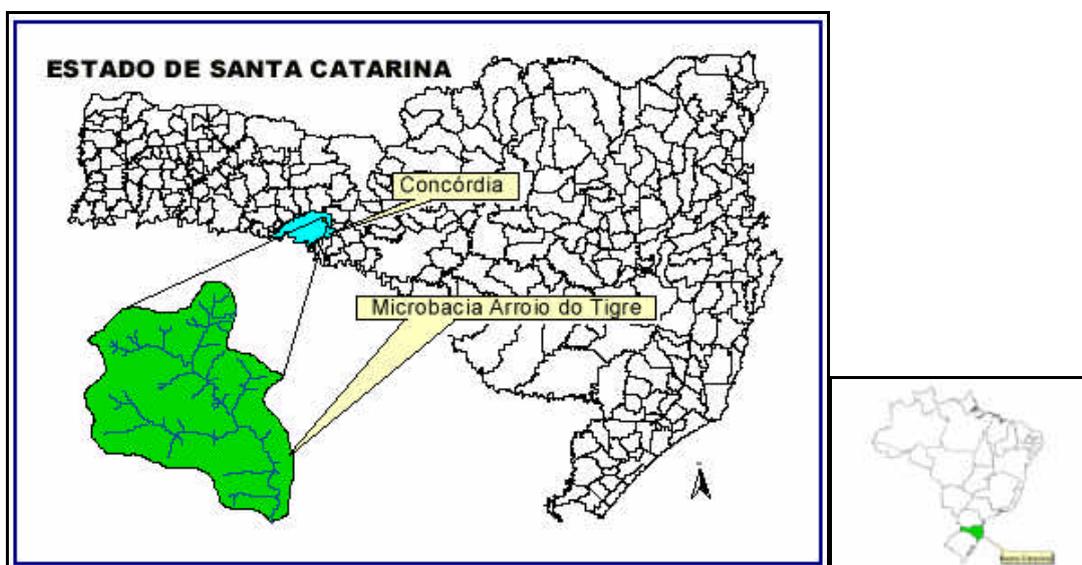
A continuación se presenta el primer caso del ordenamiento territorial realizado en la microcuenca "Arroio do Tigre", en el estado de Santa Catarina de Brasil, y en segundo lugar, el caso de la comuna de Portezuelo, VIII Región de Chile, para generar escenarios óptimos de uso de la tierra.

4.2 Ordenamiento de la Microcuenca "Arroio do Tigre": Santa Catarina, Brasil

4.2.1 Optimización para el Ordenamiento de la Microcuenca "Arroio do Tigre": El Contexto

La *Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina* (EPAGRI) desarrolla sus actividades de asistencia técnica a la producción de los agricultores ubicados en las áreas rurales del estado de Santa Catarina de Brasil. Para realizar sus

actividades cuenta con un equipo profesional en Florianópolis, en la cabecera estatal, y equipos de extensionistas en cada región o municipio (entre otros Concórdia donde se ubica la microcuenca “Arroio do Tigre”).



Mapa 4.1 Localización de la microcuenca “Arroio do Tigre” en el estado de Santa Catarina, Brasil.

El estado de Santa Catarina se ha dividido en cuencas y microcuencas hidrográficas para llevar a cabo el ordenamiento territorial. A nivel de estado, el ordenamiento del territorio se basa en el análisis y el manejo de cuencas y microcuencas. Por lo tanto, EPAGRI tomó como área de trabajo la microcuenca para la cual elaborará un sistema de información y en donde generará un proceso (participativo) para identificar opciones óptimas de uso de la tierra en la microcuenca de “Arroio do Tigre”.

La aplicación del método de Programación Lineal se realiza como parte de la metodología y el sistema SIRTPLAN (véase Capítulo 3). La aplicación en la cuenca “Arroio do Tigre” debe dar como resultado un método sencillo y adecuado para ser usado por los extensionistas, que trabajen con otras instituciones involucradas y directamente con los productores en el resto del estado.

4.2.2 Objetivos de la Modelación y Optimización

Los objetivos de la modelación y la generación de escenarios óptimos se identificaron mediante un proceso que contó con una amplia participación tanto de los agricultores como de las instituciones pertinentes de la microcuenca. Además, se basó en los resultados de dos talleres, uno con los agricultores y otro con las instituciones en las cuales se realizó un Diagnóstico Rural Participativo. En consecuencia, se identificaron los siguientes objetivos para la aplicación de la programación lineal:

1. Generar escenarios de uso de la tierra que sean óptimos en cuanto a:
 - a) Evitar erosión y otros tipos de degradación ambiental (por ejemplo contaminación de agua);
 - b) Obtener mayor ingreso para las familias;

- c) Una combinación de ambas metas.
2. Se debe desarrollar un método específico utilizable por los extensionistas en su trabajo con los agricultores;
3. El método aplicado debe ser una parte integral del SIRTPLAN para asegurar la eficiencia del método en cuanto al manejo de datos.

Para lograr estos objetivos se construyó un modelo de programación lineal en base a una planilla EXCEL utilizando el programa *What's Best* para la optimización.

4.2.3 Construcción del Modelo

Estructura del Modelo

El modelo construido abarca toda la microcuenca de "Arroio do Tigre", y está dividida en cinco unidades básicas de análisis. Para cada unidad básica se construyó un submodelo (véase Sección 3.3.2), que se une a un solo modelo para la microcuenca (véase Sección 3.3.5). La estructura se puede observar en la Figura 3.17 (p.35).

Objetivos del Modelo

El modelo (y cada submodelo) de optimización tiene tres objetivos, que fueron definidos en el diagnóstico participativo rural por los actores:

- ◆ Maximizar el margen bruto del uso de la tierra en la microcuenca;
- ◆ Minimizar la erosión (impacto ambiental) en el uso de la tierra de la microcuenca;
- y
- ◆ Elaborar escenarios de uso óptimo de la tierra para la microcuenca y por propiedad (finca)

VARIABLES DE DECISIÓN

Las variables de decisión del modelo son los diferentes Tipos de Uso de la Tierra (TUT) que están a la disposición del productor y que son técnicamente viables, considerando las condiciones biofísicas de la microcuenca, y por cada unidad básica de análisis. Las variables por unidad de análisis se presentan en Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1 Variable de decisión para el modelo de programación lineal de la microcuenca "Arroio do Tigre".

<i>Tipo de Uso</i>	<i>C3</i>	<i>E4</i>	<i>E5</i>	<i>FV4</i>	<i>FV5</i>
Ajo	✓	✓	✓	✓	✓
Bovino de leche	✓	✓	✓	✓	✓
Cítricos para el consumo	.	✓	✓	✓	✓
Cítricos para la industria	.	✓	✓	✓	✓
Frijol	✓	✓	✓	✓	✓
Maíz convencional	.	.	✓	.	✓
Maíz mínimo	.	✓	✓	✓	✓
Trigo convencional	.	.	✓	.	✓
Gallinas	.	✓	✓	✓	✓
Porcicultura	.	✓	✓	✓	✓
Tabaco	.	.	✓	.	✓
Eucalipto	.	✓	✓	✓	✓

La definición de las actividades a ser optimizadas se realizó a partir de la aptitud definida por el ALES (componente y programa dentro del SIRTPLAN (véase Sección 3.2) para la evaluación de tierras) y de indicaciones establecidas por Thomé et al. (1999).

Restricciones

Las restricciones definidas se refieren a

- la disponibilidad de tierra;
- la mano de obra;
- el capital; y
- el impacto ambiental

La restricción en cuanto a la tierra define el máximo de área disponible para la agricultura, cada unidad básica de análisis tiene su área definida y también se define el total para la microcuenca. El área total de la microcuenca es de 835 ha, después de haber descontado las áreas ocupadas con bosques y población. Junto con él, el máximo de área total a utilizar, también se restringe el máximo de área a ocupar en 'bovina lechera', limitado a un 10% del máximo del área total, el máximo de área a ocupar en 'frutícula' (max. 10% del total), y el máximo de área a ocupar en 'reforestación' (max. 20% del total). Además, se define un área mínima a ocupar en 'maíz' (min. 40% del total).

La restricción para el máximo de mano de obra disponible se calculó en jornadas (300 días/año de 8 horas) para cada estación del año, totalizando 44.100 jornadas para la microcuenca. Además, se incluye la posibilidad de contratar mano de obra por estación hasta un 20% más de la mano de obra existente.

Como restricciones, se introdujeron dos condiciones relativas a la disponibilidad de capital, capital propio y capital externo, en tres niveles de disponibilidad: bajo (mínimo), medio y alto (máximo). La disponibilidad de capital se definió a nivel de la microcuenca.

Una restricción adicional que se considere es la relativa al Índice de Impacto Ambiental (IIA) de los escenarios generados. Este índice está constituido por la sumatoria de las pérdidas de suelos por Erosión (t/año) y la producción de estiércol de porcinos (t/año). La escala del IIA es relativa, variando entre 0 y 1.

Coefficientes

Los coeficientes del modelo se obtienen por medio de estudios específicos, como por ejemplo la evaluación de tierras, los estudios de erosión, los censos e inventarios de EPAGRI. Toda la información se maneja dentro del sistema de información SIRTPLAN.

Operación y Georeferencia del Modelo dentro del SIRTPLAN

El modelo construido, o más bien se trata de seis modelos (con y sin inversión, y cada uno con tres niveles de capital disponible), está integrado en el sistema de información automatizado SIRTPLAN (véase Figura 4.1). Por lo tanto, la operación o la aplicación del método (los modelos) es muy fácil y viable en situaciones prácticas como la de las actividades de la extensión agrícola por los técnicos de EPAGRI. Además, así se facilita la elaboración de múltiples escenarios (por especialistas de la sede de EPAGRI) para ser utilizados en procesos de ordenamiento territorial. En este último participan instituciones locales así como los agricultores.

Producto que el método para la generación y el análisis de escenarios del uso de la tierra está integrado en el SIRTPLAN, es posible lograr superar la desventaja de programación lineal en cuanto a la exigencia de la gran cantidad de datos. Además, el modelo es sencillo y adecuado para su aplicación.

La georreferenciación o la referencia espacial o territorial de los resultados (los escenarios) de la optimización es un aspecto importante. El modelo está construido sobre la base de las unidades básicas de análisis, que son unidades de tierra. Los resultados se generan por cada unidad y así se componen los diferentes escenarios de ordenamiento para la microcuenca. En base a las unidades básicas de análisis se pueden ubicar los resultados (los escenarios) en un mapa, a través del sistema SIRTPLAN (el componente 'SIG' (Sistema de Información Geográfica)).



Figura 4.1 Pantalla de entrada al componente para la generación de escenarios por programación lineal en el SIRTPLAN de EPAGRI.

4.2.4 Análisis del Modelo: Calcular Escenarios Óptimos

El modelo elaborado permite generar escenarios en varios niveles:

- Microcuenca;
- Unidad Básica de Análisis; y
- Finca o Propiedad Agrícola

Escenarios para el Uso de la Tierra de la Microcuenca

A nivel 'microcuenca' se genera una serie de escenarios tanto para maximizar el margen bruto como para minimizar la erosión. Además, se puede establecer una relación de compensación recíproca (*trade-off*) entre ambos objetivos.

En primer lugar, el modelo entrega en cada cálculo (o en cada escenario) los usos de la tierra escogidos en el escenario óptimo. Por ejemplo, la Figura 4.2 presenta los resultados en forma gráfica. Se puede observar, que en el caso de un nivel máximo de inversión el uso óptimo de la tierra en la microcuenca consiste mayormente en ajo, aves y cerdos, en menor cantidad se debe cultivar maíz, frijoles y cítricos para el autoconsumo (porque el modelo incluye una restricción que define un área mínima para estos cultivos). El modelo escogió el ajo, que es un cultivo alternativo en la microcuenca, en lugar de por ejemplo ganado de leche, que es un uso tradicional. Esto porque el rendimiento en lo que respecta a la leche es bastante bajo.

También en la Figura 4.2 se puede observar el cambio de la solución óptima de los diferentes usos cuando se calcula la relación de compensación recíproca (*trade-off*) entre los objetivos 'margen bruto' y 'erosión' (véase Sección 2.4). Son los números entre 1 y 10 que aparecen en la figura y se observa que el ajo se repone con cerdos cuando se mueve de un máximo margen bruto (1) hacia una mínima erosión (10).

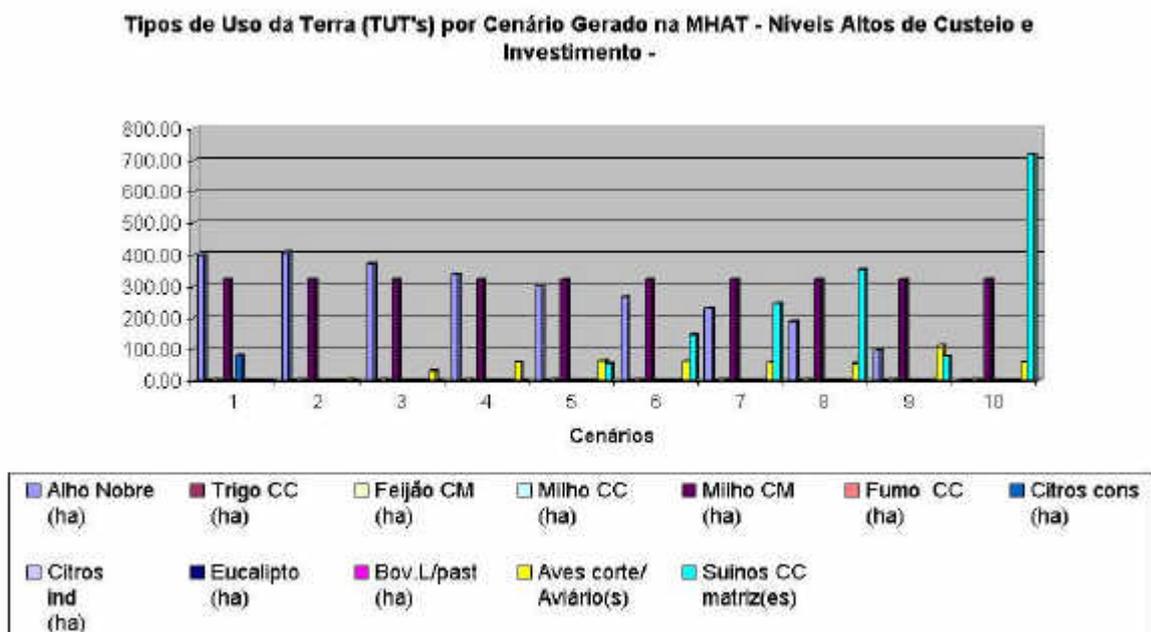


Figura 4.2 Distribución de los diferentes usos de la tierra en un escenario con un nivel máximo de inversión y entre las escalas (1-10) de la relación de compensación recíproca (*trade-off*) entre erosión y margen bruto.

La ubicación de los diferentes cultivos se basa en las unidades básicas de análisis, que son unidades geográficas. Este mecanismo se explica posteriormente en relación con los resultados a nivel de la Unidad Básica de Análisis.

La relación entre los dos objetivos optimizados en el modelo (margen bruto y erosión) se dibuja en la Figura 4.3. Así se puede evaluar el efecto de una mayor o menor erosión sobre el margen bruto total. La erosión es un dato importante a nivel microcuenca; sin embargo, el margen bruto tiene más relevancia a nivel finca. Así se establece una relación entre objetivos globales o el interés común a nivel microcuenca con los objetivos particulares a nivel finca.

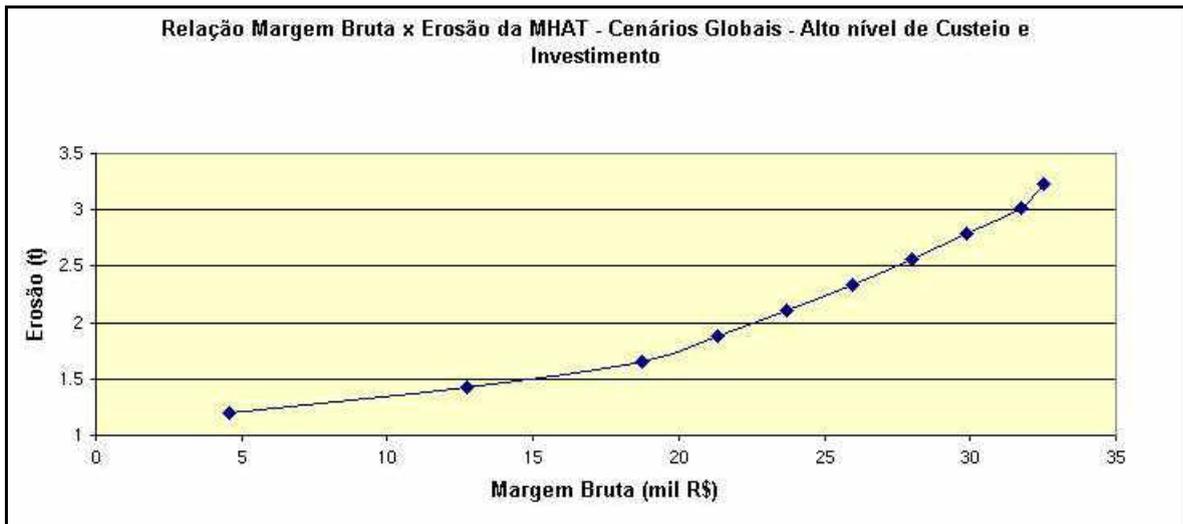


Figura 4.3 Correlación entre los objetivos de maximizar el margen bruto y minimizar la erosión a nivel microcuenca.

A nivel microcuenca también interesa el Índice del Impacto Ambiental, un dato que se puede comparar en forma similar como la relación de compensación recíproca (*trade-off*) entre erosión o margen bruto.

Además, se podría llevar a cabo un análisis más detallado de los temas incluidos en el modelo en forma de restricciones, como son mano de obra, capital e inversiones. Sin embargo, en el caso de EPAGRI esto se hace a nivel de unidad básica de análisis.

Escenarios para el Uso de la Tierra de las Unidades Básicas de Análisis

El modelo entrega los mismos resultados del nivel de microcuenca a nivel de unidad básica de análisis. Este nivel es especialmente importante con relación a la localización de la solución óptima del modelo en cuanto a los usos de la tierra del escenario. La Figura 4.4 presenta las unidades básicas de análisis en la microcuenca.

La ubicación exacta de cada uso de la tierra no se puede dar en el actual sistema. Los resultados se dan por unidad, lo que significa un conjunto de usos óptimos de cada unidad. Para lograr una mayor georreferenciación dentro de cada unidad básica de análisis se sobrepone la capa de información de los límites de las fincas (propiedades agrícolas).

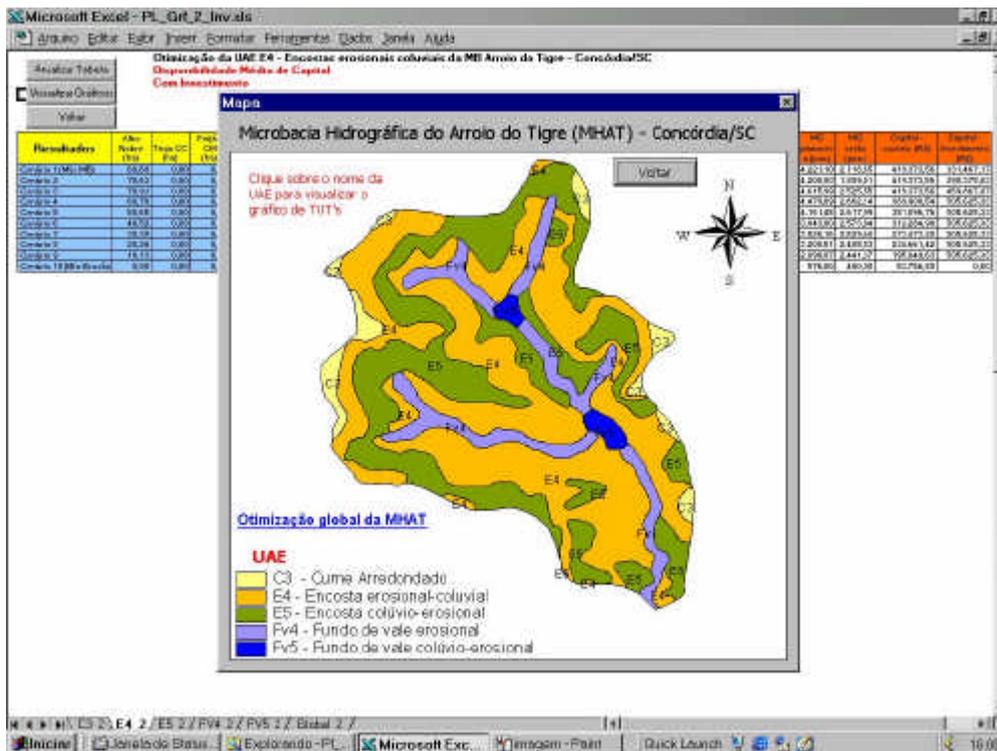


Figura 4.4 Distribución geográfica de las unidades básicas de análisis definidas en la microcuenca “Arroio do Tigre”.

Escenarios para el Uso de la Tierra de las Fincas o Propiedad Agrícola

Incorporar el nivel finca en la evaluación de tierras y en la generación de escenarios de uso óptimo de la tierra es de mayor relevancia desde el punto de vista de la implementación de uno u otro escenario. Es al nivel de finca donde se toman las decisiones respecto del uso de la tierra, es la familia campesina quien es dueña de la tierra y quien dispone de los recursos para realizar los cambios en el uso de la tierra.

A nivel finca (43 propiedades) el sistema genera una matriz de los usos óptimos por cada finca. La matriz está basada en los resultados calculados por unidades básicas de análisis y en el mapa de propiedades (véase Figura 4.5). Cada finca consiste en partes de una o más unidades básicas de análisis. Por ejemplo, la finca número dos de la Figura 4.5 tiene todas las cinco unidades dentro de sus límites.

El sistema entrega la superficie proporcional de cada unidad de análisis que corresponde a la respectiva finca. Al igual que a nivel microcuenca o nivel unidad básica de análisis se puede hacer un análisis de los objetivos y las restricciones bajo diferentes escenarios. Además, la georreferenciación a nivel finca es más detallada.

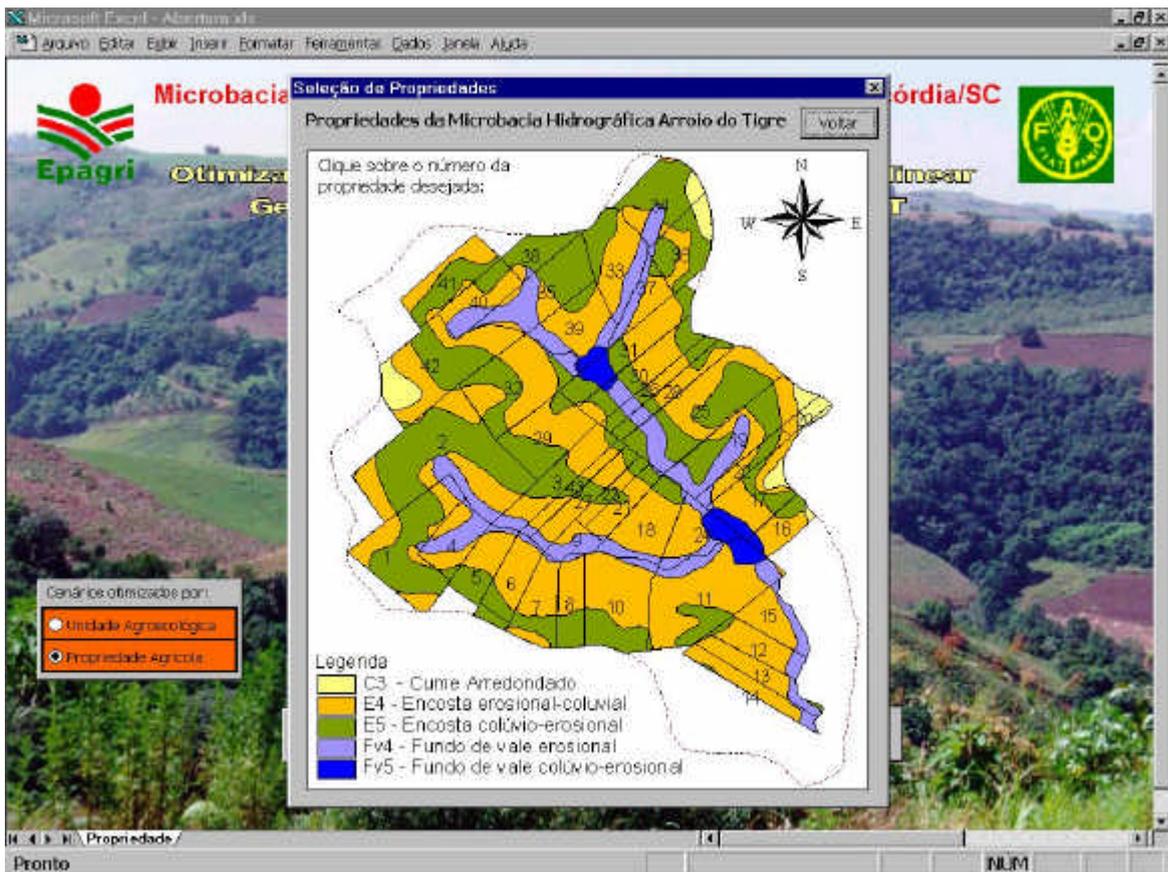


Figura 4.5 Análisis de escenarios óptimos a nivel finca (propiedad agrícola).

4.2.5 Conclusiones y Lecciones

Aun cuando el desarrollo del SIRT-EPAGRI y la aplicación de la programación lineal se ha llevado a cabo dentro de los objetivos y metas establecidas, se sabe que debe ser un proceso continuo de perfeccionamiento metodológico con la introducción de otros instrumentos de análisis y de participación de los actores involucrados.

Se puede afirmar que la aplicación de la programación lineal fue una experiencia positiva en lo que respecta al desarrollo de metodologías e instrumentos de análisis del proceso productivo en relación con la sostenibilidad agroambiental, tan propagada en la actualidad. Seguramente, esta experiencia podrá ser difundida y adaptada en otros contextos agroambientales, no solamente de Brasil sino también de otros países.

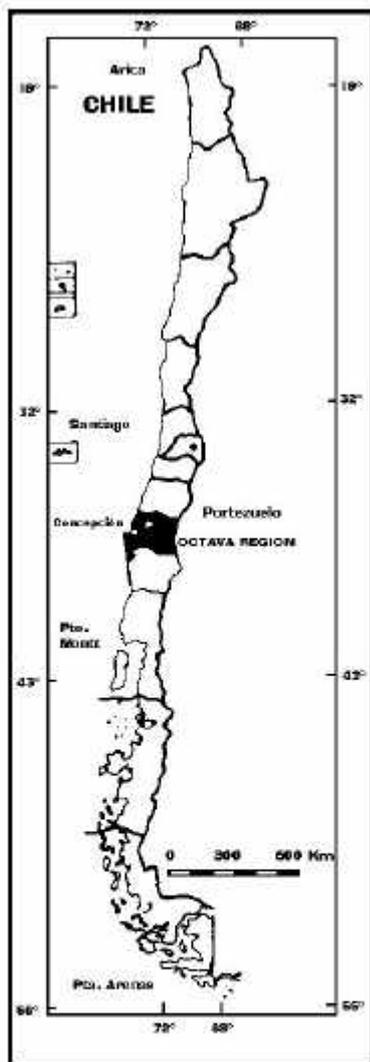
Cabe destacar, la necesidad de dominio y adopción de metodologías participativas a fin de construir conjuntamente todos los pasos del proceso de generación de escenarios optimizados y consensuados.

Se prevé la adaptación del SIRT-EPAGRI a contextos más amplios y a escala de Planificación Municipal o Regional como instrumento de subsidio a los Planes de Desarrollo Municipal y Regional.

4.3 Escenarios para el Uso de la Tierra de la Comuna de Portezuelo: VIII Región, Chile

4.3.1 Optimización para el Ordenamiento de la Comuna de Portezuelo: El Contexto

Mapa 4.2 Portezuelo.



En la comuna de Portezuelo se elaboró un estudio para evaluar la aptitud de las tierras y para generar escenarios para el uso óptimo de la tierra desde dos puntos de vista. Desde un punto de vista económico, que da importancia al margen bruto y desde un punto de vista ambiental, que da mayor importancia a la reducción de erosión. Sin embargo, se deberían lograr escenarios considerando ambos puntos de vista. Por ello, se aplicó la programación lineal.

El estudio fue elaborado por parte del proyecto FAO, además se consultaron algunas instituciones locales, sin tenerlas como contraparte en el trabajo. Al mismo tiempo, se utilizó la información disponible sobre la comuna y se recolectaron algunos datos adicionales.

Dentro del estudio se desarrolló un SIRTPLAN con sus bases de datos, una evaluación de tierras y un estudio socioeconómico de la comuna. La construcción y el análisis del modelo de programación lineal están basados en la utilización de los resultados de la evaluación de tierra para buscar de manera automatizada los escenarios. El SIRTPLAN provee los datos necesarios para un análisis del uso de la tierra desde el punto de vista económico y ambiental. El resultado esperado del estudio era contar con un método y, en consecuencia, con escenarios de uso de la tierra para orientar el ordenamiento territorial de la comuna.

4.3.2 Objetivos de la Modelación y Optimización

El objetivo específico de este estudio y la modelación fue determinar el efecto que tiene un cambio en la disponibilidad de capital sobre la estructura productiva de la comuna de Portezuelo y optimizar el uso de la tierra bajo diferentes escenarios.

En términos generales, el trabajo consistió en la construcción de un modelo de programación lineal basado en la optimización del uso de la tierra en unidades homogéneas de la tierra bajo diferentes condiciones de inversión.

4.3.3 Construcción del Modelo

Recopilación de la información

Como primer paso se dividió la comuna de Portezuelo en unidades de tierra (o unidades básicas de análisis), considerando criterios agroecológicos y socio-económicos. La información fue recopilada para cada uno de las unidades de tierra, la cual se obtuvo a partir del censo de la población, enriquecida con encuestas y estudios pertinentes, el catastro rural y la accesibilidad o red vial. Las unidades fueron caracterizadas según: tamaño de finca, nivel tecnológico existente y características de la población.

Una vez procesada la información agroecológica y socioeconómica en el SIRTPLAN se procedió a crear las unidades básicas de análisis (las unidades de tierra). Para cada una de las unidades de tierra se determinan sus atributos específicos y únicos, que se convertirán en la oferta (o características) particular de cada unidad de tierra a fin de desarrollar diferentes tipos de uso de la tierra (TUT). Por ejemplo, se ha considerado la arveja, el trigo, la cebada y la viña.

Para cada una de las 23 unidades de tierra, se contó con información de la superficie de tierra disponible, de la disponibilidad de mano de obra, de los tipos de uso de la tierra, de la aptitud de cada cultivo en cada unidad de tierra⁵, de la ficha técnica de producción para cada combinación de tipo de uso de la tierra y de la aptitud y rotación de los cultivos recomendada.

La ficha técnica consta del rendimiento esperado según el grado de adaptabilidad y necesidad de mano de obra. Por medio de una evaluación de tierras (FAO, 1976) se definió la aptitud de las tierras que contó con la aptitud física, el rendimiento físico, la necesidad de mano de obra para cada especie de cultivo y para cada unidad de tierra, la erosión de tierra en cada unidad y el margen bruto de cada unidad.

Utilizando tanto la información técnica de cada TUT de cada unidad, como algunos parámetros de disponibilidad (tierra, capital y mano de obra, principalmente), se construyó un modelo lineal para la comuna basado en los submodelos de cada una de las 23 unidades de tierra (véase Sección 3.3.5).

5 Las clases de aptitud son: A1 = apto; A2 = moderadamente apto; A3 = marginalmente apto; N = no apto.

Construcción del modelo

El modelo se construyó definiendo como actividades o variables para cada unidad de tierra los siguientes tipos de uso de tierra (cultivos): arveja, trigo, cebada, maíz lenteja, poroto, olivo, viña y cerezo. Además, se incluyó una actividad "otro uso", que en el fondo considera toda la tierra que no fue utilizada en los cultivos.

El modelo consideró dos funciones objetivo: la primera fue maximizar el margen bruto y la segunda minimizar la erosión. Los coeficientes técnicos, tanto para las funciones objetivo como para las condiciones técnicas o restricciones fueron determinados en base a la información recopilada por el proyecto FAO "*Información sobre Tierras y Aguas para un Desarrollo Agrícola Sostenible*" (GCP/RLA/126/JPN), como se indicó en el Capítulo 1.

Las restricciones incluidas en el modelo fueron las siguientes:

- i. *Tierra disponible*: La disponibilidad correspondió a la superficie total de la unidad. La restricción fue de tipo "igual a", ya que se incluyó la actividad "otros usos".
- ii. *Flexibilidad*: debido a que los frutales imponen rigidez en los sistemas productivos, se determinó que éstos no podían superar un 20% de la superficie de la unidad.
- iii. *Rotación de gramíneas y leguminosas*: desde el punto de vista agronómico, se recomienda alternar anualmente los cultivos de leguminosas y gramíneas.
- iv. *Mano de obra*: debido que la demanda de trabajo no es la misma durante todo el año, esta restricción se definió de acuerdo con las estaciones. La disponibilidad de mano de obra fue estimada a partir del número de familias que vive en cada unidad. El modelo no permitió transferir mano de obra de una unidad a otra.
- v. *Autoconsumo de trigo*: se incluyó debido a la importancia que tiene este cultivo en las economías campesinas.
- vi. *Inversión*: corresponde al capital disponible para invertir en los cultivos.

Al analizar la estructura del modelo, se observa que ésta corresponde a la agregación de los submodelos de cada unidad de tierra o unidad de análisis. Al no existir alguna restricción que amarre las distintas unidades o submodelos entre sí, la decisión del uso de la tierra en una unidad no influirá sobre la otra. A modo de ejemplo, la superficie de gramíneas (trigo, cebada y maíz), cultivada en la unidad 1 no está relacionada con la superficie de leguminosas (arveja, poroto y lenteja) en cualquiera de las otras unidades.

4.3.4 Análisis del Modelo: Calcular Escenarios Óptimos

A partir de este modelo global de la comuna se construyeron seis escenarios distintos, de los cuales dos fueron identificados como escenarios base. El primero (Base A) corresponde al modelo comunal descrito con un monto de inversión definido por unidad de análisis basado en un diagnóstico de la comuna y el segundo (Base B) a uno en el cual la inversión puede ser distribuida libremente entre las unidades, o sea un monto de inversión disponible a nivel de comuna. Para lograr esto se ajusta la restricción de inversión (vi).

A continuación, a partir de cada uno de los escenarios base se construyeron otros escenarios que consideraban el aumento en un 25% y la disminución de un 25% de la inversión disponible para la unidad o para la comuna (Cuadro 4.2).

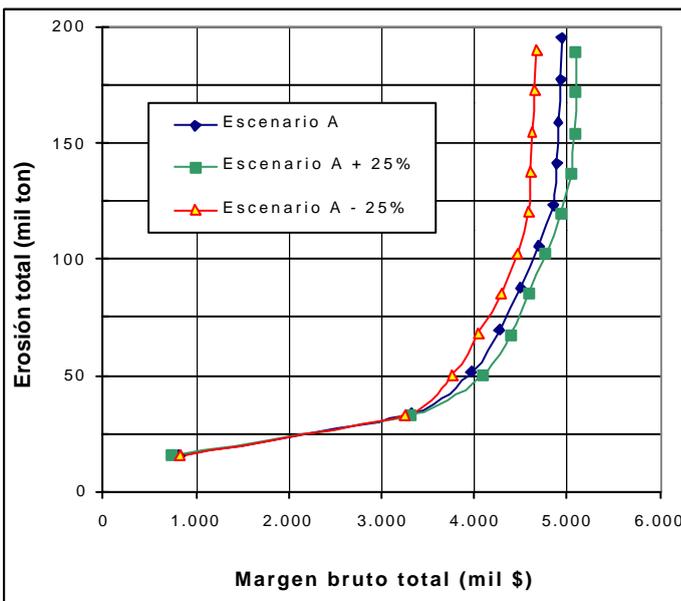
Cuadro 4.2 Características distintivas de los seis escenarios analizados.

Escenario	Inversión definida para ...	Monto de la inversión
A	... cada unidad de tierra	100%
A - 25%	... cada unidad de tierra	75%
A + 25%	... cada unidad de tierra	125%
B	... toda la comuna	100%
B - 25%	... toda la comuna	75%
B + 25%	... toda la comuna	125%

La optimización del modelo comunal se realizó utilizando el método de las restricciones, realizando variaciones paramétricas de la erosión máxima aceptable. Para cada uno de los seis escenarios, se realizaron diez variaciones paramétricas de la erosión máxima aceptable.

Al optimizar el modelo bajo el escenario A (inversión definida por unidad de tierra) se observó claramente un conflicto entre los dos objetivos considerados (Figura 4.6). De esta forma, al establecerse un límite en la pérdida total de suelo, se produce una disminución progresiva en el margen bruto total. Esta situación se mantiene al aumentar o disminuir la inversión disponible. La magnitud del impacto de una reducción en la pérdida de suelo sobre el margen bruto, puede ser estimada a partir de los intercambios entre ambos objetivos (Cuadro 4.3). Los resultados ponen de manifiesto que, llegado a un cierto punto, el costo para disminuir la pérdida de suelo (medida en términos de un menor margen bruto), son demasiado altos para ser aceptables por un agricultor.

Figura 4.6 Valores de las funciones objetivo para los escenarios con inversión máxima definida por unidad de tierra.



Cuadro 4.3 Intercambio entre margen bruto y pérdida de suelo para los escenarios / (\$/ton)¹.

	Max MB	Medio	Min E
Escenario A	778	9.636	140.031
Escenario A + 25%	520	9.829	148.236
Escenario A - 25%	1.324	6.870	139.621

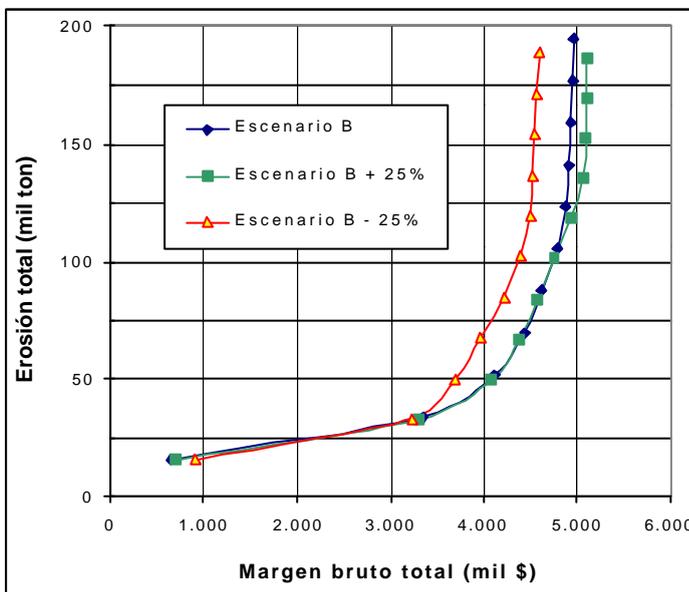
1: Se presentan los valores en los puntos extremos y medio

Con respecto al efecto que tienen los cambios en los niveles de inversión sobre el margen bruto y la erosión, se observó que al aumentar el capital disponible, el costo

de oportunidad de la erosión disminuye al acercarse a niveles máximos de margen bruto y aumenta al alcanzar niveles mínimos de pérdida de suelo (Cuadro 4.3). En otras palabras, si se parte de la base que los productores están maximizando su margen bruto, bajo un escenario de mayor inversión sería posible disminuir la pérdida de suelo con un menor costo en términos de ingresos perdidos. Sin embargo, si existe una situación restrictiva en términos de capital disponible, el costo de una menor pérdida de suelo es mayor.

Una situación muy similar a la descrita para el escenario A se observó al optimizar los escenarios B (Figura 4.7 y Cuadro 4.4). La forma cóncava de las curvas (Figura 4.7), así como los valores de la matriz de intercambio (Cuadro 4.4) ponen de manifiesto el conflicto que existe entre un objetivo de tipo económico (maximizar el margen bruto) y uno de tipo ambiental (minimizar la pérdida de suelo).

Figura 4.7 Valores de las funciones objetivo para los escenarios con inversión máxima definida para la comuna.



Cuadro 4.4 Intercambio entre margen bruto y pérdida de suelo para los escenarios B (\$/ton)¹.

	Max MB	Medio	Min E
Escenario B	734	9.471	150.277
Escenario B + 25%	463	10.190	152.459
Escenario B - 25%	1.324	10.307	133.969

1: Se presentan los valores en los puntos extremos y medio

Finalmente, se procedió a analizar el cambio en el patrón de uso del suelo asociado con estos cambios de margen bruto y de pérdida de suelo. En general, se observa que no existen grandes diferencias entre los escenarios A y B (Figuras 4.8 y 4.9), ni entre los escenarios con cambios en los niveles de inversión disponible. Esta ausencia de cambio es, naturalmente, un reflejo de la similitud de los resultados para cada escenario (Figuras 4.6 y 4.7). Tal como se observa, cuando se maximiza el margen bruto, sin restringir la pérdida máxima de suelo, la solución óptima incorpora casi 4 mil ha de viñas, y sobre 9,000 ha de arvejas en rotación con una combinación de trigo y maíz. Los porotos y la cebada jamás entran en la solución, mientras que los cerezos y los olivos sólo entran en superficies marginales (menos del 2%). A medida que se restringe la pérdida de suelo, disminuye la superficie con viñas y maíz, aumentando la superficie con arvejas y trigo. Estos aumentos se explican por que al desocuparse la tierra con cerezos se liberan montos importantes de inversión, que permiten utilizar más tierra. Posteriormente, se produce una disminución en la superficie dedicada al cultivo de arvejas y trigo.

Figura 4.8 Uso de la tierra asociado con distintos niveles de margen bruto comunal para el Escenario A.

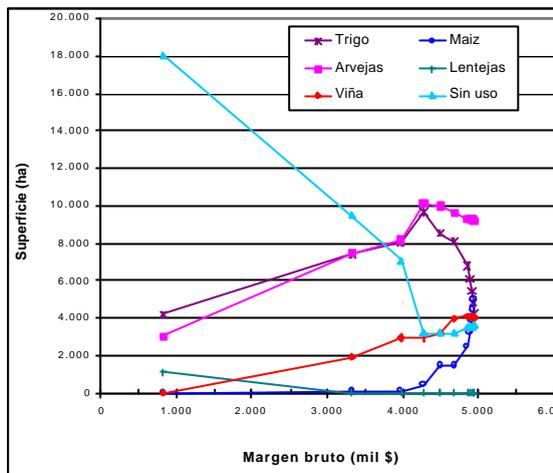
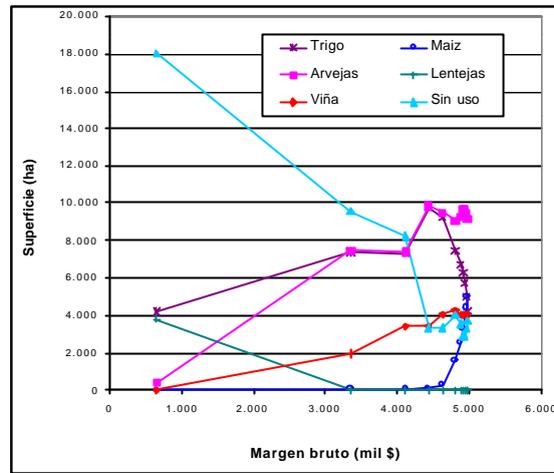


Figura 4.9 Uso de la tierra asociado con distintos niveles de margen bruto comunal para el Escenario B.



4.3.5 Conclusiones y Lecciones

El impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente se ha convertido en un tema cada vez más importante. Como la agricultura no escapa a esta realidad, es necesario desarrollar métodos que permitan tomar decisiones con respecto al uso de la tierra, considerando simultáneamente aspectos económicos y ambientales. Los modelos multiobjetivo, como el que aquí se ha desarrollado, permiten optimizar el uso de la tierra considerando sus efectos sobre objetivos económicos y ambientales, permitiendo hacer explícitos los intercambios entre ambos.

La aplicación del modelo en la comuna de Portezuelo, permite cuantificar el conflicto entre el margen bruto y la pérdida de suelo a nivel comunal. Los resultados indican que al disminuir la pérdida de suelo se produce una reducción en el margen bruto, la que se hace mayor a medida que la pérdida máxima de suelo aceptable disminuye. Estos resultados, que concuerdan con otros estudios de este tipo, sólo reflejan la reducción del impacto ambiental de la agricultura que está asociado con pérdidas de rentabilidad. Por ello, considerando la difícil situación económica que atraviesa la agricultura, cualquier política que apunte a una disminución del impacto ambiental, deberá considerar alguna medida que compense dicha pérdida. Con respecto al efecto de cambios en la inversión disponible, se observó que una mayor disponibilidad de capital permite reducir el costo de la reducción de la pérdida de suelo, cuando el agricultor maximiza su margen bruto.

Un último aspecto que debe ser mencionado se refiere al efecto que tiene la restricción en la pérdida de suelo a nivel comunal sobre cada unidad de tierra. Debido a la estructura del modelo, la disminución en la pérdida de suelo se produce en forma heterogénea en cada unidad. Como es obvio, el patrón de uso de la tierra cambia primero en las unidades con el menor costo de oportunidad, es decir, donde el costo de cada tonelada de suelo perdida es menor. A medida que la erosión se restringe más, se cambia el uso de otras unidades. Las consecuencias sociales y de equidad de éstos deben ser exploradas en mayor profundidad.

5. Conclusiones y Recomendaciones

En conclusión se puede decir que el método y el modelo básico de programación lineal elaborado y aplicado son útiles en el contexto de ordenamiento territorial. Es una herramienta sencilla desde el punto de vista técnico o académico. Sin embargo, desde el punto de vista práctico y de los técnicos en el campo a cargo de los análisis para el ordenamiento territorial en las regiones de Latinoamérica, es una herramienta, un método bastante abstracto. No es tan fácil conceptualizar la realidad en términos de objetivos y restricciones que utilizan los modelos de programación lineal.

La aplicación de la herramienta es factible y efectiva cuando existe el personal capacitado; ya que fue necesario capacitar a los técnicos y acompañar, especialmente en los primeros estudios y aplicaciones.

En los dos casos de estudio en los cuales se ha aplicado la programación lineal fueron muy útiles los resultados para orientar la discusión de los tomadores de decisión en cuanto al uso de la tierra. Sin embargo, no se aplicó la herramienta en un proceso interactivo con ellos, por lo cual los resultados o escenarios fueron algo teóricos.

Respecto de las recomendaciones que se deben proponer después de haber elaborado el método en el contexto específico del ordenamiento territorial y con apenas dos casos pilotos que se pudieron elaborar, es posible mencionar que:

- En la capacitación de los usuarios sobre la herramienta debe incluirse un proceso de acompañamiento;
- El desarrollo y el análisis del modelo deben ser un proceso participativo e interactivo con los tomadores de decisión;
- Se debe analizar si existen las condiciones para introducir el método de programación lineal en cuanto a la capacidad de los técnicos, el tiempo y la información disponible, además de la necesidad y utilidad de una orientación global en el proceso de ordenamiento territorial sobre aspectos muy específicos.
- Sin embargo, una vez introducida la herramienta y capacitado al personal, puede ser una herramienta eficiente y eficaz para facilitar la toma de decisiones en cuanto al ordenamiento territorial.

Bibliografía

- COHON, J. L. 1978. Multiobjective programming and planning. Ed. Academic Press. 296 p. New York.
- DUCKSTEIN, L. 1984. "Selection of a multiobjective technique for a water resources problems under uncertainties". Proceedings of the Engineering Foundation Conference: Multiobjective analysis in water resources. Ed. American Society of Civil Engineers. pp 180-202. EE.UU..
- FAO, 1976. Framework for Land Evaluation. FAO Soils Bulletin No. 32. FAO, Rome, Italy.
- FAO, 1984. Guidelines: Land Evaluation for Forestry. FAO Forestry Paper No. 48, Rome, Italy.
- FAO, 1985. Guidelines: Land Evaluation for Irrigated Agriculture. FAO Soils Bulletin No. 55, Rome, Italy.
- FAO, 1991. Guidelines: Land Evaluation for Extensive Grazing. FAO Soils Bulletin No.58, Rome, Italy.
- FAO, 1994. Directrices sobre la Planificación del Aprovechamiento de la Tierra. Colección FAO: Desarrollo 1. FAO, Roma, Italia.
- FAO, 1996. Agro-ecological zoning. Guidelines. FAO Soils Bulletin No. 73, FAO, Rome, Italy.
- FAO, 1999. AEZWIN An interactive multiple-criteria analysis tool for land resources appraisal. World Soil Resources Report 87, FAO, Rome, Italy.
- GARUTI, C. y I. SPENCER, 1993. Análisis costo beneficio: Un análisis de tipo bidimensional. Monografía. Fulcrum Ingeniería Ltda.
- HENDRIKS, Th.H.B. and P. VAN BEEK, 1991. Optimaliseringstechnieken. Principes en toepassingen. Bohn Stafleu Van Loghum, Holanda.
- HWANG, C. y A. MASUD, 1979. Multiple objective decision-making method and applications. Ed. Springer Verlag. pp 45-56. Berlin.
- KÖBRICH, C., y M. Maino, 1999. Guía metodológica para la optimización del uso de la tierra. Proyecto "Información sobre Tierras y Aguas para un Desarrollo Agrícola Sostenible" (GCP/RLA/126/JPN), FAO, Santiago de Chile, Chile.
- MAINO, M, J. PITTET D., C. KÖBRICH, 1993. Programación multicriterio: Un instrumento para el diseño de sistemas de producción. RIMISP, Santiago de Chile.
- MARGLIN, J.A., 1967. Public investment criteria. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, EE.UU.
- ROMERO, C., 1993. Teoría de la decisión multicriterio: Conceptos, técnicas y aplicaciones. Alianza Editorial, Madrid, España.
- ROMERO, C. y T. REHMAN, 1989. Multiple Criteria Analysis for Agricultural Decisions. Elsevier, Amsterdam, Holanda.
- SAATY, T.L., 1995. Decision Making for Leaders. The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World. University of Pittsburg, USA.
- THOMÉ, V. M. R.; ZAMPIERI, S.; BRAGA, H. J.; PANDOLFO, C.; SILVA JÚNIOR, V. P.; BACIC, I. L. Z.; LAUS NETO, J. A.; SOLDATELI, D.; GEBLER E. F.; DALLE ORE, J. de A.; ECHEVERRIA, L. C. R.; RAMOS, M. G.; CAVALHEIRO C. N. R., DEEKE, M.; MATTOS, J. F. de; SUSKI, P. P., 1999. Zoneamento Agroecológico e Socioeconômico do Estado de Santa Catarina. Epagri-Ciram, CD-ROM (Epagri - 01/99).

- WILLIS, C. y R. PERLACK, 1980. "Multiple objective decision-making: Generating techniques of goal programming". *Southern Journal of Agricultural Economics* 1:199-204.
- ZADEH, L., 1963. "Optimality and Non-Scalar-Valued. Performance Criteria". *I.E.E.E. Transactions On Automatic Control*. Ac-8:59-60.
- ZELENY, M., 1973. "Compromise programming". En: Multiple decision-making. J.L. Cochrane M. y Zeleny (Eds.) University of South Carolina Press, p. 262-301.