

Modelo de optimización para evaluación ex ante de alternativas productivas y cuantificación de externalidades ambientales en cuencas andinas

Modelo de evaluación económica, social y ambiental de usos de la tierra (ECOSAUT)

Marcela Quintero Rubén Darío Estrada James García













Modelo de optimización para evaluación ex ante de alternativas productivas y cuantificación de externalidades ambientales en cuencas andinas



Modelo de optimización para evaluación ex ante de alternativas productivas y cuantificación de externalidades ambientales en cuencas andinas

Modelo de evaluación económica, social y ambiental de usos de la tierra (ECOSAUT)

Marcela Quintero Rubén Darío Estrada James García











Modelo de optimización para evaluación ex ante de alternativas productivas y cuantificación de externalidades ambientales en cuencas andinas

Modelo de evaluación económica, social y ambiental de la tierra (ECOSAUT)

Esta publicación ha sido realizada en el marco del Proyecto Regional Cuencas Andinas (CONDESAN-REDCAPA-GTZ), que es un proyecto de cooperación entre el Centro Internacional de la Papa (CIP) y el Gobierno de Alemania-Ministerio de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ). Por un lado, el CIP ha delegado la responsabilidad de la ejecución del proyecto al Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN) y a la Red de Instituciones vinculadas a la Capacitación en Economía y Políticas Agrícolas en América Latina y el Caribe (REDCAPA), y por el otro, el Gobierno alemán ha delegado esta responsabilidad a la Cooperación Técnica Alemana (GTZ).

El objetivo del Proyecto Regional Cuencas Andinas (CONDESAN-REDCAPA-GTZ) es que "Los actores en cuencas hidrográficas seleccionadas utilizan las externalidades ambientales identificadas en la priorización y ejecución de proyectos de desarrollo sostenible", lo cual contribuye a que estos actores empleen métodos innovadores para lograr un mejor uso de las potencialidades existentes para el desarrollo sostenible.

Dirección URL: www.condesan.org/cuencasandinas

© Centro Internacional de la Papa (CIP), 2006

ISBN 92-9060-269-4

Las publicaciones del CIP contribuyen con información importante sobre el desarrollo para el dominio público. Los lectores están autorizados a citar o reproducir este material en sus propias publicaciones. Sin embargo, se solicita respetar los derechos de autor del CIP y enviar una copia de la publicación en la que se realizó la cita o se reprodujo el material al Departamento de Comunicación y Difusión, a la dirección que se indica.

Centro Internacional de la Papa Apartado 1558, Lima 12, Perú cip@cgiar.org www.cipotato.org

Primera edición: marzo de 2006 Corrección de textos: Rocío Moscoso Diseño: José García

Impreso en el Perú Tiraje: 900 ejemplares Marzo 2006

Presentación		9
Introducción		13
1. ¿Qué es y p	ara qué?	15
2. Descripción	del modelo	17
2.1 Gene	ralidades	17
2.2 Estru	ctura del modelo	18
2.2.1	Hoja 1: Datos básicos	20
2.2.2	Hoja 2: Datos calculados	22
2.2.3	Hoja 3. Optimización	22
2.2.4	Hoja 4: Resultados	22
3. ¿Cómo func	ciona?	23
3.1 Ingre	so de información básica	23
3.2 Orga	nización de datos para modelar	44
3.3 Matri	z de programación lineal (hoja Optimización)	46
3.3.1	Matriz de entrada (hoja Optimización)	46
3.3.2	Matriz de salida	56
3.3.3	Optimización	57
3.4 Gráfic	cos de interpretación de resultados. Hoja Resultados	71
3.5 Opci	ones para finalización y reiniciación	73
3.5.1	Finalizando la aplicación	73
3.5.2	Reiniciando el modelo	73
Bibliografía		75
Anexo		76

Tabla de contenido

Presentación

urante las dos últimas décadas, el concepto de desarrollo sostenible ha ganado espacio en el discurso político, con énfasis especial en el desarrollo rural. Sin embargo, la aplicación práctica difiere significativamente de la aspiración teórica. Algunos factores que ayudan a entender esta situación son los siguientes:

- En la mayoría de los países en vías de desarrollo existe gran presión por priorizar el crecimiento económico y dejar de lado temporalmente los temas ambientales y de distribución de la rigueza.
- El escaso conocimiento y aplicación de métodos para valorar los bienes y servicios ambientales y los beneficios de la inclusión social coadyuvan a que los actores tomen sus decisiones ignorando los efectos que tiene el crecer, sin tomar en cuenta la preservación del capital natural y la ampliación del capital humano y social. Las señales de precios en el mercado no miden exactamente las consecuencias ambientales de la actividad económica, y por lo tanto crean incentivos negativos, que causan la degradación de los recursos naturales renovables.
- La externalidades negativas. Algunos agentes económicos están en posibilidad de transferir una parte o la totalidad del costo de determinadas acciones suyas a otros segmentos de la población, sin existir de por medio ningún mecanismo compensatorio.

El análisis económico no tiene en cuenta las relaciones biofísicas ya existentes en los ecosistemas, las cuales determinan la magnitud de las externalidades. La no contabilización de los costos ambientales (finalmente traducidos en costos sociales) arroja indicadores de rentabilidad (privada) mayores que los reales (social). Como consecuencia, se crean incentivos para una mayor tasa de explotación que la social y ambientalmente deseable (sostenible), y la renta que éstos pueden generar se pierde por sobreexplotación o sobrecapitalización, o se transfiere al exterior al no internalizarse adecuadamente los costos sociales y ambientales. Si estos valores no tienen impacto sobre los agentes que los originan, no existe ninguna motivación para que ellos intenten reducir el costo que sus acciones imponen sobre el bienestar de la sociedad en su conjunto.

 La ausencia de precio de determinados bienes ambientales —derivada, a su vez, de la inexistencia de derechos de propiedad sobre éstos— genera su sobreutilización y degradación. Esto causa una asignación de recursos que no es congruente con el óptimo social. Para atacar las causas fundamentales del problema ambiental y diseñar estrategias efectivas de manejo, es necesario identificar adecuadamente los diversos bienes, servicios y funciones que los ecosistemas cumplen para la sociedad en las comunidades locales, así como definir métodos apropiados para su correcta valoración.

El presente trabajo es una metodología que integra, de manera armónica, la trilogía "valoración de recursos naturales-economía-impacto social" en la gestión de las cuencas. Se busca aprovechar, por una parte, los vínculos positivos entre la eficiencia económica y el mejoramiento ambiental y, por otra, intervenir para crear nuevas señales económicas que hagan que todas las decisiones de producción y consumo tomen en cuenta sus efectos sobre el ambiente.

La metodología desarrollada por Marcela Quintero —del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)— y Rubén Darío Estrada —del Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN)—, con el apoyo informático de James García —del CIAT, proyecto Impacto—, utiliza la programación multicriterio, la cual permite cuantificar las relaciones económicas y ambientales, así como valorar el recurso en función de los niveles de productividad e ingreso que perciben los productores, quienes son los generadores de determinados servicios ambientales en las cuencas.

El modelo de análisis resulta de varios estudios en cuencas de los Andes, en los cuales se cuantificaron los beneficios y costos sociales generados por el cambio en el uso de la tierra y/o por las prácticas de manejo necesarias para proveer servicios ambientales. El método permite comparar las ventajas y desventajas de diferentes medidas, evaluar los escenarios actuales y potenciales del uso del suelo, las externalidades ambientales, la generación de empleo y los beneficios para la sociedad por encadenamientos económicos y sociales, lo cual a su vez aclara los conflictos de política *(trade offs)*. El análisis permite, además, determinar *ex ante* el impacto que pueden tener otras alternativas de uso de la tierra sobre los ingresos netos de los productores. El modelo de programación lineal utilizado se convierte así en un método eficiente para tomar las mejores decisiones, seleccionadas entre una gran gama de alternativas; permite hacer ensayos de simulación variando los escenarios tecnológicos del uso de la tierra o aplicando diversas medidas de política.

El modelo es una herramienta de gran utilidad para aquellas personas que se desempeñan como asesores de los agentes económicos en las cuencas o para quienes tienen la posibilidad de influir en la toma de decisiones de política de desarrollo regional. El uso del modelo les facilitará responder a preguntas como ¿cuáles son las mejores alternativas tecnológicas para determinadas áreas de la cuenca (unidades de respuesta hidrológica en el modelo)?, ¿qué impacto tienen las decisiones de los productores de la cuenca alta sobre las cuencas media y baja, y viceversa? y ¿quiénes generan servicios ambientales y cuál sería el costo (precio sombra) que se debería pagar por éstos? Los datos que entrega el modelo Soil & Water Assesment Tool (SWAT)¹ y otros provenientes de encuestas y observaciones de campo son insertados en el modelo de programación lineal para calcular, entre otros resultados, el precio sombra de un metro cúbico de agua o de una tonelada de erosión en un área específica de la cuenca. Estos valores constituyen "precios de orientación" para las negociaciones que los agentes pueden realizar dentro de la formulación y adopción de políticas específicas o en esquemas de pago por servicios ambientales. Se trata sólo de una orientación, pues aún no existe un mercado de servicios ambientales en el que se pueda establecer un precio por unidad.

Se trata, entonces, de sustituir la ausencia de mercado por el diálogo político, buscando mecanismos de concertación y a través de una mejor información y formación de los actores. En estas circunstancias, resulta de vital importancia contar con información de buena calidad para realizar los análisis y las negociaciones.

Esta publicación es el producto del esfuerzo asociado entre el Proyecto Regional Cuencas Andinas, el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y el Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN). Es el resultado de la sistematización de las experiencias que han tenido los autores al trabajar, durante los últimos dos años, con diferentes agentes de diversas cuencas de Colombia y el Perú, así como de la interacción con investigadores, alumnos y personas que toman decisiones políticas.

El Proyecto Regional Cuencas Andinas es un esfuerzo mancomunado entre el Centro Internacional de la Papa (CIP) y el Gobierno de Alemania-Ministerio de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ). Para su ejecución, el CIP ha delegado sus funciones en CONDESAN y en la Red de Instituciones vinculadas a la Capacitación en Economía y Política Agrícolas de América Latina y el Caribe (REDCAPA); el Gobierno alemán, por su parte, delegó en la Cooperación Técnica Alemana (GTZ).

¹ El SWAT es un modelo desarrollado para cuantificar el impacto de diversas prácticas de manejo de suelos en las cuencas. Dentro de la metodología de análisis de cuencas que siguen CONDESAN y el Proyecto Regional Cuencas Andinas, el SWAT se utiliza para definir los balances hídricos y la cuantificación del volumen de erosión en las cuencas. Para mayor información, consultar <http://www.brc.tamus.edu/swat/>.

Agradecemos a Marcela y a Rubén Darío por la dedicación y el esfuerzo puestos en la elaboración del manual, y esperamos que éste sea utilizado por diversos profesionales e instituciones de los países andinos. A quienes lo usen, les pedimos tomar contacto con nosotros y enviarnos sus sugerencias y críticas con el fin de realizar los ajustes necesarios y contribuir en el mejoramiento de la gestión integral de las cuencas de los Andes.

Dr. Alonso Moreno Díaz

Asesor principal del Proyecto Regional Cuencas Andinas

Lima, marzo de 2006

Introducción

os proyectos de manejo de recursos naturales están siendo orientados hacia la preservación y/o restauración de las funciones ecológicas de los ecosistemas como forma de asegurar niveles adecuados de provisión de bienes y servicios ambientales. De esta manera, los análisis de cuenca están siendo enfocados hacia el entendimiento de la relación de causalidad entre los usos de la tierra y las tecnologías asociadas con su efecto sobre la calidad y cantidad de agua. El énfasis en entender esta relación esta dado porque la mayoría de los conflictos ambientales en las cuencas surge a partir de la inconformidad de quienes se ven afectados por la sedimentación, el déficit de agua en épocas secas, el incremento de inundaciones y la disminución de la potabilidad del agua.

Durante los últimos años, la sección de Análisis de Políticas del Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN) estudia las externalidades relacionadas con la dinámica hidrológica como eje prioritario para generar una nueva dinámica de desarrollo rural en las montañas de la región andina. Esta nueva dinámica se pretende iniciar a partir de una transferencia de capitales del sector urbano al rural, justificada por un cambio positivo en la provisión de los bienes y servicios ambientales por estas cuencas.

Desde el 2003 esta iniciativa de CONDESAN ha sido apoyada por la Cooperación Técnica al Desarrollo de Alemania (GTZ), constituyéndose formalmente el Proyecto Regional Cuencas Andinas. Entre los objetivos de este proyecto está desarrollar y aplicar capacidades relacionadas con los análisis de cuenca que permitan apoyar a las personas responsables de tomar decisiones sobre cambios en el uso de la tierra y prácticas de manejo que generen externalidades positivas. Este proyecto es impulsado en la ecorregión andina, incluyendo cuencas de Colombia, Ecuador y Perú.

Con este propósito, el Proyecto Regional Cuencas Andinas busca fortalecer los análisis de cuencas que permitan intervenir adecuadamente en estos ámbitos con esquemas de coinversión. Una de las maneras de apoyar estos procesos de análisis es desarrollando herramientas y metodologías que puedan ser usadas en las cuencas por todos sus socios locales. Una de estas herramientas es el modelo aquí presentado, que permite, entre otras cosas, evaluar de manera *ex ante* el impacto de cambios en el uso de la tierra sobre las externalidades hidrológicas y las condiciones socioeconómicas de los pobladores de las cuencas.

Este documento tiene como objetivo ilustrar y facilitar el manejo del modelo *Evaluación económica, social y ambiental de usos de la tierra* (ECOSAUT) por parte de los usuarios interesados en los análisis integrados de cuenca. Tanto el diseño del modelo como el de este manual están dirigidos hacia profesionales relacionados con el manejo de recursos naturales y con conocimientos de economía ambiental.

Este manual está estructurado en tres partes principales: primero se describirá el modelo, luego se explicará su utilidad y por último se expondrá cómo está estructurado y cómo funciona. La lectura de este documento debe hacerse simultáneamente con acceso al archivo Excel que contiene el modelo, para facilitar la comprensión de las explicaciones. La descripción del funcionamiento y la estructura del modelo se realizará haciendo referencia a cada una de las hojas de cálculo de Excel que lo componen. El modelo contiene información que corresponde a la misma utilizada en los ejemplos de este manual. La información contenida es válida únicamente para propósitos académicos; por lo tanto, si el usuario desea utilizar el modelo para sus propios objetivos, deberá inicializarlo.

¿Qué es y para qué?

os modelos de optimización son herramientas muy útiles en los procesos de análisis y manejo de las cuencas hidrográficas, ya que permiten identificar y diseñar estrategias de manejo de los recursos naturales que minimicen los posibles impactos ambientales y socioeconómicos que puedan generar las actividades antrópicas.

De esta manera, les permiten a los responsables de tomar decisiones demostrar los impactos en que pueden incurrir diferentes medidas relacionadas con la promoción de nuevas alternativas tecnológicas, el cumplimiento de políticas de uso del suelo, etcétera. Así, CONDESAN ha usado estos modelos para apoyar a los actores en la priorización de múltiples alternativas productivas.

El modelo ha sido diseñado de tal modo que represente un sistema agroecológico en el que las actividades o procesos se relacionan con las restricciones biofísicas y socioeconómicas, y tienen un impacto sobre los ingresos netos del productor y las externalidades ambientales.

Los modelos de optimización aplicados al manejo de los recursos naturales permiten identificar los valores óptimos de las variables de decisión (actividades o procesos) que maximizan o minimizan el objetivo de manejo en una cuenca (por ejemplo, aumentar ingresos netos) sin violar las restricciones impuestas (por ejemplo, nivel de caudal, tasa de sedimentación). El uso de programación lineal en el desarrollo y aplicación de estos modelos de optimización se ha mostrado exitoso para examinar y comparar el desempeño económico de diferentes actividades de acuerdo con el *trade off* con las externalidades ambientales.

El modelo de optimización que presentamos ha sido diseñado para entender las interrelaciones entre los sistemas de producción en una cuenca y sus

efectos sobre las condiciones socioeconómicas y ambientales de ese ámbito. Aunque existen otros modelos y metodologías que permiten hacer este tipo de interrelaciones, el Proyecto Regional Cuencas Andinas (CONDESAN-REDCAPA-GTZ) ha optado por este modelo debido a que permite:

- Modelar sistemas agroecológicos y relacionarlos con la problemática del manejo de recursos naturales para encontrar una respuesta a problemas por lo general complejos.
- Realizar análisis de impacto *ex ante* sobre cambios en el uso de la tierra o prácticas de manejo en una cuenca.
- Realizar análisis de impacto en períodos largos para evaluar los cambios en las externalidades. Estos cambios no podrían percibirse en un lapso corto después de la implementación de una alternativa. Esto se debe a que los cambios en las externalidades están relacionados con procesos biofísicos graduales en el tiempo (erosión, cambios en las propiedades del suelo, etcétera).
- Hacer un análisis integrado y simultáneo sobre el comportamiento de variables ambientales y socioeconómicas. De esta manera se evalúan alternativas que no sólo sean ambientalmente sostenibles, sino que mantengan o aumenten el ingreso rural.
- Detectar fácilmente cuál es el estado de las variables que describen el funcionamiento de un sistema. Entre estas variables, que se convierten en indicadores de estado, se encuentran las externalidades, que son objeto principal de este proyecto y que indican qué impacto para la sociedad tienen las alternativas adoptadas localmente.
- Reformular y reencontrar la solución óptima en la medida en que las condiciones del sistema cambian en el tiempo.
- Realizar análisis de *trade off*, que facilita a las personas que toman decisiones observar qué variables son complementarias, competitivas y/o sustitutivas por su impacto en la función que se quiere maximizar.
- Suministrar información cuantitativa por medio de un análisis de sensibilidad que refleje la importancia de las restricciones (precios sombra) impuestas sobre la solución.
- Valorar las externalidades ambientales por medio del precio sombra de las restricciones, siempre y cuando el modelo considere los costos y beneficios económicos de las diferentes actividades.

2

Descripción del modelo

► 2.1 Generalidades

El modelo está orientado a evaluar, para un período máximo de 10 años, cuál es la inversión mínima que necesita hacer la sociedad para mejorar las condiciones de vida de la población más pobre, estimando a su vez los *trade off* entre criterios de ingresos, productividad, sostenibilidad y riesgos, que permitan comprender mejor la naturaleza de las acciones promisorias. Para tal fin, el modelo se alimenta con la información biofísica básica generada en los análisis de cuencas, la información socioeconómica y la estimación del impacto de los fenómenos climáticos (heladas y sequías) sobre la productividad. De esta manera es posible integrar el análisis de las externalidades ambientales con la gestión y la mitigación de riesgos, y evaluar estos componentes según diferentes opciones de mercado y precios relativos de la mano de obra.

El modelo de optimización ayuda a calcular el costo de cambiar el uso de la tierra y las tecnologías según diferentes escenarios en el espacio y en el tiempo. Soluciones óptimas son el producto del *trade off* entre los intereses de los actores y la satisfacción de múltiples restricciones. En otras palabras, la optimización evalúa, de manera *ex ante*, el potencial económico y social de alternativas destinadas a mejorar las condiciones de vida y estimular la inversión privada y oficial para financiarlas.

Muchas experiencias han demostrado la dificultad para encontrar alternativas integrales que favorezcan la generación de empleo, la rentabilidad, la conservación ambiental y la equidad social. La integración de estos componentes requiere una unidad de análisis que permita hacerlo. El Proyecto Regional Cuencas Andinas utiliza unidades de respuesta hidrológica (URH), que son priorizadas —de acuerdo con un diagnóstico previo— por su potencial para cambiar las externalidades negativas. Este diagnóstico constituye una fase previa del análisis, por medio del cual se identifican las URH presentes en una cuenca y su impacto sobre los caudales y sedimentos en el actual escenario de uso del suelo. Este análisis se realiza con el modelo hidrológico Soil & Water Assesment Tool (SWAT), que relaciona las condiciones de los suelos, del relieve, de la precipitación y del uso de la tierra con la respuesta hidrológica.

Una vez que son priorizadas las URH que tienen mayor impacto sobre las externalidades de interés (por ejemplo, disponibilidad de agua en el caudal, aporte de sedimentos, etcétera), el modelo de optimización evalúa diferentes alternativas o nuevos escenarios de uso del suelo en estas URH para generar impactos positivos. El modelo también se puede aplicar para toda la cuenca o para dos o más URH.

Por último, el modelo presenta dos versiones: Ecosaut_Mod_03_1 y Ecosaut_Mod_03_6. La primera se utiliza cuando se desea realizar evaluaciones con 10 períodos anuales (a 10 años), y la segunda para evaluaciones que utilizan 10 períodos semestrales (5 años). Esto será determinado por el tipo de sistemas de uso de la tierra, es decir, si se están evaluando cultivos semestrales, anuales o coberturas permanentes.

►2.2Estructura del modelo

El modelo está construido sobre la base de la relación entre variables y alternativas de decisión. Las variables corresponden a las restricciones establecidas por las capacidades biológicas y económicas del sistema, por las consideraciones del productor o por las políticas de una región. Las alternativas de decisión se refieren a las actividades que se realizan en el sistema para mantener su funcionamiento.

La selección de las variables y alternativas de decisión corresponde al entendimiento de las interdependencias que se producen en una cuenca. Algunos ejemplos de interdependencias son los flujos hidrológicos unidireccionales, que determinan que las actividades realizadas aguas arriba tengan impactos aguas abajo (aporte de sedimentos, disminución del agua disponible, etcétera), la obtención de mayores ingresos a medida que se adoptan ciertos sistemas de producción, cultivos con mayor requerimiento de mano de obra y capital, coberturas que tienen un mayor efecto positivo sobre los caudales, etcétera.

En el cuadro 1 se presentan las principales variables y alternativas de decisión consideradas en este modelo. Con estas variables y alternativas interrelacionadas se construyó el modelo utilizando una hoja de cálculo

Excel (hoja *Optimización*), en la que se elaboró una matriz sobre la cual se hacen las optimizaciones con programación lineal.

Para facilitar el ingreso de los datos requeridos por la matriz, se han diseñado dos hojas adicionales dentro del mismo archivo Excel:

- Hoja 1, *Datos básicos:* en ésta se introducen al modelo los datos básicos para evaluar diferentes escenarios de uso de la tierra
- Hoja 2, *Datos calculados:* ahí se organizan los datos anteriores según el sistema de uso propuesto en *Datos básicos*.

Una vez que se evalúan los escenarios, se generan automáticamente algunas interpretaciones gráficas para analizar el comportamiento de las soluciones óptimas. Éstas se encuentran en la hoja 4, *Resultados*.

		ALT	ERN	ATI\	/AS	DE	DEC	ISIÓ	Ν	
VARIABLES	Rotaciones de cultivos (hectárea/número de años) con/sin prácticas de conservación de suelos	Bosques permanentes (hectárea)	Pasturas permanentes con/sin abonos verdes	Uso de concentrados en la ganadería	Número de vacas	Extracción de sedimentos de canales o lagunas (tonelada)	Ingresos ambientales (venta de servicios ambientales)	Contaminación con aguas residuales (nitrógeno, fósforo) (tonelada/semestre o año)	Compra y venta de mano de obra	Préstamos bancarios
Ingresos netos (número de años)	Х	Х	Х	Х	Х	х	Х		Х	Х
Flujos de efectivo	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х		Х	
Disponibilidad de tierra	Х	Х	Х							
Erosión por uso (tonelada/semestre o año)	Х	Х	Х			Х				
Contribución de agua al caudal por uso (metro cúbico/ hectárea/semestre o año)	Х	х	х		Х		х			
Nitrógeno aportado al caudal por uso (tonelada/	Х	х	х	Х	Х	х		х		
Fósforo aportado al caudal por uso (tonelada/hectárea/	х	х	х	х	Х	х		х		
Mano de obra por uso (número de jornales/semestre o	x	x	x						x	
ano) Producción de madera en plantaciones (tonelada/	~	x							~	
hectárea) Producción de madera en bosques nativos (tonelada/										
hectárea)		X								
kilogramo/hectárea)	Х		Х	Х	Х					
Producción de proteína para ganadería (kilogramo de materia seca/hectárea)	Х		Х	Х	Х					
Producción de leche (tonelada/semestre o año/vaca)					Х					
Producción de carne (tonelada/semestre o año/vaca)					Х	Х				

Cuadro 1. Interrelación entre variables y alternativas de decisión consideradas en el modelo.

▶ 2.2.1 Hoja 1: Datos básicos

Esta hoja ha sido diseñada para que el usuario ingrese los datos requeridos sin necesidad de modificar directamente la matriz de optimización de la hoja *Optimización*.

El tipo de información que el usuario debe ingresar está relacionado con:

Información sobre los sistemas de producción

Agricultura

- Cultivos y forrajes que forman parte del sistema de producción
- Diseño de rotaciones a 5 años (10 semestres)
- Costos para la instalación de cada cultivo o forraje (\$/hectárea)
- Mano de obra que utiliza cada cultivo en cada semestre
- El valor de un jornal para la compra y para la venta (también se considera la opción de generar ingresos trabajando fuera de la finca)
- Productividad por cada cultivo seleccionado en cada semestre o cosecha (tonelada/hectárea)
- Precios de productos agropecuarios (\$/tonelada)
- Prácticas de manejo (por ejemplo, zanjas de infiltración, barreras vivas, etcétera)*
 - o Área utilizada por cada práctica de manejo (hectárea)
 - o Costo de implementación de cada práctica de manejo (\$/hectárea)
 - o Momento de la rotación en que se implementan las prácticas de manejo

Ganadería*

- Peso por unidad animal (kilogramo)
- Consumo de agua por el ganado (litro/día/animal)
- Producción de leche (litro/día/animal)
- Producción de carne (kilogramo/semestre/animal)
- Valor de concentrados (\$/tonelada)
- Composición de concentrados para ganadería:
 - o Energía metabolizable (toneladas megacalorías/ toneladas concentrado)
 - o Proteína digestible (tonelada/tonelada de concentrado)
- Aportes de nitrógeno y fósforo al caudal provenientes de la ingesta de concentrados (tonelada/tonelada)
- Proteína y energía generada por forrajes (pastos, forrajes verdes, residuos de cultivos):

^{*} Opcional: según el caso, puede no ser necesario ingresar información con respecto a esta variable.

- Porcentaje de residuos de cada cultivo destinados para la alimentación del ganado (%/100)
- o Porcentaje de materia seca por tipo de forraje (%)
- Contenido de energía por cada tipo de forraje (megacalorías/ kilogramo)
- Contenido de proteína por cada tipo de forraje (kilogramo de proteína/kilogramo de materia seca)
- o Digestibilidad de la proteína (%)

Información relacionada con las externalidades por:¹

Procesos de sedimentación²

- Aporte de sedimentos por cultivo o forraje en cada semestre (tonelada/hectárea)
- Aporte de sedimentos por cultivo o forraje en cada semestre con la implementación de las prácticas de manejo (tonelada/hectárea)

Disponibilidad de agua en el caudal

- Aporte de agua al caudal por cultivo o forraje en cada semestre (tonelada/hectárea)
- Aporte de agua al caudal por cultivo o forraje en cada semestre con la implementación de las prácticas de manejo (tonelada/hectárea)
- Precio de venta del agua en cada semestre (\$/metro cúbico)

Captura de carbono

- Captura semestral de dióxido de carbono por cada cultivo o forraje (tonelada/hectárea)
- Valor de venta de dióxido de carbono (\$/tonelada)

Contaminación de agua

- Aporte de nitrógeno y fósforo (lixiviado) proveniente de fertilizantes por cultivo o forraje (tonelada/hectárea/semestre o año)
- Aporte de nitrógeno y fósforo proveniente de la erosión por cultivo o forraje (tonelada/hectárea/semestre o año)
- Aporte de nitrógeno y fósforo proveniente de la ingesta de forraje del ganado (tonelada/hectárea/semestre o año)
- Aporte de nitrógeno y fósforo proveniente de la ingesta de concentrados (tonelada de nitrógeno y fósforo/tonelada concentrado)

¹ Según la problemática de la cuenca, es posible que no todas las externalidades aquí consideradas sean motivo de estudio.

 $^{^{2}\,}$ El modelo utiliza información hidrológica generada por SWAT a partir de información climática diaria.

Información relacionada con los riesgos climáticos

- Impacto de las heladas sobre la producción semestral o anual de cada cultivo o forraje (% de disminución en la producción)
- Impacto de las sequías sobre la producción de cada cultivo o forraje (% de disminución en la producción)

► 2.2.2 Hoja 2: Datos calculados

En esta hoja, la información ingresada en la hoja 1 es organizada de acuerdo con las rotaciones diseñadas (sección 3.1) por el usuario, quien *únicamente* debe ejecutar los submenús del menú *Datos calculados* para que en la matriz (hoja 3, *Optimización*) se actualice la información.

2.2.3 Hoja 3: Optimización

En esta hoja se encuentra construida la matriz de programación lineal de acuerdo con la relación establecida entre actividades (variables de decisión) y restricciones. La información contenida en la matriz NO debe ser modificada por el usuario, a excepción de los límites permitidos para cada actividad y restricción (sección 3.3.1.4).

▶2.2.4 Hoja 4: Resultados

En esta hoja se visualizan automáticamente interpretaciones relacionadas con la solución óptima encontrada en la matriz de programación lineal (hoja *Optimización*). Las interpretaciones se vinculan a:

- La dinámica del uso de la tierra para el período evaluado
- La dinámica de aporte de sedimentos por cobertura para el período evaluado y la dinámica de aporte de agua al caudal por cobertura para el período evaluado
- La dinámica de utilización de mano de obra para el período evaluado
- La dinámica de retribución por jornal utilizado durante cada semestre o año (hasta 10 años)
- La dinámica de ingresos netos por cobertura para el período evaluado
- La dinámica de ingresos netos por actividades agrícolas, compensación por externalidades positivas generadas y venta de mano de obra durante el período evaluado

¿Cómo funciona?

▶3.1 Ingreso de información básica

Para utilizar el modelo, el usuario debe ingresar en la hoja *Datos básicos* del archivo Excel la información básica listada en el capítulo anterior.

Para facilitar el ingreso de los datos básicos, el modelo cuenta con una opción en su barra de menús, llamada *Datos básicos*. En esta opción se encontrarán submenús que conducen al usuario hacia cada uno de los aspectos para los que se requiere el ingreso de información básica (figura 1).

Orkan Bileton + Cittalan + Cattor Collaind	a + 1 Callin	ter + Reside	dos + Terri	tern 🖡							
(pair)	eth Ch	wan bidth	-								
TerreDiponilie	+	Ú.	н	1	1.2	×	5	м	19	0	P
Caste x Calture											
Coste/Brverstin en Ganaderia											
AnalConstitute, Martine de Harves	1 Section	Cultives	en la R	otachi	a						
Carlo de Extremise de Sederenies	diste	s-tax dracted	10.004.000	al mine	ment, alla	Lower, Mild	Eluptici .				
Market States	Time 1	Califie	Descrip	atiam .	Cubins	Dears	ripeti a				
	100	10			10	-			Unicarian	in the second	LAres dis
THE R. OF PTH N. ON PROCEEDINGS		11		_	19	101-11			Curers A1	la la	366.5
Here the Clave	rike	12	-		Panko 1	Lange			Cuare M	ndas -	3624
Yalor Jornal	-	10		_	Parks 2	5 Y 107	-		Louis Do		1944
Productivabally Colline -		15			Fortrad I		12				
Req. Nutric: y Pred. Leche/Carvo		16			Fernal 2						
Cospecture, Code: Suscentrador		Dete	1110	_					1	ales.	
Profeshallinergia de Frontaes		6	7		9	18	11	12	1	1	1
Definition Practical	•										+
Age Termsta											
Capture CO2		1 1		-					-	-	-
Appriedelti	•					-					
Apprinted									-		
Apartenti# pur Aques Pesidades											
Excettiny		+ +	-						-	-	-
Expecta de Heindes.										-	
Provide de Serguis						_		_	_	_	
	100				Cet	itos per	cultive	Inter	tion en	Gamad	lerita
	1					Cutron					1
1000 1000 000 1000	1		1		2	18	11	12	13	14	15

Figura 1. Hoja 1: Datos básicos. Menú de navegación

Una vez que usted se sitúa en esta hoja del modelo, los requerimientos de información y los pasos para ingresar la información correspondiente son los siguientes:

▶ 3.1.1 Cultivos en la rotación

El modelo está diseñado para ingresar un máximo de 19 cultivos, 2 tipos de bosque y 3 tipos de forraje. El usuario debe colocar frente a cada cultivo, bosque o forraje (cultivo 1, cultivo 2, etcétera) el nombre de éste. Esto quiere decir que la información que se solicite de ahora en adelante se referirá siempre al cultivo asociado en esta sección (figura 2).

Por ejemplo, si usted va a llamar *papa* al cultivo 1, entonces el resto de información básica que se ingrese para el cultivo 1 corresponderá al cultivo de papa (costos de producción, aporte de sedimentos, etcétera).

Esto permite que una misma cobertura se pueda diferenciar por su uso y/o por sus prácticas de manejo. Por ejemplo, en el cultivo 1 podemos colocar avena como cultivo para producción de grano, y en pastos 1 volver a colocar avena, pero que será utilizada como forraje. De esta manera, aunque es la misma cobertura, su información de producción, costos, etcétera será diferente dentro del modelo.

(Escriba e	Cultivos en la rotación (Escriba el nombre del cultivo - uso de interés (papa, cereal, quinua, avena, árbol, pasto, alfalfa, etc.)										
Cultivo	Descripción	Cultivo	Descripción	Cultivo	Descripción						
1	papa zona alta	9		17							
2	papa zona media	10		18							
3	trigo	11		19							
4	arveja zona media	12		pastos 1	kikuyo						
5		13		pastos 2							
6		14		pastos 3							
7		15		forestal 1							
8		16		forestal 2							

Figura 2. Hoja 1: Datos básicos. Ingreso de cultivos que se deben tener en cuenta en la modelación

► 3.1.2 Tierra disponible

En esta sección se deberá especificar el número de hectáreas de tierra para las cuales se evaluarán diferentes alternativas y se encontrará una solución óptima. La disponibilidad de tierra debe ser discriminada según su ubicación en la cuenca, es decir, qué cantidad de tierra se encuentra localizada en las partes alta, media y baja de la cuenca. Este aspecto es importante debido a que el uso de la tierra está relacionado con las variaciones climáticas que se producen según los cambios de altitud en las cuencas de la región andina (figura 3). El área de tierra disponible puede ser igual al área de las URH priorizadas a través del análisis hidrológico de la cuenca estudiada.³

Tierra disponible									
Ubicación	Área (Ha)								
Cuenca alta	166,5								
Cuenca media	162,6								
Cuenca baja									
Total	329,1								

Figura 3. Ingreso del área para evaluación de escenarios de uso de la tierra

► 3.1.3 Rotaciones

Una vez que usted ya ha seleccionado los cultivos que utilizará en la modelación, deberá organizarlos de tal manera que se refleje cómo es la dinámica de rotación de éstos durante un período de 10 semestres (5 años) (véase la figura 4). En algunos casos, los cultivos duran establecidos un año, y por lo tanto, cada semestre se puede asumir como un año, para tener una simulación de 10 años en total.

Es importante tener en cuenta las rotaciones debido a que el impacto en las externalidades se debe a cambios de cobertura en un sistema de producción dado. Es decir, el aporte de agua al caudal de una URH que permanece siempre en pastos no es el mismo que el aporte de esa misma URH si estuviera un año en pastos, el siguiente en papa y así sucesivamente.

¿Qué pasa si en su modelación hay tierra disponible en diferentes lugares de la cuenca, cuyas características varían por las condiciones climáticas?

En esta sección, usted tiene la opción de especificar si hará la rotación en la tierra disponible en la parte alta, media o baja de la cuenca. Para indicar que una rotación se implementa en la parte alta se colocará 1; si es en la parte media, 2; y en la parte baja, 3.

En el ejemplo de la figura 4, la rotación 1 es implementada en la parte alta de la cuenca, que es propicia para el cultivo de papa y pastos, mientras que la rotación 2 es implementada en la parte media de la cuenca, donde las condiciones climáticas son aptas para el cultivo de cereales.

³ Las URH son determinadas y caracterizadas por el Proyecto Regional Cuencas Andinas a través del modelo hidrológico SWAT.

El modelo permite diseñar hasta 12 rotaciones diferentes con los cultivos seleccionados en el paso 1. Cada rotación corresponderá a una variable de decisión o alternativa en la matriz de programación lineal. Esto significa que usted podrá encontrar una solución óptima considerando como máximo 12 posibles opciones de rotación.

Período		Rotación										Árb	Árboles		raje	
Ubicación en	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	1	2
la cuenca 🔺	1	2														
1	pastos 1	pastos 1														
2	cultivo 1	cultivo 2														
3	cultivo 1	cultivo 3														
4	cultivo 1	cultivo 4														
5	pastos 1	cultivo 3														
6	pastos 1	pastos 1														
7	pastos 1	pastos 1														
8	pastos 1	pastos 1														
9	cultivo 1	pastos 1														
10	cultivo 1	pastos 1														

Figura 4. Hoja 1: Datos básicos. Sección: Rotaciones

▶ 3.1.4 Costos por cultivo, bosque y/o forraje

Para cada uno de los cultivos, usted deberá ingresar cuáles son los costos de producción, sin incluir el valor de la mano de obra empleada (figura 5). El costo de los jornales se introducirá al modelo independientemente, con el propósito de evaluar alternativas teniendo en cuenta su potencial de generación de empleo. Para el caso de los sistemas ganaderos, se especificarán los costos de implementación de los forrajes seleccionados. Los costos se especificarán para cada período de tiempo (semestre o año), con el fin de simular la variación en los costos según la etapa de crecimiento del cultivo, bosque o forraje.

	Costos por cultivo / Inversión en ganadería															
Devíade		Cultivo														
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1814.0	1267.0	484.0	563.0												
2	1814.0	1267.0	484.0	563.0												
3	1814.0	1267.0	484.0	563.0												
4	1814.0	1267.0	484.0	563.0												
5	1814.0	1267.0	484.0	563.0												
6	1814.0	1267.0	484.0	563.0												
7	1814.0	1267.0	484.0	563.0												
8	1814.0	1267.0	484.0	563.0												
9	1814.0	1267.0	484.0	563.0												
10	1814.0	1267.0	484.0	563.0												

Figura 5. Datos básicos de costos de instalación de diferentes usos de la tierra

3.1.5 Costo e inversión requerida en ganadería

Adicionalmente a los costos de implementación de los forrajes especificados

en el paso anterior, los costos de manutención del ganado (animal/ semestre) y la inversión que se requiere para adquirirlo (\$/animal) deberán ser ingresados en esta hoja de calculo.

Los costos de manutención del ganado están relacionados con los requerimientos de sal y salud animal. Los costos de alimentación (forrajes y concentrados) se consideran independientemente, a través de la producción de forrajes y de la compra de concentrados. La inversión requerida se refiere al valor de la vaca, que está relacionado con su potencial de producción (carne o leche) a partir del primer semestre (figura 6).

Costos en inversión requerida en ganadería (\$ / período)										
Animal Ganado	1000.0	Costo por animal Gastos de sal y salud animal								
Gunddo	00.0	Gustos de sal y salad animal								

Figura 6. Costos e inversión requerida en sistemas ganaderos

En el modelo de optimización (sección 3.3), los flujos efectivos se ven afectados por la compra y venta de la vaca en cada semestre, teniendo en cuenta una depreciación del 5% y una mortalidad del 1%. Este cálculo se hace semestralmente, para que en la búsqueda de una solución óptima al tamaño del hato se puedan realizar ajustes tanto en la disponibilidad de forraje y/o compra de concentrado como en la disponibilidad de flujos de efectivo.

3.1.6 Prácticas de manejo (área, costo y mano de obra requerida)

El modelo da la posibilidad (variable de decisión) de implementar prácticas de manejo orientadas a disminuir la escorrentía y, en consecuencia, el aporte de sedimentos. Ejemplos de estas prácticas son las zanjas de infiltración y las barreras vivas, entre otros.

Para modelar su efecto sobre la externalidad y los ingresos del productor, es necesario que se ingrese el área que ocupan estas prácticas (hectáreas), su costo de implementación (\$ por hectárea) y el número de jornales necesarios para implementarlas (figura 7).

Área necesaria prácticas de	e manejo (haj)		
Práctica manejo 1 Práctica manejo 1				
Costo prácticas de mane	jo (\$ / ha)		Mano de obra prácticas de manejo (N.º	jornales / ha)
Práctica manejo 1 Práctica manejo 1			Práctica manejo 1 Práctica manejo 1	

Figura 7.

Hoja 1: Datos básicos. Sección: Prácticas de manejo (área necesaria, costos y mano de obra)

▶ 3.1.7 Extracción de sedimentos

Este aspecto ha sido incluido en el modelo debido a que una de las principales externalidades en las cuencas es el aporte de sedimentos, que con frecuencia debe ser mitigado con labores mecánicas de extracción en los lugares perjudicados —como canales de riego y represas para la producción de energía o el almacenamiento de agua—.

En esta sección, el usuario deberá especificar el costo de la extracción de una tonelada de sedimentos (figura 8). Debe tener en cuenta que el costo puede variar según el lugar donde se han depositado los sedimentos; es decir, puede ser más costoso extraer sedimentos del lecho de una laguna que de un canal.

Extracción de sedimentos	5
Costo (US\$/Ton)	15.0

Figura 8. Ventana para especificar el costo de extracción de una tonelada de sedimentos

► 3.1.8 Precio de los productos agropecuarios

El usuario deberá especificar en esta sección cuál es el precio de venta de una tonelada producida de cada cultivo (\$/tonelada/semestre o año) (figura 9). Es posible ingresar datos que simulen diferentes escenarios de variación en el precio de venta de un semestre o año a otro, por efectos de la tasa de cambio y/o de fluctuaciones del mercado, etcétera.

	Valor ventas (\$/Ton)															
		Cultivo														
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	200.0	200.0	195.0	300.0												
2	200.0	200.0	195.0	300.0												
3	200.0	200.0	195.0	300.0												
4	200.0	200.0	195.0	300.0												
5	200.0	200.0	195.0	300.0												
6	200.0	200.0	195.0	300.0												
7	200.0	200.0	195.0	300.0												
8	200.0	200.0	195.0	300.0												
9	200.0	200.0	195.0	300.0												
10	200.0	200.0	195.0	300.0												

Figura 9. Hoja 1: Datos básicos. Precio de venta de una tonelada de producción por cultivo

3.1.9 Tasa de interés de préstamos

En este paso, el usuario debe especificar la tasa de interés del préstamo bancario, en el caso de que se pretenda simular el efecto de éste sobre la solución óptima. Este dinero se considera un ingreso en el primer semestre (figura 10).

Préstamos	%
Tasa de interés	

Figura 10. Hoja 1: Datos básicos. Tasa de interés de prestamos

▶3.1.10 Mano de obra

Este aspecto no se incluye en los costos de producción y se registra de manera independiente debido a que el modelo está diseñado para evaluar escenarios en los que exista la opción de venta de mano de obra o de diferente disponibilidad de jornales en la región. Usted deberá colocar cuántos jornales son necesarios por cada hectárea de cultivo (cultivo 1, cultivo 2, etcétera) en cada período (semestre o año) (figura 11).

				ſ	Mano	de ol	ora po	or cul	tivo (j	ornal	es/ha)				
		Cultivo														
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	99.0	99.0	54.0	64.0												
2	99.0	99.0	54.0	64.0												
3	99.0	99.0	54.0	64.0												
4	99.0	99.0	54.0	64.0												
5	99.0	99.0	54.0	64.0												
6	99.0	99.0	54.0	64.0												
7	99.0	99.0	54.0	64.0												
8	99.0	99.0	54.0	64.0												
9	99.0	99.0	54.0	64.0												
10	99.0	99.0	54.0	64.0												

Figura 11. Hoja 1: Datos básicos. Requerimientos de mano de obra por cultivo

► 3.1.11 Precio del jornal

En este paso, deberá colocar el precio de un jornal para la compra o venta (figura 12). Es posible colocar fluctuaciones en el tiempo al precio del jornal, haciendo que su valor cambie de un semestre o año a otro.

Los jornales que se compran se refieren a los jornales de los trabajadores que se contratan fuera de la unidad familiar, mientras que la mano de obra que se puede vender incluye la mano de obra familiar.

	Valor jornal (\$)	
Período	Compra	Venta
1	6.5	6.5
2	6.5	6.5
3	6.5	6.5
4	6.5	6.5
5	6.5	6.5
6	6.5	6.5
7	6.5	6.5
8	6.5	6.5
9	6.5	6.5
10	6.5	6.5

Figura 12. Hoja 1: Datos básicos: Valor del Jornal en el área de estudio

► 3.1.12 Productividad por cultivo

Para cada cultivo, se deberá ingresar la productividad que se espera que tenga en cada semestre o año. Esta productividad, expresada en toneladas de materia verde por hectárea cultivada, puede variar de un semestre a otro (figura 13).

				Pr	oduct	tivida	d por	cultiv	/o (to	n/ha/j	perío	do)				
		Cultivo														
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	19.2	16.0	4.3	2.9												
2	19.2	16.0	4.3	2.9												
3	19.2	16.0	4.3	2.9												
4	19.2	16.0	4.3	2.9												
5	19.2	16.0	4.3	2.9												
6	19.2	16.0	4.3	2.9												
7	19.2	16.0	4.3	2.9												
8	19.2	16.0	4.3	2.9												
9	19.2	16.0	4.3	2.9												
10	19.2	16.0	4.3	2.9												

Figura 13. Hoja 1: Datos básicos. Productividad por cultivo (ton/ha)

3.1.13 Requerimientos nutricionales del ganado y producción de leche y carne

Para hacer el cálculo de energía metabolizable, proteína digestible, producción de leche y carne por animal durante el período evaluado (semestre o año) se requiere que el usuario ingrese el peso de una vaca adulta (kilogramos), la producción de leche diaria (litros), la producción de carne por semestre o año (kilogramos) y el consumo de agua (litro/día) (figura 14).

Esta información únicamente se requiere si una de las alternativas que se debe evaluar es un sistema productivo ganadero.

Requerimientos nutrici	onales y	producción de leche y carne por vaca									
Peso de la vaca 500.0											
Producción de leche (lt/día)	15.0	Producción de leche (ton/período)	2,196								
Producción de carne (kg/período)	20.0	Producción de carne (ton/período)	0.02								
Energía metabolizable (mgcal/período)	2,437										
Proteína digestible (ton/período)	0,108										
Consumo de agua (lt/día)	100.0	Consumo de agua(m³/período)	18.3								

Figura 14.

Hoja 1: Datos básicos. Requerimientos nutricionales de ganado y su producción de carne y leche

¿En qué forma calcula el modelo la energía metabolizable y la proteína digestible, la producción de leche y carne, y el consumo de agua anual/semestral?

Para hacer estos cálculos, el modelo asume que la producción animal es lechería especializada y que la producción de carne corresponde al peso de los animales recién nacidos, asumiendo que éstos se venden durante los tres primeros días.

Energía metabolizable

Se estima la energía necesaria para el mantenimiento y la producción de leche y carne sobre la base de los requerimientos del National Research Council. Para el mantenimiento diario se multiplica el peso metabólico (peso vivo ^0,75) por el coeficiente 0,12. Para la producción de leche, se multiplica la producción de leche por 1,07 megacalorías, que es la energía necesaria para producir un litro de leche con 3% de grasa (NRC 1989). Este resultado se incrementa en 0,6 megacalorías, que es la energía necesaria para suplir los requerimientos de los últimos 100 días de gestación. Para el aumento de peso diario, se multiplica el aumento de peso durante el período evaluado (semestre o año) por el coeficiente 7,44. La suma de la energía necesaria para la producción de leche y el aumento de carne se divide entre 1.000 para obtener miles de megacalorías.

Proteína digestible

Se hace el mismo cálculo que se emplea para calcular la energía metabolizable, pero variando los coeficientes. El coeficiente para calcular la proteína necesaria para el mantenimiento de la vaca es 0,002837 y el coeficiente para calcular la proteína necesaria para la producción de leche es 33,5 g. Para suplir los requerimientos de la preñez (últimos 100 días) se necesitan 60 kilogramos y esto se ajusta según la longitud del período evaluado (año o semestre), ya que sólo se produce una preñez por año. Para el aumento de peso, se multiplica el aumento de peso promedio diario durante el período evaluado (semestre o año) por 1,09, que es el requerimiento de proteína digestible para que una vaca en pastoreo aumente un kilogramo. La suma de la proteína necesaria para la producción de leche y el aumento de carne se divide entre 1.000 para obtener toneladas de proteína digestible.

Producción de leche por período

Es el resultado de la producción de leche diaria multiplicado por el número de días de los intervalos de la simulación (un semestre o un año) y dividido entre 1.000 para obtener las toneladas de leche semestrales o anuales que se producirían. A este resultado se le descuenta el 20% del tiempo que la vaca se encuentra sin producir, es decir, se multiplica por 0,8.

Producción de carne

Para unificar las unidades de medición, los kilogramos de carne que se producirían en un semestre son convertidos en toneladas de carne semestrales.

Consumo de agua

El consumo semestral se estima sobre la base del consumo diario. Este resultado se expresa en toneladas/semestre.

3.1.14 Composición y costos de concentrados para alimentación de ganado

En este modelo se considera el suministro de concentrados, pues tiene una gran relación con la productividad, la capacidad económica del productor y los aportes de nitrógeno y fósforo a los cuerpos de agua. Por tal razón, se les da un gran énfasis a la digestibilidad y a la concentración de nitrógeno y fósforo en estos alimentos.

En esta parte, el usuario deberá ingresar el precio de los concentrados, incluyendo las variaciones que puedan tener durante el período simulado; la composición de proteína (toneladas megacalorías/toneladas concentrado) y energía (toneladas/toneladas concentrado) que estos poseen; y la cantidad de nitrógeno y fósforo de los concentrados que retorna al sistema (suelos y agua) (figura 15).

¿Cómo calcular la energía metabolizable y la proteína digestible suministradas por los concentrados en la alimentación del ganado?

El usuario deberá averiguar cuál es la cantidad de energía metabolizable y proteína digestible que contiene el concentrado que se suministra en el sistema que está modelando.

¿Cómo calcular la cantidad de nitrógeno y fósforo contenida en los concentrados que retorna al suelo y el agua?

Este cálculo se hace automáticamente en la hoja de Excel teniendo en cuenta la información ingresada anteriormente en esta misma sección. Por tal razón, recomendamos *no modificar* la fórmula de esta celda. Sin embargo, a continuación explicaremos el significado de estas fórmulas.

Cálculo de nitrógeno

Para calcular la cantidad de nitrógeno contenida en los concentrados y que retorna al suelo, se toma la cantidad de proteína digestible calculada anteriormente en esta misma sección y se multiplica por 0,8 para obtener la proteína total. A este resultado se le descuenta el 80% — debido a que sólo un 20% de la proteína no se digiere y es expulsada en las excretas— y se divide entre 6,25, que es el factor relacionado con el contenido de nitrógeno. De esta manera obtenemos el nitrógeno presente en las excretas, del cual se estima que sólo un 20% se adiciona al suelo y se lixivia.

Cálculo de fósforo

El contenido de fósforo en un kilogramo de concentrado es del 2%, del cual un 20% no es digerible y se expulsa en las excretas. A su vez, un 20%

del contenido de fósforo depositado en las excretas del ganado se incorpora al suelo y se lixivia.

I	Composición y costos de concentrados para alimentación de ganado													
Período	\$ (USD)/ton													
1	300.0] r		<u> </u>	managición									
2	300.0		- /		omposicion	2.54								
3	300.0]	Energia me	tabolizable (ton mo	gcal/ton concentrado	2.64								
4	300.0	Proteína digestible (ton/ton concentrado)												
5	300.0	1												
6	300.0			Dautaa da Nuu										
7	300.0	1		Portes de N y l	P (ton. concentrados)									
8	300.0	1		N	0.00096									
 	200.0			Р	0.00080									
9	300.0	-												
10	300.0													

Figura 15.

Hoja 1: Datos básicos. Composición y costos de concentrados, y sus aportes de nitrógeno y fósforo al sistema

3.1.15 Aporte de energía y proteína de forrajes, barbechos y/o rastrojos al balance nutricional del ganado

En el paso 13 se calcularon los requerimientos de energía y proteína por animal en un semestre. En este paso se calcula cuál es la contribución de los forrajes y/o residuos de cultivos para satisfacer tales requerimientos nutricionales.

Con este propósito, el usuario debe señalar, para el caso de los cultivos, el porcentaje de residuos de cosecha que se utilizan en la alimentación de ganado. Para el caso de las pasturas, este porcentaje corresponderá al 100% (figura 16).

Luego, se calcula para cada tipo de forraje el porcentaje de materia seca, y las megacalorías (energía) metabolizables y kilogramos de proteína bruta por kilogramo de materia seca. Para el caso de la proteína, es necesario colocar cuál es el porcentaje de digestibilidad de ésta en cada tipo de forraje.

Esta información únicamente se requiere para los cultivos y pastos que se empleen para la alimentación del ganado en el escenario que se esté modelando. En caso de que no se utilicen los residuos de los cultivos con este propósito, se deberá asignar el valor 0 en las celdas correspondientes.

En esta sección el usuario necesita la orientación de una persona que maneje conceptos de balance nutricional en ganadería.

	Protein	a y energia g	enerada por	forrajes		
	Cultivo	% residuos	% materia seca	mgcal/kg	kg prot/kg mat. seca	Digestib. proteina
1	(residuos cosecha)					
2	(residuos cosecha)					
3	(residuos cosecha)					
4	(residuos cosecha)					
5	(residuos cosecha)					
6	(residuos cosecha)					
7	(residuos cosecha)					
8	(residuos cosecha)					
9	(residuos cosecha)					
10	(residuos cosecha)					
11	(residuos cosecha)					
12	(residuos cosecha)					
13	(residuos cosecha)					
14	(residuos cosecha)					
15	(residuos cosecha)					
16	(residuos cosecha)					
17	(residuos cosecha)					
18	(residuos cosecha)					
19	(residuos cosecha)					
Pastos 1	- · · ·	100.0%	20.0%	2.0	0.1	0.6
Pastos 2						
Pastos 3						

Figura 16. Contribución de los forrajes y/o cultivos a la alimentación ganadera

▶ 3.1.16 Definición de las prácticas de manejo

En este paso, el usuario decide en qué momento de la rotación (durante el período de 5 ó 10 años) implementará alguna de estas prácticas. De esta manera, para las rotaciones diseñadas en el paso 7 el usuario decide en qué semestre (o año) realizará la práctica ingresando el número 1, o el número 0 en caso de que no se implemente (figura 17).

			P	roduct	ividad	por ma	anejo 1	(1=Sí,	0=No)			
Denteda							Rotaciór	ı					
Período - 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 - - - - - - - - - - - - -	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
			P	roduct	ividad	por ma	anejo 2	(1=Sí,	0=No)			
						-	Rotaciór	ı					
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													

Figura 17. Implementación de prácticas de manejo en cada período de la rotación

▶ 3.1.17 Aporte de agua al caudal por cultivo

Una de las principales externalidades ambientales que se tiene en cuenta en los análisis de cuencas es la cantidad de agua disponible en el caudal en un punto determinado en el tiempo y en el espacio.

Para mantener un nivel de agua disponible en el lugar deseado es necesario conocer la relación de causalidad entre los diferentes usos de la tierra y la disponibilidad del recurso agua. Debido a que no todos los usos tienen el mismo impacto sobre los caudales, en esta sección se requiere que se especifique la cantidad de agua (metros cúbicos) que cada URH evaluada aporta al caudal por escorrentía, infiltración y flujo lateral. Esta cantidad de agua se calcula semestral o anualmente para cada uno de los cultivos de la rotación (figura 18).

La información de aporte de agua al caudal por cultivo semestral (o anual) es originada por el modelo SWAT para cada URH.

				Ag	ua ge	nerad	da po	r culti	ivo (m	n³/ha/∣	perío	do)				
		Cultivo														
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	5.39	5.47	5.49	5.49	10.78											
2	12.06	11.92	11.92	11.92	24.12											
3	2.12	2.32	2.32	2.32	4.24											
4	42.35	36.72	36.73	36.73	84.70											
5	97.52	102.12	102.12	102.12	195.05											
6	42.77	42.37	42.38	42.38	85.54											
7	67.00	66.60	66.00	66.00	134.00											
8	67.00	66.60	66.00	66.00	134.00											
9	67.00	66.60	66.00	66.00	134.00											
10	67.00	66.60	66.00	66.00	134.00											

Figura 18. Aporte de agua al caudal por cultivo cada semestre

3.1.18 Aporte de agua al caudal por cada cultivo implementado con prácticas de manejo

Las prácticas de manejo también pueden estar diseñadas para reducir los picos de escorrentía y/o aumentar la capacidad de retención de agua en el perfil, y en consecuencia aumentar el aporte de agua al caudal por una cobertura dada. Por tal razón, en el modelo es necesario conocer no sólo el aporte por cultivo sin prácticas de manejo (paso 17) sino también con la implementación de éstas (figura 19).

Esto permite evaluar en la matriz de programación lineal cuánto le representa al productor realizar una práctica de manejo con relación a sus ingresos netos y establecer en qué condiciones pueden ser implementadas estas prácticas (incentivo económico, regulación externa, etcétera). La información de aporte de agua al caudal con la implementación de estas prácticas en cada cultivo semestral o anual puede ser originada por el modelo SWAT para cada URH o provenir de investigaciones previas.



3.1.19 Contribución de las coberturas a la captura de dióxido de carbono (CO2)

La captura de dióxido de carbono se tiene en cuenta en este modelo debido a que es un servicio ambiental que a raiz de su reciente papel en el mercado puede incidir en la selección de alternativas productivas más favorables para el sector rural, contribuyendo a los ingresos netos de los productores.

En caso de que éste sea un factor de interés y que además exista información disponible, el usuario deberá especificar en esta sección qué cantidad de dióxido de carbono (toneladas de dióxido de carbono) es capturada por cada cultivo en cada semestre o año (figura 20).

	Captura de Co ₂ (ton/ha)															
	Cultivo															
3	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19															

Figura 20. Cantidad de dióxido de carbono capturado por cada cobertura vegetal

► 3.1.20 Aporte de nitrógeno al caudal

Los efectos adversos por contaminación del agua en las cuencas constituyen otra externalidad negativa de gran importancia; la sociedad puede estar interesada en minimizarla por medio de usos de la tierra y prácticas de manejo que aporten menor cantidad de nitrógeno y fósforo a los caudales.
Las principales fuentes de nitrógeno y fósforo en las cuencas son las fertilizaciones de los cultivos y pastos, los sedimentos causados por procesos erosivos y las excretas del ganado. Por tal razón, en este modelo se tienen en cuenta estas tres fuentes para relacionar el uso de la tierra con la contaminación de agua y los procesos de eutroficación de lagunas ubicadas aguas abajo de las zonas contaminantes.

En esta sección, el usuario deberá ingresar los valores correspondientes a los siguientes aspectos para cada cultivo por semestre o año (figura 21):

- La cantidad de nitrógeno (toneladas/hectárea/semestre o año) aplicado en los fertilizantes que se lixivia y se aporta al caudal.
- La cantidad de nitrógeno (toneladas/hectárea/semestre o año) que se transporta en los sedimentos asociados a procesos erosivos y que se aporta al caudal.



Figura 21. Aportes de nitrógeno de la fertilización, erosión y excretas de ganado a cauces de agua y lagunas, represas o lagos

Este valor se multiplica automáticamente por la cantidad de toneladas de sedimentos que cada uso de la tierra aporta en la cuenca. Este último valor proviene del paso 23. El usuario únicamente debe cambiar el valor correspondiente a los kilogramos de nitrógeno existentes en una tonelada de sedimentos.

• La cantidad de nitrógeno que contienen las excretas del ganado.

Este valor es calculado automáticamente por el modelo, y es el resultado del producto entre la productividad del cultivo (toneladas/ hectárea), la cantidad de residuos de cosecha utilizados para la alimentación del ganado, el porcentaje de materia seca de esos residuos de cultivo o pastos, la cantidad de proteína de estos forrajes y la digestibilidad de la proteína. Estos datos ya han sido ingresados en secciones previas. Este resultado es dividido automáticamente entre 6,25, que es la relación de proteína/nitrógeno, y entre 0,2, que se refiere a un 20% del nitrógeno existente en la boñiga y que es lixiviado.

3.1.21 Aporte de fósforo al caudal, lagos, lagunas o represas

Los efectos adversos por contaminación del agua en las cuencas constituyen otra externalidad negativa de gran importancia; la sociedad puede estar interesada en minimizarla por medio de usos de la tierra y prácticas de manejo que aporten menor cantidad de nitrógeno y fósforo a los caudales.

En esta sección, el usuario deberá ingresar los valores correspondientes a los siguientes aspectos para cada cultivo por semestre o año (figura 22):

 La cantidad de fósforo (tonelada/hectárea/semestre o año) aportada por la fertilización que se pierde por disolución del fertilizante aplicado en la escorrentía.

Para estimar este valor en el modelo de optimización adjunto, se ha asumido que el fósforo aplicado se fija en los primeros 5 centímetros del suelo. Estudios previos muestran que el fósforo disuelto en la escorrentía está relacionado con la cantidad de fertilizante aplicado. Por ejemplo, los máximos valores de fósforo perdido en escorrentía en cultivos de papa corresponden a un 10% del fósforo aplicado. Para mejorar el cálculo de este valor se debe tener en cuenta la escorrentía que se genera en cada cobertura y que es calculada por SWAT. Para encontrar el valor adecuado es necesario contar con la participación de un especialista en fertilidad de suelos.

 La cantidad de fósforo (tonelada/hectárea/semestre o año) que se transporta en los sedimentos asociados a procesos erosivos y que se aporta al caudal.

La concentración de fósforo en los sedimentos debe multiplicarse por la cantidad de toneladas de sedimentos que cada uso de la tierra aporta en la cuenca. Este valor proviene del paso 23 y ya está programado en este paso. El usuario únicamente debe cambiar el valor correspondiente a la concentración de fósforo (kilogramos de fósforo existentes en una tonelada de sedimentos).

• La cantidad de fósforo que contienen las excretas del ganado.

Este valor es calculado automáticamente por el modelo, y es el resultado del producto entre la productividad del cultivo (tonelada/ hectárea), la cantidad de residuos de cosecha utilizados para la alimentación del ganado, el porcentaje de materia seca de esos residuos de forraje y la digestibilidad. Este valor representa la cantidad de boñiga, de la cual un 0,5% es fósforo. De este contenido de fósforo, un 90% es orgánico, 70% del cual no es asimilado por la planta. El 50% de esta última cantidad se lixivia.

Para verificar esta información, CONDESAN está aplicando nuevas tecnologías que le permiten cuantificar vertimientos no puntuales de nitrógeno y fósforo. Para tal fin, está utilizando análisis de isótopos naturales que permitan identificar el origen de las diferentes fuentes de contaminación. Así mismo, esta información puede ser obtenida a través de modelos de calidad de agua que tengan en cuenta el impacto del uso de la tierra. Para obtener esta información es necesario el apoyo de un especialista en química de suelos y alimentación animal.

			NI/+	on/h	22) E	orti	lizar	ián	(nó	rdid	2 20	r di	مان	ción	00		cor	ront	(a)			
			14(1	.011/1	ia) r	eru	lizat	.1011	(pe	uiu	a pu Cub	tivo	soiu	cion	en	ia e:	scor	rent	14)	Pas	tos	
Período	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	1	2	3
1	0.0131	0.0131	0.0003	0.0026	_	-		-	_											0 0009	_	-
2	0.0131	0.0131	0.0003	0.0026																0.0009		
3	0.0131	0.0131	0.0003	0.0026																0.0009		
4	0.0131	0.0131	0.0003	0.0026																0.0009		
5	0.0131	0.0131	0.0003	0.0026																0.0009		
6	0.0131	0.0131	0.0003	0.0026																0.0009		
7	0.0131	0.0131	0.0003	0.0026																0.0009		
8	0.0131	0.0131	0.0003	0.0026																0.0009		
9	0.0131	0.0131	0.0003	0.0026																0.0009		
10	0.0131	0.0131	0.0003	0.0026						L	L		,							0.0009		
									N(te	on/h	a) E	rosi	ón							_		
Período				-						-	Cul	tivo								Pas	tos	
renouo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	1	2	3
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.000
2	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000
4	0.0010	0.0015	0.0015	0.0015	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0008	0.0000	0.000
5	0.0030	0.0038	0.0055	0.0055	0.0010	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0011	0.0000	0.000
6	0.0013	0.0016	0.0019	0.0019	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0000	0.000
7	0.0019	0.0023	0.0031	0.0031	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0009	0.0000	0.000
8	0.0019	0.0023	0.0031	0.0031	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0009	0.0000	0.000
10	0.0019	0.0023	0.0031	0.0031	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0009	0.0000	0.000
10 1	0.0019	0.0025	0.0051	0.0051	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	N(+4	<u>nn/h</u>	a) B	onic	12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0009	0.0000	0.000
									14(14	511/11		tivo	ju							Pac	tos	
Período	1	2	2	4	E	6	7	0	0	10	11	12	12	14	15	16	17	10	10	1	2	2
1	0.0000	2	3	4	0.0000	0 0000		0	9	10	0.0000	12	1.5	14	13	10	0.0000	10	19	0.0044	2	3
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0044	0.0000	0.000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0044	0.0000	0.000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0044	0.0000	0.000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0,0000	0.0000	0.0000	0,0000	0,0000	0.0000	0,0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0,0000	0.0044	0,0000	0,000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0044	0.0000	0.000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0044	0.0000	0.000
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0044	0.0000	0.000
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0044	0.0000	0.000
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0044	0.0000	0.000
					P to	tal (ton/	'ha)	(ero	siór	1 + 1	erti	lizad	ión	+ b	oñig	ga)					
Período											Cul	tivo		-						Pas	tos	
renouo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	1	2	3
1	0.0131	0.0131	0.0003	0.0026	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0055	0.0000	0.000
2	0.0133	0.0133	0.0005	0.0029	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0054	0.0000	0.000

Figura 22. Aportes de fósforo de la fertilización, erosión y excretas de ganado a cauces de agua y lagunas, represas o lagos

3.1.22 Aporte de nitrógeno y fósforo por agua residuales

En este paso, el usuario debe proporcionar la cantidad de nitrógeno y fósforo que los vertimientos de aguas residuales urbanas aportan a los caudales (figura 23). La cantidad de nitrógeno y fósforo debe ser ingresada para cada semestre o año, con el propósito de reflejar las posibles variaciones que puedan darse con el transcurso del tiempo.

Aporte de N y P	al caudal por las	aguas redisuales
Período	N	Р
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Figura 23. Datos básicos. Contribución de vertimientos de aguas residuales a las concentraciones de fósforo y nitrógeno al caudal

▶3.1.23 Erosión por uso de la tierra

Este aspecto se refiere al aporte de sedimentos que cada uso productivo hace al caudal. Esta información ha sido incluida en el modelo debido a que una de las mayores externalidades generadas en las cuencas andinas está relacionada con procesos de sedimentación aguas abajo (por ejemplo, lagunas, represas hidroeléctricas, etcétera) por cuya disminución la sociedad estaría dispuesta a pagar.

La fuente de esta información proviene del modelo SWAT, que modela los parámetros hidrológicos para cada URH de una cuenca —la cual tiene condiciones similares de uso, suelo, pendiente y precipitación—. Uno de estos parámetros hidrológicos es el aporte de sedimentos al caudal. Esta información se ingresará en la hoja *Datos básicos* (figura 24).

Es aconsejable que mediante el modelo de optimización se encuentren soluciones óptimas de alternativas que disminuyan la externalidad negativa sólo para URH que hayan sido priorizadas por su impacto mayor sobre las externalidades (agua, sedimentos, etcétera) a partir de simulaciones previas con SWAT.

	Erosión por uso (ton/ha/período)															
- / -								с	ultivo							
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.813	0.657	0.963	0.963	0.271											
2	11.276	12.200	13.694	13.694	3.759											
3	0.119	0.059	0.114	0.114	0.040											
4	51.657	72.700	76.186	76.186	17.219											
5	151.485	189.140	274.601	274.601	50.495											
6	65.708	81.000	95.057	95.057	21.903											
7	93.000	117.000	152.600	152.600	31.000											
8	93.000	117.000	152.600	152.600	31.000											
9	93.000	117.000	152.600	152.600	31.000											
10	93.000	117.000	152.600	152.600	31.000											

Figura 24. Hoja 1: Datos básicos. Aporte de sedimentos por cultivo durante 10 semestres

3.1.24 Aporte de sedimentos con prácticas de manejo

El resultado esperado tras la implementación de una práctica de manejo es que disminuya el aporte de sedimentos. Por este motivo, se requiere tener la información sobre cuál es el aporte de sedimentos con la implementación de estas prácticas, dato que será usado por el modelo para calcular el cambio marginal de esta externalidad.

La información sobre el aporte de sedimentos con la práctica de manejo puede provenir del modelo SWAT, el cual permite simular usos de la tierra y especificar sus prácticas de control de erosión. Esta información también puede provenir de investigaciones previas en la zona de estudio y/o sobre el impacto de estas prácticas en zonas similares. La cantidad de sedimentos aportados por cultivo en cada semestre o año debe ser ingresada en la hoja 1 o de entrada de datos básicos al modelo (figura 25).

	Erosión por cultivo (ton/ha/período) práctica manejo 1															
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
	Eigura 25															

Aporte de sedimentos por cultivo una vez implementada una practica de manejo para control de erosión

3.1.25 Impacto de fenómenos climáticos (heladas)

Esta sección ha sido diseñada ante la necesidad, presente en algunas cuencas andinas, de encontrar una solución óptima que tenga en cuenta el impacto de las heladas y las sequías sobre la productividad agropecuaria.

Con este fin, el usuario debe digitar el porcentaje en que se ve reducida la productividad de cada cultivo cuando es expuesto a los efectos de bajas temperaturas o precipitaciones cada semestre o año (figura 26). Esta información proviene de unos cálculos preliminares que se realizan con el modelo de simulación y un sistema especializado elaborado por Arce (1991), en el que se estima cuál es la incidencia de las sequías y heladas en la producción.

	Impacto de la helada (% de la producción) Helada tipo 1															
								Cu	tivo							
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	20.0	10.0	10.0	10.0	20.0											
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0											
3	20.0	10.0	10.0	10.0	20.0											
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0											
5	20.0	10.0	10.0	10.0	20.0											
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0											
7	20.0	10.0	10.0	10.0	20.0											
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0											
9	20.0	20.0 10.0 10.0 10.0 20.0														
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0											

Figura 26. Impacto de heladas y sequías en la productividad de cultivos

En la figura 27 se presenta el impacto de las heladas en la producción de papa según el estado fenológico en el que disminuye la temperatura. En la figura 28 se presenta la incidencia de la precipitación acumulada en los estados de llenado y tuberización.



Impacto de la temperatura mínima en los niveles de producción de papa según el estado fenológico

Para saber cuál es el momento en el que se producen estos fenómenos, CONDESAN ha tenido en cuenta estudios previos sobre la probabilidad y frecuencia de las heladas en el altiplano peruano-boliviano. Se ha encontrado que aunque éstas se producen con muy alta frecuencia, presentan una gran heterogeneidad regional (Le Tacon et al. 1991). Esto implica que se debe estimar, para cada URH, cuál es la probabilidad de descensos en la temperatura diaria.

Para conocer este dato, CONDESAN utiliza la relación entre la humedad relativa nocturna mínima del día anterior y la temperatura mínima del día siguiente, expuesta por Vacher (1988) y Le Tacon (1989). De esta manera, se propone estimar la humedad relativa del día anterior y utilizarla como una variable *proxi* de la disminución de la temperatura del día siguiente, aplicando la relación mencionada. La humedad relativa es calculada para cada URH utilizando el modelo SWAT.

3.1.26 Impacto de fenómenos climáticos (sequías)

Para el caso de la ocurrencia de sequías, la probabilidad de que suceden se calcula sobre la base de la precipitación diaria utilizada por SWAT para hacer los balances hídricos. A partir de éstos, se estiman dos coeficientes por cada URH: la evapotranspiración real con base en la disponibilidad de agua en el suelo y la cantidad de precipitación acumulada por estado fenológico. Ambos coeficientes se calculan para las etapas de floración y tuberización. Con estos datos se calcula el impacto de las precipitaciones en la producción (figura 28).



Figura 28:

Impacto de la precipitación acumulada en la etapa de llenado y tuberización del cultivo de papa

Actualmente, el Proyecto Regional Cuencas Andinas sólo conoce cuál es el impacto de las heladas y las sequías en la productividad del cultivo de papa y propone una metodología para calcular el momento en que estos fenómenos ocurren. Sin embargo, es posible que otro usuario del modelo de optimización cuente con información sobre el impacto de estos fenómenos en otros cultivos e incluso con otras aproximaciones metodológicas. Esto significa que para completar esta sección, no es necesario utilizar la metodología del proyecto si es que ya existe la información del porcentaje de la productividad de un cultivo afectada por heladas y sequías en un momento dado en el tiempo.

► 3.2 Organizacion de datos para modelar

Los datos ingresados en la hoja 1 deben ser ordenados de tal manera que correspondan con el diseño de las rotaciones que el usuario ha hecho en el paso 3 de la sección anterior.

Para realizar esta organización de los datos, antes de utilizar la matriz de programación lineal de la hoja *Optimización*, el usuario debe ir a la hoja *Datos calculados* y ejecutar cada una de las opciones que se encuentran en el menú de la parte superior de la ventana *Cálculos* (figura 29).

2 2	de de	acol ICC gas p	NAUT I Set Pj	And MO20 Mail: Date	Ol Manue General Calulation	urs gebourge	elo a e l Reali	inter - Te	nim -					749	e a question	for help	
1 2 3 4	a a c	U		Droskin Broskin Pra Droskin Pra Broteina Drenyle Drenyle Drenyle Drenyle Drenyle Drenyle Drenyle	ictica Manejo ictica Manejo Ato NOME	1 2 4	Z	AA				in the second se	<u>بر م</u>	AS	HA	41	2
0.07	Proiede	1		Jonales Aqua			Ret	terbia 7	8	1 9	10		12	44	ales 2	1	Ferraj 2
000000000000000000000000000000000000000	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	80 18340 18340 18340 18340	- 11 W W U	Apo hid Apo hid Ophes C Noigero Disfero	ica Mareja 1 Ica Mareja 2 Ica												
10	Total	9018.0	2960	30	0.0	3.0	0.8	0.0	03	0.0	6.3	6.0	60	6.0	80	0.0	80
20]	Ingreso	por ve	nta de p	roduct	0 (S.Ha)				1	Toduct	ividad	(Ton 3
21	Preisde	1		1.1	1.4		6	7		0	10	11	12	1	2	1	Farrage 2
2,21,20,20,20,20,20,20,20,20,20,20,20,20,20,	12345578910	80 3040.0 3012.0 2040.0 80 80 80 3012.0 3040.0	00 32010 7547 1710 7547 00 00 00 00 00 00 00											22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22			
	* *\\D	atos Básko	5) D#0	n Calcular	llos / Sera	away kapa	ots / C	phiaki	/ Real	atios /		×	1.46				- ×1

Figura 29. Hoja 2: Datos calculados. Menú Cálculos

Así mismo, para esta hoja se ha diseñado otro menú llamado *Datos calculados*, que permite navegar ágilmente por los diferentes aspectos calculados por las opciones mencionadas con anterioridad (figura 30).



Figura 30. Hoja 2: Datos calculados. Menú Datos calculados

►3.3 Matriz de programación lineal

(Hoja Optimización)

Para un manejo apropiado del sistema, es necesario encontrar los valores óptimos de las variables de decisión (controlables) que maximizan o minimizan el objetivo de manejo (función objetivo) sin violar las restricciones impuestas. Las variables de decisión son aquellas que pueden ser controladas por la persona que toma decisiones y cuyos valores determinan el impacto sobre el sistema. El estado del sistema se mide con variables internas que reflejan su funcionamiento.

La matriz de programación lineal es usada para encontrar la *solución óptima* en la medida en que se maximiza la función objetivo, que en este caso corresponde a los ingresos netos de los pobladores rurales. De esta manera, al optimizar esta función, el mejor posible ingreso estará dado por el tipo de actividad que realice el productor (variables de decisión) y las restricciones que lo limitan.

Las restricciones constituyen los límites que la persona que toma decisiones impone a las variables de decisión, a la vez que son variables internas que indican el estado del sistema.

► 3.3.1 Matriz de entrada (Hoja Optimización)

En esta hoja de cálculo se encuentra construida la matriz de programación lineal que constituye en sí el modelo elaborado a partir de las *variables internas* (restricciones) y *variables de decisión* (actividades) que determinan la *función objetivo* (ingresos).

De esta manera, la matriz refleja la relación que existe entra las diferentes actividades que se pueden realizar en una cuenca, que afectan tanto el ingreso de los productores como las demás restricciones que han sido incluidas en el modelo (cuadro 1). El nivel en que se deben afectar estas restricciones puede variar debido a regulaciones del Estado, acuerdos entre la comunidad, etcétera.

Un ejemplo puede ser los niveles máximos permitidos de sedimentos (restricción) aportados aguas abajo, que podrían ser establecidos por la autoridad ambiental de la cuenca o por negociaciones entre los habitantes de aguas abajo y los de aguas arriba, entre otros. Esta variable sería afectada por el tipo de uso de la tierra o por las prácticas de manejo de un sistema de producción (actividad). La solución óptima que arroja el modelo está sujeta a la relación entre restricciones y variables de decisión.

Dentro de la matriz construida en la hoja de Excel, las alternativas de decisión se encuentran localizadas en las filas 3 y 4, y las variables o restricciones en las columnas A y B (figura 31).



Figura 31. Localización de las alternativas de decisión y las variables en el modelo

3.3.1.1 Variables de decisión

Como se ha descrito en la sección 3.2, las variables de decisión o actividades están relacionadas con el tipo de rotación de cultivos, forrajes permanentes para ganadería, sistemas forestales, ventas de los productos agrícolas, ventas de servicios ambientales, venta y compra de mano de obra, compra de concentrados para el ganado, etcétera.

Así mismo, hay "variables de decisión" que no necesariamente dependen de la decisión de alguien sino que son sobre todo actividades que suceden en el sistema y afectan a las variables. Un ejemplo de estas actividades es la deposición de aguas residuales que aporta contaminantes a los ríos.

Las variables de decisión están relacionadas con diferentes restricciones, por el impacto que tienen sobre éstas (cuadro 1).

Las alternativas son denotadas de la siguiente manera en el modelo:

N.º	Alternativa de decisión	Decisión expresada en:	Nombre en la matriz (fila 4)
1	Doce opciones de rotaciones de cultivos (diseñadas en la hoja <i>Datos básicos</i>)	Hectáreas implementadas	Rotación #
2	Dos opciones de sistemas forestales. Puede ser un bosque nativo o plantado.	Hectáreas implementadas	Árboles #
3	Tres opciones de forrajes permanentes (pastos o forrajes verdes).	Hectáreas implementadas	Forraje #
4	Uso de concentrados para la alimentación del ganado durante cada semestre o año (10)	Toneladas	Concentrados en año _i
5	Vacas cada año/semestre en caso de tener forrajes en las alternativas 1 ó 3	No. Animales	Compra de vacas en año _i
6	Venta de vacas cada año/semestre.	No. Animales	Venta de vacas en año
7	Extracción de sedimentos aportados por la(s) URH en un canal, una laguna, etcétera cada año/semestre	Toneladas de sedimento extraídas	Extracción de sedimentos en año _i
8	Práctica de manejo 1 en cada rotación (12)	Hectáreas de cultivo que han incorporado prácticas de manejo en cada rotación	Práctica de manejo 1 en rotación
9	Práctica de manejo 2 en cada rotación (12)	Hectáreas de cultivo que han incorporado prácticas de manejo en cada rotación	Práctica de manejo 2 en rotación
10	Venta de carne cada año/semestre	Toneladas de carne	Venta de carne en año
11	Venta de leche cada año/semestre	Toneladas de leche	Venta de leche en año
12	Venta de madera cada año/semestre proveniente del sistema forestal 1 ("Árboles1").	Toneladas de madera	Venta de madera #1 en año _i
13	Venta de madera cada año/semestre proveniente del sistema forestal 2 ("Árboles2").	Toneladas de madera	Venta de madera #2 en año _i
14	Aporte de nitrógeno y fósforo por deposición de aguas residuales en cauces	Número de vertimientos puntuales	Aguas residuales
15	Venta de agua cada año/semestre (pago por este servicio ambiental)	Metros cúbicos de agua "vendidos"	Venta de agua en año _i
16	Captura y venta de dióxido de carbono cada año/semestre (pago por este servicio ambiental)	Toneladas de dióxido de carbono capturadas y vendidas	Captura de dióxido de carbono en año _i
17	Traspasos de flujos efectivos de un año/ semestre a otro	\$	Movimiento de efectivo en año
18	Compra cada año/semestre de jornales necesarios en usos de la tierra o prácticas de manejo implementadas	Número de jornales comprados	Compra de jornales en año _i
19	Venta de jornales cada año/semestre como fuente de ingreso	Número de jornales vendidos	Venta de jornales en año _i
20	Préstamos	\$ prestados	Préstamo

Cuadro 2. Alternativas de decisión utilizadas en el modelo

3.3.1.2 Variables internas y restricciones

Las variables tienen una respuesta o valor según la alternativa de decisión tomada. Estos valores pueden ser restringidos antes de optar por una de las alternativas y por tal razón también se llaman *restricciones*. Es decir, si el valor máximo o mínimo de una variable se restringe, entonces es posible que no todas las alternativas de decisión sean factibles de realizar. En este caso, el modelo de optimización encontrará una solución que respete tales restricciones.

Las restricciones pueden estar relacionadas con:

- Las condiciones socioeconómicas de la zona, como por ejemplo mano de obra disponible y capital del productor que está ubicado en la URH.
- Las condiciones biofísicas de un lugar, como por ejemplo la ubicación de la URH dentro de la cuenca (en la parte alta, media o baja).
- Las condiciones políticas, regulaciones externas o negociaciones que establecen límites sobre la magnitud de una externalidad que un uso de la tierra produce. Por ejemplo, el establecimiento de niveles mínimos de agua, sedimentos, nitrógeno y fósforo aportados al caudal por la URH.

Las variables o restricciones son denotadas de la siguiente manera en el modelo (cuadro 3):

N.º	Variable	Variable expresada en:	Nombre en la matriz (columnas A y B)
1	Flujos efectivos semestrales	\$	Flujo
2	Área de tierra total disponible para implementar rotaciones, pasturas permanentes, sistemas forestales y/o prácticas de manejo	Hectáreas	Tierra
3	Área de tierra disponible en la parte alta de la cuenca (esto determinará el tipo de rotación, pastura y bosque)	Hectáreas	Zona alta
4	Área de tierra disponible en la parte media de la cuenca (esto determinará el tipo de rotación, pastura y bosque)	Hectáreas	Zona media
5	Área de tierra disponible en la parte baja de la cuenca (esto determinará el tipo de rotación, pastura y bosque)	Hectáreas	Zona baja
6	Aporte de sedimentos por la(s) URH en cada semestre	Toneladas	Erosión
7	Aporte de agua al caudal por la(s) URH en cada semestre	Metros cúbicos	Agua

Cuadro 3. Variables internas o restricciones del modelo

N.º	Variable	Variable expresada en:	Nombre en la matriz (columnas A y B)
8	Aporte de nitrógeno al caudal o laguna por la(s) URH en cada semestre	Toneladas	Nitrógeno
9	Aporte de fósforo al caudal o laguna por la(s) URH en cada semestre	Toneladas	Fósforo
10	Captura de dióxido de carbono por la(s) URH en cada semestre	Toneladas	Captura de dióxido de carbono
11	Disponibilidad de mano de obra para realizar las actividades (alternativas de decisión)	Número de jornales	Mano de obra
12	Extracción de madera en el sistema forestal 1 ("Árboles 1")	Toneladas	Madera #1
13	Extracción de madera en el sistema forestal 2 ("Árboles 2")	Toneladas	Madera #2
14	Provisión de energía por los diferentes tipos de forraje	Megacalorías	Energía
15	Provisión de proteína por los diferentes tipos de forraje	Kilogramos de proteína	Proteína
16	Existencia de ganado por año/semestre	Número de animales	Vacas
17	Producción de leche	Toneladas	Leche
18	Producción de carne	Toneladas	Carne

3.3.1.3 Solución óptima

Es el conjunto de valores de las actividades que satisfacen las restricciones (criterio de factibilidad) y optimizan la función objetivo del modelo matemático de programación lineal.

En otras palabras, son las actividades (cuáles, cuándo y dónde) que se deberían realizar en la cuenca que, cumpliendo con las restricciones impuestas, generan el mejor ingreso posible en un período dado (5 a 10 años en este modelo).

Esto quiere decir, por ejemplo, que las alternativas de decisión o actividades serán ambientalmente sostenibles (cumplirán con las restricciones ambientales) y económicamente viables (en el caso de que el ingreso sea igual o superior al de la condición actual del productor ubicado en la(s) URH).

Con el modelo es posible determinar no sólo cuáles son las alternativas que optimizan los ingresos, sino cuándo deben realizarse dentro del período determinado y dónde deben hacerse (en qué lugar de la cuenca).

Por ejemplo, un agricultor que adopte la alternativa de labranza mínima en sus cultivos podría contribuir al aumento de agua en el caudal y, en consecuencia, recibiría ingresos por esto ("venta" de agua). Sin embargo, es posible que al optimizar el ingreso sea mejor "vender agua" en épocas secas que en épocas en las que los beneficiarios no padecen la escasez del recurso. Así mismo, tampoco podría pagarse por este servicio ambiental a todos los habitantes de la cuenca; los que recibirían el pago serían quienes están ubicados en zonas que, con labranza mínima, contribuyen positivamente a la externalidad en épocas secas.

3.3.1.4 ¿Cómo condicionar una solución óptima?

1. Condicionamiento de variables de decisión

Antes de optimizar la función objetivo, el usuario deberá tomar decisiones referidas a las alternativas de decisión o actividades. Así, deberá decidir si:

- Se condiciona la realización de las actividades a un valor mínimo. Por ejemplo, determinar un número mínimo de hectáreas que deben dedicarse a la rotación 1.
- Se condiciona la realización de las actividades a un valor máximo. Por ejemplo, limitar el uso de concentrados para la alimentación del ganado a un número máximo de toneladas.
- No se condiciona la realización de las actividades, dejando que los valores sean adjudicados libremente por el modelo

2. ¿Cuándo condicionar una variable de decisión?

Es necesario condicionar una alternativa de decisión cuando existen en el sistema condicionantes políticos, culturales, económicos o normativos.

Por ejemplo, cuando existe una norma ambiental que regula el uso de concentrados para evitar excesivos aportes de nitrógeno y fósforo al suelo, o cuando hay ciertos sistemas productivos que deben implementarse porque incluyen cultivos de importancia cultural o son estratégicos para la seguridad alimentaria o el desarrollo de una región.

3. ¿Cómo condicionar una variable de decisión?

La matriz está diseñada para poder limitar cada una de las actividades si es necesario, tanto en sus niveles máximos como mínimos.

El usuario deberá hacer esto antes de optimizar la función objetivo; es decir, antes de optimizar el ingreso neto de los productores que se encuentran en las URH seleccionadas.

Para esto, deberá ubicar el menú *Optimizar* y allí seleccionar la opción *Restricciones* y 2 (figura 32), la cual lo conducirá hacia las filas 154 y 155. La fila 154 corresponde al límite máximo en que puede implementarse una actividad o alternativa, y la fila 155 corresponde al nivel mínimo (figura 33).

N 1	Microsoft Excel - ECOSAUT_Mod-M02003.Manual.xls													
:9)	Eile	<u>E</u> dit	⊻iew	Insert	F <u>o</u> rmat	Tools	<u>D</u> ata	<u>W</u> ine	low	Help				
: 🏟	Iniciali	izar D	atos Bá	ásicos 🔻 🛛	Cálculos 🔻	Datos	Calculad	dos 🕶 🛛	Opti	mizar 🔻	Resultados 🕶	Ter	minar 🕶 💂	
	A	В		С	D		Е			Límite	de Restriccione	es 🕨	1	
1			I	MODE	LO DE I	PROG	RAM	IACI		<u>S</u> oluci	ón		2	
	NOTA: No modificar ninguna de las fóri Cantidades													
2	en las celdas. Solo se pueden modificar las celdas que													

Figura 32. Menú Optimizar. Restricción de alternativas de decisión



Figura 33. Condicionamiento de la realización de una actividad o alternativa de decisión

Ejemplo

Condicionando el nivel máximo

La actividad de la columna C, *Rotación 2*, se expresa en hectáreas implementadas (cuadro 2) y el nivel máximo (celda B154) indica que esta alternativa sólo podrá implementarse en un máximo de 162,6 hectáreas. Este límite puede estar dado por la disponibilidad de tierra adecuada para este sistema de producción (figura 34).

Ejemplo

Condicionando el nivel mínimo

Supongamos que las columnas AW a BF tienen en su nivel mínimo (celdas AX155 a BG155) el valor de 500. Siendo estas columnas correspondientes a la actividad Extracción de sedimentos en cada uno de los 10 semestres o años, este condicionamiento significa que el modelo optimizará el ingreso teniendo en cuenta que obligatoriamente se tendrán que extraer como mínimo 500 toneladas de sedimentos cada semestre. Esto afectará, a su vez, el capital y los flujos de dinero mensuales, lo cual finalmente repercutirá en los ingresos netos (función objetivo).

N	hicro	osoft E	xcel	- ECOSAU	T_Mod-MO
:2)	Eile	<u>E</u> dit	⊻iev	v <u>I</u> nsert	F <u>o</u> rmat <u>T</u> o
E 🦗	Inicia	alizar D)atos	Básicos 🔻	Cálculos 🕶 🛛 D
	А	В		С	D
1				MODE	LO DE PR
-				NOTA: No	o modificar n
				en las cel	das. Solo se p
2				correspor	iden a los val
3		Función	<u>۱</u>		
4		Objetiv	$^{ m v} imes$	1	2
127		8			
128		9			
129					
130		1 2			
132					
133		4			
134	he	5			_
135	ec.	6			
136		7			
137	1	8			
138		9			
139		10)		
140		1			
141		2			
142		3			
143	ne	4			
144	arı	5			
140	U.	0			
147		8			
148		9			
149		10			
150					
151					
152	Car	ıtidad		0.00	162.60
153					
154	Max			0.00	162.60
155	Min			0.00	0.00

Figura 34. Condicionamiento de la actividad Rotación 2

El modelo será utilizado de acuerdo con el problema o hipótesis de trabajo. Es decir, algunas de las alternativas de decisión pueden o no utilizarse. Por ejemplo, en algunas cuencas, entre las externalidades no se tiene en cuenta la contaminación por vertimientos de aguas residuales; por tal razón, esta alternativa no se utilizará al modelar diferentes escenarios en esa cuenca. En este caso, se condicionará esta alternativa de manera que no se considere dentro de la optimización. Para hacer esto, será entonces necesario condicionar esta actividad (columna DT) a un nivel máximo de 0 (celda DT154).

4. Condicionamiento de variables internas y/o restricciones

Antes de optimizar la función objetivo, el usuario deberá decidir en cuanto a las variables internas o restricciones si:

- Su valor es mayor o igual al límite especificado
- Su valor es menor o igual al límite especificado
- Su valor es igual al límite especificado

El límite especificado está relacionado con las capacidades biológicas y económicas del sistema, como las consideraciones del productor o las políticas en una región. Es decir, es el límite de los recursos productivos de un sistema.

Estos recursos productivos pueden estar relacionados con:

- El funcionamiento del ecosistema o agroecosistema, como la producción de agua y sedimentos, el nitrógeno y el fósforo aportados al caudal, entre otros; algunos de estos recursos se pueden traducir en servicios ambientales.
- La capacidad económica del productor como capital disponible, flujos de efectivo semestrales, disponibilidad de tierra, entre otros.
- Condiciones sociales como mano de obra disponible —familiar y en la región—.

En resumen, estos recursos son las mismas restricciones descritas en la sección 3.3.1.2.

Cuando una actividad afecta a una de las restricciones, ésta se puede ver disminuida o aumentada en cantidad. Cada restricción denotará el aumento con el mismo signo (+ ó -) para todas las actividades, y con el signo contrario se denotará la reducción del recurso.

Ejemplo

A) Restricción

Aporte de agua al caudal en el año/semestre 1 (Fila 30, Agua1): Actividades como las rotaciones aportan agua al caudal y en el modelo esta contribución se denota con el signo (-). Por el contrario, la actividad ganadera extrae agua del sistema para su consumo (columna AD-AM) y por lo tanto ese valor se debe designar con el signo (+).

B) Restricción

Aporte de sedimentos al caudal en el año/semestre 1 (Fila20, Erosión1): Las diferentes coberturas del suelo (o usos del suelo como rotaciones, plantaciones forestales, pasturas permanentes) aportan sedimentos al caudal y en este modelo ese valor se denota con el signo (+). Cuando se realizan prácticas de manejo (columna BH: CE), este aporte disminuye y entonces el valor correspondiente tiene signo (-).

Para establecer los límites, se debe seleccionar en el menú *Optimizar* la opción *Restricciones* y 1 (figura 35), la cual conducirá al usuario a la columna FU (figura 36), donde se determina el valor límite de restricción.

N	Kicrosoft Excel - ECOSAUT_Mod-MO2003.Manual.xls													
:2)	Eile	<u>E</u> dit	⊻iew	Insert	F <u>o</u> rmat	<u>T</u> ools	<u>D</u> ata	<u>W</u> ind	ow	Help				
ļ 🔿	🗢 Inicializar Datos Básicos 🔻 Cálculos 🕶 Datos Calculados 🕶 Optimizar 🔍 Resultados 💌 Terminar 🖕													
	A B C D E Límite de Restricciones > 1													
1	1 MODELO DE PROGRAMACI Solución 2													
	NOTA: No modificar ninguna de las fórn Cantidades													
en las celdas. Solo se pueden modificar las celdas que														
2 corresponden a los valores máximo (Fila 154) y mínimo														

Figura 35. Menú Optimizar. Límites a variables y restricciones del modelo

Para el ejemplo A, la restricción de "Agua" está dada por un límite ≤ 0 metros cúbicos de agua (figura 27), es decir que al sumar todos los valores de la fila de esta restricción (fila 31) el valor debe ser negativo o igual a 0. Si el valor es negativo, significa que al realizar las actividades que generan ingreso no toda el agua disponible es empleada, y por lo tanto queda un remanente de este recurso en el sistema, es decir que va al caudal. Si el valor es igual (=) a 0, entonces todo el recurso agua está siendo utilizado por las actividades. Esto no significa que no llegue agua al caudal, sino que el remanente de agua no utilizada por el sistema de producción y aportada al caudal es "vendida" (una de la actividades del modelo es "vender agua"). Esto implica que se percibirá un ingreso adicional por una compensación de la sociedad hacia los productores de las URH que implementan usos de la tierra que permiten que llegue más agua al caudal. Este valor nunca puede dar positivo, pues indicaría que el volumen de agua utilizado es mayor que la oferta natural del recurso, y que por lo tanto no existe ninguna solución factible para las condiciones especificadas.

Para el ejemplo B, la restricción "Erosión" está dada por un límite ≤ 60.000 toneladas de sedimentos (figura 36). Es decir, si producir sedimentos estaba designado en la fila 20 con el signo (+), la suma de todos los valores de esta fila puede ser igual a 0 (todos los sedimentos producidos por algunas actividades se extraen del sistema a través de otras actividades) o puede ser positivo si el valor no sobrepasa el límite de 60.000. Es decir, al sistema sólo se le permite producir hasta 60.000 toneladas por año/semestre de sedimentos.



Figura 36. Condicionamiento de las restricciones o variables internas del sistema

► 3.3.2 Matriz de salida

En la misma hoja de cálculo (hoja *Optimización*) la matriz de entrada descrita anteriormente es duplicada y multiplicada por las cantidades óptimas (fila 152) de las actividades. Recuerde que estas cantidades son halladas por la optimización (siguiente sección). La matriz que se duplica corresponde a la información contenida entre las filas 5 a 149 y las columnas A:FS y se localiza debajo de la matriz de entrada entre las filas 158-302 y las columnas A:FS.

La importancia de esta matriz de salida es que permite conocer los valores finales de las restricciones para cada actividad del escenario creado.

Ejemplo

Aporte de agua en el semestre 1 por la rotación 2: supongamos que el aporte de agua por el cultivo de la rotación 2 en el semestre 1 es de 14,89 metros cúbicos/hectárea (celda D30). Cuando se optimiza el ingreso, la solución óptima contempla la realización de la rotación 2 en 162,6 hectáreas (celda D152). Para conocer cuánta agua aporta la actividad "Rotación 2" en el primer semestre de ese escenario planteado por la solución óptima, se deberá entonces multiplicar el aporte de una hectárea de la rotación en el semestre 1 por el número de hectáreas sugeridas por la optimización, es decir, -14,83 metros cúbicos/hectárea x 162,6 hectáreas = -2.420,95 metros cúbicos. Este valor es el que automáticamente se calcula en la matriz de salida en la celda D183.

De esta manera se calcula el valor de la restricción para todas las actividades (en caso de que no se realice una actividad en el escenario óptimo, el valor será 0). Estos valores son sumados para obtener el valor total de la restricción cada semestre o año. Los valores totales se denominan *valores resultado* y están ubicados en las celdas FV5:FV144.

► 3.3.3 Optimización

Antes de optimizar la función objetivo —es decir, encontrar el mejor ingreso posible en la(s) URH evaluada(s) para un período de 5 a 10 años—, recuerde haber cumplido los siguientes pasos:

- Ingreso de información básica en la hoja de cálculo *Datos básicos* (sección 4.1).
- Cálculo de variables en la hoja *Datos calculados* para actualizar automáticamente la información en la hoja *Optimización* a partir de la información básica (sección 4.2).
- Condicionamiento de las restricciones y actividades del modelo (sección 4.3.1.4).

Es muy posible que deba repetir una y otra vez los pasos descritos anteriormente, debido a que la solución óptima puede cambiar con el tiempo en la medida en que las variables de decisión (alternativas), los objetivos y las políticas pueden no ser los mismos siempre. Así, el estado del sistema cambiará por la variación de las restricciones y por la implementación de las decisiones tomadas.

En esta medida, este modelo permite reformular y reencontrar la solución óptima cuando cambian las variables del sistema.

3.3.3.1 Activación de la herramienta *Solver* en su computador

El modelo utiliza la opción *Solver* para optimizar (maximizar) el ingreso rural (función objetivo) según restricciones biofísicas y socioeconómicas (mano de obra, agua, erosión, etcétera).

Para activar la función *Solver* en su computador, en el menú principal de Microsoft Excel haga *click* en la opción Herramientas (*Tools*), Complementos (*Add-Ins*) y active la función *Solver* (figura 37).



Figura 37. Activación de la función Solver en Excel

Una vez que el usuario ya ha activado esta herramienta en su computador, la podrá encontrar siempre en el menú Herramientas, *Solver*.

3.3.3.2 Parámetros de la optimización

Cuando se seleccione la herramienta *Solver*, se desplegará una ventana *Parámetros de Solver*, donde, antes de proceder con la optimización, es necesario especificar algunos parámetros como cuál es la función objetivo, cuáles son las desigualdades que condicionan las restricciones, cuáles son los valores máximos y mínimos de las actividades que pueden ser aceptados por la solución óptima y cuáles son las variables que se pueden modificar para realizar la optimización (figura 38).

Estos parámetros ya están predeterminados; por lo tanto, no es necesario que el usuario los modifique, a menos que cambie alguna desigualdad o posición de la información en el modelo. Sin embargo, no se recomienda hacer modificaciones.



Figura 38. Ventana de parámetros necesarios para realizar la optimización

A continuación, se explica el significado de cada uno de los parámetros necesarios para la optimización:

Función objetivo (celda objetivo): El usuario deberá asegurarse que la función objetivo seleccionada sea la correspondiente al ingreso neto de los 5 a 10 años. Es decir, la celda FV5 en la hoja *Optimización*. Así mismo, deberá chequear la opción *Máximo*, pues lo que se desea es maximizar la función objetivo, es decir, encontrar la solución que arroje el mejor ingreso posible en un escenario de restricciones dado (figuras 38 y 39).

Variables que se deben modificar en la optimización: En la ventana *Parámetros de Solver* se indican cuáles son los valores que corresponden a las variables que pueden modificarse para encontrar una solución óptima. Es decir, las cantidades en que una variable de decisión debe realizarse para obtener el mejor ingreso neto respetando las restricciones.

En este caso, en la casilla *Cambiando las celdas* deberá aparecer B152-FS152. Cuando se hace la optimización, en estas celdas aparecerá la cantidad de veces que cada actividad debe realizarse (figura 40) en sus correspondientes unidades (cuadro 2).



Figura 40. Valores que se modifican en la optimización

Restricciones: Otro de los parámetros que tiene en cuenta Excel para realizar la optimización son las desigualdades que determinan una restricción. Es decir, los límites de las variables internas que afectan la decisión de realizar o no una actividad. En esta sección se especifican estas restricciones, para que cuando se ejecute el *Solver* se comparen los límites restrictivos (columna FU) con los valores resultado (columna FV) (figura 41).

Los "valores resultado" corresponden al valor de cada restricción como resultado de haber realizado las actividades que forman parte de la solución óptima. Estos valores cumplen la limitación especificada para cada restricción.

En la ventana *Parámetros de Solver* (en la sección *Sujeta a las siguientes restricciones*) (figura 38) se especifican estas limitaciones utilizando el tipo de desigualdad (\leq , \geq , =) que ha sido ya determinado en la columna FT de la matriz (figura 41) (iy que no debe modificarse!).

Ejemplo

Restricción "Aporte de agua" (fila 30, "Agua1"): El límite impuesto a esta restricción es que el agua en el sistema debe ser ≤ 0 (celda FU30), es decir, que puede utilizarse toda el agua para generar ingreso neto o dejar un remanente en el sistema (<0). El valor resultado (celda FV30) es igual a 0, lo que significa que en la optimización se cumplió la restricción al utilizarse el recurso agua en todas las actividades para maximizar el ingreso.

En la ventana Parámetros de Solver esta restricción se especificaría así: $FV30 \leq FU30$.



Figura 41. Límites de las restricciones, tipo de desigualdad y valores resultado

Valores máximos y mínimos de las actividades: En esta misma sección *Sujeta a las siguientes restricciones*, se señalan los valores máximos y mínimos para cada actividad, que ya han sido determinados en la hoja *Optimización* (sección 4.3.1.4).

De esta manera, la expresión C152 : FS152 \leq C154 : FS154 señala que las celdas de la matriz que se debe modificar en la optimización (C152 : FS152) deben ser menores o iguales al valor máximo especificado para cada una de las actividades (figuras 33 y 40).

Por otro lado, la expresión C152 : FS152 \geq C155 : FS155 señala que las celdas de la matriz que se debe modificar en la optimización (C152 : FS152) deben ser mayores o iguales al valor mínimo especificado para cada una de las actividades (figuras 33 y 40).

Recuerde que una vez que usted despliegue la ventana *Parámetros de Solver* no debe modificar sus parámetros debido a que ya han sido especificados para esta matriz de programación lineal.

3.3.3.3 Opciones del Solver

La herramienta *Solver* cuenta con algunas opciones para realizar la optimización de la función objetivo. Estas opciones se encuentran en la ventana *Solver Options*, que se despliega al oprimir el botón *Opciones* de la ventana *Parámetros de Solver* (figura 42)

Solver Options							
Max <u>T</u> ime:	300 seconds	ОК					
Iterations:	400	Cancel					
Precision:	0.01	Load Model					
Tol <u>e</u> rance:	0.00015 %	Save Model					
Con <u>v</u> ergence:	0.000051	Help					
Assume Linear Model							
Assume Non-Negative Show Iteration <u>R</u> esults							
Estimates	Derivatives	Search					
Tangent	⊙ <u>F</u> orward	O <u>N</u> ewton					
O Quadratic	<u>○</u> <u>⊂</u> entral	⊙ C <u>o</u> njugate					

Figura 42. Opciones de la herramienta Solver

A continuación, se describe cada una de estas opciones, *aunque se recomienda no modificar los valores que están predeterminados para el modelo aquí presentado.*

Max Time ('tiempo máximo')

Se refiere el tiempo máximo que puede tomar el sistema en procesar una solución óptima. Este valor por defecto es 100 segundos, tiempo adecuado para la mayoría de problemas sencillos. Sin embargo, usted podrá ampliar el intervalo cuando considere que está trabajando con matrices más complejas.

Iterations ('iteraciones')

Esta opción limita el número de cálculos intermedios que hace el sistema para llegar a la solución final (óptima). Al limitar estos cálculos, el tiempo que tarda el proceso puede acortarse. El valor por defecto es 100, el cual se recomienda para la mayoría de matrices sencillas.

Precision ('precisión')

Esta opción determina la precisión con la que una solución óptima satisface las restricciones. Es decir, cuán lejos está el valor resultado del valor de la restricción. Cuanto menor sea la precisión, el valor resultado podrá no ser exactamente el valor de la restricción sino simplemente un valor cercano. El valor que determina la precisión está entre 0 y 1. El valor con mayor número de decimales será el más preciso. Por ejemplo, 0,000001 implica mayor precisión que 0,01.

Tolerance ('tolerancia')

Esta opción se indica con un porcentaje que representa el grado en que la función objetivo satisface las restricciones. Es decir, se puede obtener una solución que es aceptable dentro de un porcentaje de tolerancia dado, pero que difiere de la solución óptima verdadera; sin embargo, es aceptada porque cumple con el porcentaje asignado. Esta opción es únicamente aplicable cuando las restricciones están determinadas por números enteros. Una tolerancia alta (%) acelera el proceso que realiza el sistema para encontrar una solución.

Convergence ('convergencia')

El valor de convergencia se refiere al cambio relativo que va adquiriendo la función objetivo a medida que avanzan las iteraciones (cálculos intermedios). Si el cambio relativo de la función objetivo es menor que el señalado en la casilla de convergencia durante cinco iteraciones consecutivas, el proceso se detendrá y asumirá el valor de ese momento de la celda objetivo como la solución final.

Esta opción sólo es válida para problemas no lineales. El valor de convergencia se indica con un número entre 0 y 1. Mientras más pequeño es el número, menor es la convergencia o el cambio relativo aceptado. Es decir, con una convergencia de 0,00001 el proceso tardará más que con una cuyo valor sea 0,01.

Asume Linear Model ('asume que el modelo es lineal')

Esta opción se selecciona cuando todas las relaciones en el modelo son lineales, es decir, la solución atiende a un problema de optimización lineal. Esto acelera el proceso que realiza el sistema.

Show Iterations Results ('mostrar los resultados de las iteraciones')

Cuando se selecciona esta opción, la herramienta *Solver* realizará pausas para ver los resultados de los cálculos intermedios.

Use Automatic Scaling ('usar escala automática')

Esta opción se aplica cuando las magnitudes de los valores de la matriz son muy grandes.

Assume non-negative ('asumir no negatividad')

Al activar esta opción, la herramienta *Solver* asumirá en las restricciones que el límite mínimo es 0. Esto sólo se aplica en aquellas restricciones a las que no se les determinó tal límite en la ventana de *Parámetros de Solver*.

Estimates ('estimaciones')

En esta sección se especifica el enfoque que se utilizará para estimar el valor de las variables en cada búsqueda básica unidimensional. Es decir, una variable de decisión a la vez. Existen dos enfoques posibles: el *tangente* (*Tangent*), que usa extrapolación lineal a partir de un vector tangencial, y el *cuadrático (Quadratic)*, que usa extrapolación cuadrática, la cual se recomienda para problemas no lineales.

Derivatives ('derivados')

Se refiere al enfoque que se utiliza para generar los resultados parciales de la celda objetivo y de las restricciones. El primer enfoque es *Forward*, que se usa para los problemas en cuyos cálculos intermedios el valor de las restricciones cambia relativamente poco. El segundo es *Central*, que se usa cuando el valor de las restricciones cambia demasiado, sobre todo alrededor del límite establecido. Este último enfoque requiere mayor número de cálculos intermedios y podría ayudar para los casos en que la herramienta *Solver* no logra encontrar una solución factible.

Search ('búsqueda')

Especifica cuál es el algoritmo que se usa en cada iteración para determinar la dirección en que se orienta la búsqueda de la solución. Puede ser *Newton*, que consiste en un método quasi-Newton que requiere más memoria pero menor número de iteraciones que el siguiente método, o *Conjugate*, que requiere menos memoria, pero necesita mayor número de iteraciones para alcanzar un nivel de precisión dado. Se recomienda usar este método cuando se dispone de un problema complejo y se presentan limitaciones por memoria.

Load Model ('cargar modelo')

Al oprimir este botón se despliega la ventana *Load Model*, donde se especifica la referencia del modelo que se pretende cargar.

Save Model ('salvar modelo')

Al oprimir este botón se despliega la ventana *Save Model*, en la que se especifica dónde salvar el modelo. Esta opción se utiliza cuando se quiere salvar más de un modelo. El último modelo siempre se salva por defecto.

3.3.3.4 Búsqueda de la solución óptima

Cuando los parámetros ya están establecidos, el usuario puede oprimir el botón *Resolver (Solve)* para encontrar la solución óptima que maximice la función objetivo (figura 43).

Solver Parameters	
Set Target Cell: FV\$5 Set Equal To: Max Min Value of: 0 By Changing Cells:	<u>S</u> olve Close
\$C\$152:\$F5\$152 Guess Subject to the Constraints: 4C\$152:\$F5\$152 <= \$C\$154:\$F5\$154	Options
$\begin{array}{c} & & & & & & & & & & & & & & & & & & &$	Reset All

Figura 43. Ejecución de la función Solver

Cuando la función *Solver* es ejecutada, Excel desplegara la ventana *Resultados del Solver*, donde se informa que se ha encontrado una solución óptima que satisface las restricciones especificadas, es decir, que es factible (figura 44).

Solver Results	
Solver found a solution. All constraints and optimalit conditions are satisfied.	y <u>R</u> eports
Keep Solver Solution Restore Original Values	Answer Sensitivity Limits
OK Cancel Save Sce	nario <u>H</u> elp

Figura 44. Ventana de resultados encontrados

Para evitar el riesgo de modificar algunos de los parámetros de *Solver*, el usuario encontrará en el menú *Optimizar*, la opción *Solución*. Seleccionándola, el modelo automáticamente ejecutará el *Solver* (figura 45).



Figura 45. Hoja: Optimización. Menú Optimizar, opción Solución

Una vez que el modelo ya ha encontrado la solución factible, el usuario deberá oprimir el botón *OK*. De esta manera se podrá explorar qué actividades forman parte de la solución óptima y en qué cantidades (fila 152).

En caso de no encontrar una solución factible, Excel lo informará y será necesario revisar las restricciones y valores mínimos y máximos especificados.

Algunas posibles razones comunes para no poder encontrar una solución factible pueden ser:

Los valores mínimos de las actividades están por encima de las capacidades del sistema, es decir, sobrepasan los valores de las variables internas o restricciones.

Ejemplo

Supongamos que la actividad "Rotación 2" sólo se puede hacer en la tierra que esté ubicada en la parte media de la cuenca (tierra zona media), como se puede observar en la celda D18. Si se colocara que el valor mínimo de esta actividad es 170 —lo que significaría que con esta actividad deben implementarse como mínimo 170 hectáreas— y se tratara de optimizar la función objetivo, Excel emitiría una ventana en la que señale que no puede encontrar una solución factible (figura 46).

Solver could not find a feasible solution	n	
	Reports	
Keep Solver Solution	Answer Sensitivity	-
C Restore Original Values	Critics.	~

Figura 46. Ventana de Excel indicando que no es factible encontrar una solución óptima

La explicación a esto es que con un condicionamiento de la actividad a 170 hectáreas como mínimo, el sistema nunca podría cumplir con este requerimiento, ya que la restricción "tierra zona media" está dada por una desigualdad \leq 162,6 (celda FU18), es decir, en la parte media de la cuenca hay una restricción por disponibilidad de tierra de sólo 162,6 hectáreas, mientras se condicionaba a un mínimo de 170 hectáreas de la rotación 2.

Los límites impuestos por las restricciones no son factibles de cumplir debido a que las actividades del sistema nunca podrán satisfacerlos.

Ejemplo

Restricción por nitrógeno y fósforo

Entre las actividades que aportan nitrógeno y fósforo (filas 40 a 59) están las rotaciones, los sistemas productivos ganaderos (forrajes), las aguas residuales, los concentrados, etcétera, cuyos aportes se denotan con valores positivos en la matriz. Así mismo, hay actividades que exportan sedimentos del sistema, como lo es la "Extracción de sedimentos" (columnas AX a BG) y que denotarían sus valores con signo negativo (-).

Si la desigualdad que impone un límite a esta variable interna fuera ≤ 0 (celda FU40 : FU59), cuya interpretación es que las actividades no deben dejar sedimentos remanentes en el sistema, Excel no podría encontrar una solución factible, pues la única manera que tiene el sistema que estamos modelando para hacer cumplir la restricción es utilizando la actividad "Extracción de sedimentos", cuyo límite del nivel máximo en este ejemplo es 0 (celdas AX154 : BG154), es decir, no está exportando del sistema sedimentos. Por lo tanto, no hay forma de realizar alguna actividad y al mismo tiempo satisfacer la restricción.

3.3.3.5 Reportes

Los resultados de la herramienta *Solver* se visualizan en la matriz de programación lineal y en tres tipos de reportes: de respuesta, de limites y de sensibilidad. El presente documento hará énfasis en el análisis de sensibilidad debido a que es el utilizado por el Proyecto Regional Cuencas Andinas para valorar las externalidades identificadas en los análisis de cuencas.

Reporte de respuesta (Answer)

En este reporte se muestran los valores originales y finales de la celda objetivo y de las celdas que se modifican (correspondientes a la cantidad de cada actividad). Así mismo, provee información a cerca de las restricciones.

Análisis de limites (*Limits*)

En este reporte se muestran los valores y los límites superiores e inferiores de la celda objetivo y las celdas modificables. Este reporte no es generado para modelos que contienen restricciones con números enteros. El limite inferior o superior se refiere al valor más pequeño o más grande, respectivamente, que puede tener una celda modificable pero manteniendo los valores de las demás y satisfaciendo las restricciones.

Análisis de sensibilidad (Sensitivity)

Una vez que se identifican los valores óptimos de las actividades que maximizan el ingreso (solución óptima) y que se adaptan a las restricciones — como por ejemplo niveles aceptables de impacto ambiental (aporte de agua, sedimentos, captura de CO2, etcétera)—, es posible hacer un análisis de sensibilidad.

El análisis de sensibilidad provee información cuantitativa que refleja la importancia de las restricciones ambientales y socioeconómicas impuestas en la búsqueda de la optimización del ingreso neto. Este valor que se le adjudica a cada restricción es conocido como el precio sombra (*shadow price*).

3.3.3.6 Aplicación del análisis de sensibilidad en el análisis y manejo de cuencas hidrográficas

Teniendo en cuenta que el modelo es construido con valores reales provenientes de la modelación biofísica con SWAT y de información socioeconómica del área de estudio, los precios sombra pueden reflejar el valor real de una restricción.

Siendo uno de los principales objetivos del Proyecto Regional Cuencas Andinas evaluar e impulsar el pago por servicios ambientales como un mecanismo para generar una nueva dinámica de desarrollo rural, el valor del precio sombra es calculado para disponer de una base cuantitativa que permita establecer compensaciones económicas o pagos por un servicio ambiental. Estos recursos económicos se orientarán hacia el productor situado en la(s) URH que sacrifique(n) un incremento en el ingreso por cumplir una restricción ambiental que beneficia al resto de la sociedad.

De esta manera, el análisis de sensibilidad es una herramienta para detectar cuáles son las restricciones claves (los precios sombra más altos) que limitan el aumento de los ingresos y, en consecuencia, son la base para establecer negociaciones entre los actores o promover proyectos para superarlas. Entre las negociaciones más frecuentes en el manejo de cuencas están las relacionadas con conflictos ambientales originados por la generación de externalidades negativas por parte de los habitantes de la parte alta de la cuenca, que afectan a los habitantes ubicados aguas abajo. Para este tipo de negociaciones, es importante distinguir entre el precio sombra de varios productores de la externalidad; en otras palabras, el recurso no tiene el mismo valor en toda la cuenca. Por ejemplo, el nitrógeno y el fósforo aportados a una laguna que abastece a varios acueductos pueden tener mayor valor que los que se depositan en un solo canal.

Para conocer el análisis de sensibilidad de una solución óptima, el usuario debe seleccionar en la ventana de resultados del *Solver* el reporte de *Sensibilidad* (figura 47) y oprimir el botón *OK*.

El programa procesará inmediatamente el reporte del análisis de sensibilidad y creará automáticamente una nueva hoja de cálculo que lo contiene, llamada *Sensitivity Report*. En esta hoja usted encontrara la información correspondiente al precio sombra de cada una de las restricciones (figura 48).





El precio sombra representa el costo de una unidad más del recurso producido en el sistema. Por ejemplo, en la restricción "Energía", una unidad de energía más en el segundo semestre (precio sombra de FV50) significaría US \$ 113,64 en el ingreso del productor. Los precios sombra más altos indican que la variable asociada a éstos es una de las que más limita el aumento de los ingresos.

Para el caso de restricciones que tienen valor en el mercado, el precio sombra corresponderá al precio de mercado de una unidad de la respectiva restricción.

Ejemplo

El precio sombra de una unidad de carne adicional en todos los semestres (restricción "Carne") es 1.000 (precio sombra de FV140 : FV149), lo cual representa el valor en el mercado de una tonelada más de este producto (recuerde que este dato fue ingresado en la hoja *Datos básicos*).

Otros datos adicionales que provee el análisis de sensibilidad (figura 45) son:

Valor final (*Final Value*)

Este valor corresponde a la cantidad que en cada actividad se realiza en el escenario de la solución óptima. Es decir, éstos son los mismos valores que aparecen en la fila 152 de la matriz y que en los *Parámetros del Solver* se denominan *celdas modificables*.

Costo reducido (Reduced Cost)

Es el valor correspondiente a la disminución de la función objetivo si se realiza una actividad que no fue contemplada en la solución óptima. Es decir, hay un valor reducido para cada actividad (figura 49).

Incremento permitido (Allowable Increase)

Este valor es la cantidad que se puede aumentar en una restricción sin modificar el precio sombra.

Disminución permitida (Allowable Decrease)

Este valor es la cantidad que se puede disminuir en una restricción sin modificar el precio sombra.

	A B	С	D	E	F	G	Н
182							
183	Constraints						
184			Final	Shadow	Constraint	Allowable	Allowable
185	Cell	Name	Value	Price	R.H. Side	Increase	Decrease
245	\$FU\$139	-	0.00	113.44	0	666.3235663	333.6764337
246	\$FU\$140	=	0.00	1000.00	0	118.2697162	2.372997563
247	\$FU\$141	=	0.00	950.00	0	999.7542658	0.245734237
248	\$FU\$142	=	0.00	1017.51	0	12.80404711	0.062583279
249	\$FU\$143	-	0.00	2366.30	0	9.756284882	1.829276391
250	\$FU\$144	=	0.00	1682.58	0	13.72076355	1.332001663
251	\$FU\$145	=	0.00	1226.67	0	18.82025799	0
252	\$FU\$146	=	0.00	1341.37	0	125.6938844	4.827267453
253	\$FU\$147	=	0.00	1022.60	0	164.8758816	5.398989946
254	\$FU\$148	=	0.00	795.35	0	211.9847939	5.430258421
255	\$FU\$149	=	0.00	630.25	0	996.9610525	3.038947484
256	\$FU\$16	<=	165.98	0.00	329.1	1E+30	163.1188885
257	\$FU\$17	<=	139.33	0.00	166.5	1E+30	27.17108649
258	\$FU\$18	<=	26.65	0.00	162.6	1E+30	135.947802
259	\$FU\$19	<=	0.00	0.00	0	1E+30	0
260	\$FU\$20	<=	1811.70	0.00	2000	1E+30	188.2977792
261	\$FU\$21	<=	438.43	0.00	2000	1E+30	1561.568777
262	\$FU\$22	<=	478.25	0.00	2000	1E+30	1521.750393
263	\$FU\$23	<=	2000.00	56.43	2000	0	0
277	\$FU\$37	<=	-3667.21	0.00	-300	1E+30	3367.214159
278	\$FU\$38	<=	-3628.18	0.00	-300	1E+30	3328.18207
279	\$FU\$39	<=	-8313.45	0.00	-300	1E+30	8013.445328
280	\$FU\$40	<=	19.96	0.00	1000	1E+30	980.0389123
281	\$FU\$41	<=	37.00	0.00	1000	1E+30	962.995793
282	\$FU\$42	<=	30.57	0.00	1000	1E+30	969.4258065
283	\$FU\$43	<=	30.46	0.00	1000	1E+30	969.5373791
284	\$FU\$44	<=	45.45	0.00	1000	1E+30	954.554404
285	\$FU\$45	<=	55.82	0.00	1000	1E+30	944.1760731
286	\$FU\$46	<=	58.84	0.00	1000	1E+30	941.1593008
287	\$FU\$47	<=	38.18	0.00	1000	1E+30	961.8200089
288	\$FU\$48	<=	37.25	0.00	1000	1E+30	962.7498826
289	\$FU\$49	<=	64.77	0.00	1000	1E+30	935.2275687
290	\$FU\$50	<=	222.37	0.00	1000	1E+30	777.6346069
291	\$FU\$51	<=	5.30	0.00	1000	1E+30	994.7007728
292	\$FU\$52	<=	1.46	0.00	1000	1E+30	998.5435946
293	\$FU\$53	<=	217.67	0.00	1000	1E+30	782.3321584
294	\$FU\$54	<=	212.84	0.00	1000	1E+30	787.1562095
295	\$FU\$55	<=	24.12	0.00	1000	1E+30	975.8784654
296	\$FU\$56	<=	64.73	0.00	1000	1E+30	935.2703189
297	\$FU\$57	<=	222.80	0.00	1000	1E+30	777.2000515

Figura 48. Análisis de sensibilidad del escenario simulado

Ejemplo

Si un productor pretende realizar una actividad que no fue incluida dentro de la solución óptima, él tendrá una pérdida en el ingreso equivalente al valor reducido de esa variable de decisión o actividad. En otras palabras, el costo reducido representa el aumento que debe ocasionar la variable en el ingreso neto para que sea una alternativa rentable. Esto se podría lograr mejorando el precio de venta o la productividad.

	A B	¢	D	E	F	G	н	
1	Microsoft Ex	ccel 9.0 Sensitivity Report						
2	Worksheet: [Modelo-Optimizacion.xls]modelo (no modificar)							
3	Report Created: 8/3/2004 3:47:22 PM							
4								
5								
6	Adjustable C	ells						
7			Final	Reduced	Objective	Allowable	Allowable	
8	Cell	Name	Value	Cost	Coefficient	Increase	Decrease	
9	\$B\$147	Cantidad Rota 1	0.0352	0.0000	-10069.02527	0	6673.153238	
10	\$C\$147	Cantidad Rota 2	0.00	0.00	-5229.032223	7353.635497	1E+30	
11	\$D\$147	Cantidad Rota 3	0.00	-13946.49	-6779.740303	13946.49111	1E+30	
12	\$E\$147	Cantidad Rota 4	0.00	-12412.83	-6112.750215	12412.83435	1E+30	
13	\$F\$147	Cantidad Rota 5	0.00	0.00	0	0	1E+30	
14	\$G\$147	Cantidad Rota 6	0.00	0.00	0	0	1E+30	
15	\$H\$147	Cantidad Rota 7	0.00	0.00	0	0	1E+30	
16	\$1\$147	Cantidad Rota 8	0.00	0.00	0	0	1E+30	
17	\$J\$147	Cantidad Rota 9	0.00	0.00	0	0	1E+30	
18	\$K\$147	Cantidad Rota 10	0.00	0.00	0	0	1E+30	
19	\$L\$147	Cantidad Rota 11	0.00	10061.65	0	10061.64952	1E+30	
20	\$M\$147	Cantidad Rota 12	0.00	0.00	0	0	1E+30	
21	\$N\$147	Cantidad Arboles 1	3.33	0.00	-300	7201040.778	3193.998669	
22	\$0\$147	Cantidad Arboles 2	3.33	0.00	-300	7201040.778	3507.080608	
23	\$P\$147	Cantidad Forraje1	0.00	-513.08	-1999.999999	513.081938	1E+30	
24	\$Q\$147	Cantidad Forraje2	1.13	0.00	-1500	33436.24042	0	
25	\$R\$147	Cantidad Forraje3	0.00	-10207.07	-734.2243363	10207.06552	1E+30	
26	\$S\$147	Cantidad Conc.1	91.99	0.00	200	43.68343107	0	
27	\$T\$147	Cantidad Conc.2	103.19	0.00	200	0	102.9686435	
28	\$U\$147	Cantidad Conc.3	24.39	0.00	-200	0	228.4379388	
29	\$\/\$147	Cantidad Conc.4	23.72	0.00	-200	200	0	
30	\$W\$147	Cantidad Conc.5	14.94	0.00	-200	0	0	
31	\$X\$147	Cantidad Conc.6	24.39	0.00	-200	0	225.9931234	
32	\$Y\$147	Cantidad Conc.7	24.39	0.00	-200	0	225.258286	
33	\$Z\$147	Cantidad Conc.8	23.72	0.00	-200	200	0	
2.4	\$44\$1.47	Cantidad Cong 9	23,72	0.00		200	n	

Figura 49. Costo reducido y valor final de cada variable de decisión

► 3.4 Gráficos de interpretación de resultados

Hoja: Resultados

En la hoja *Resultados* se han construido algunos gráficos que pueden ser útiles para el análisis de diferentes escenarios. Es decir, para analizar el impacto tanto de diferentes condicionamientos de las restricciones y las variables de decisión como de cambios en la información básica de entrada.

Estos gráficos provienen directamente de resultados de la optimización o de cálculos adicionales a partir de ésta. Los cálculos y gráficos se generan automáticamente y por tal razón se sugiere no modificar el contenido de las celdas. Como se puede observar aquí, los cálculos utilizan tres tipos

de información: información A, generada directamente por el modelo; información B, generada a partir de la información A y no utilizada directamente en la elaboración de los gráficos; e información C, generada a partir de la información A y/o B, y que es utilizada en la construcción de los gráficos.

Como resultado de estos cálculos se muestran rápidamente algunas interpretaciones gráficas para cualquier solución que arroje el modelo. Todos los gráficos muestran el comportamiento dinámico a través del tiempo de las diferentes variables. Las variables corresponden a:

- Uso de la tierra: Dinámica anual/semestral de cada uno de los cultivos.
- *Erosión por cobertura*: Dinámica anual/semestral de aportes de sedimentos (toneladas) al caudal por parte de cada cultivo.
- *Erosión total*: Dinámica de aportes de sedimentos (toneladas) totales al caudal cada año/semestre.
- Agua generada por cobertura: Dinámica anual/semestral de aporte de agua (metros cúbicos) al caudal por parte de cada cultivo.
- *Utilización de mano de obra total*: Dinámica anual/semestral de utilización de mano de obra total.
- *Utilización de mano de obra por actividad*: Variación anual/semestral del número de jornales empleados para cada uso de la tierra.
- *Retribución por mano de obra*: Retribución por jornal utilizado basado en los flujos de efectivo y el número de jornales totales en cada semestre.
- *Flujos de efectivo*: Ingresos netos semestrales.
- Ingresos por actividad: Flujo de ingresos anuales/semestrales generados por cada una de las actividades agropecuarias, por venta de mano de obra y venta de servicios ambientales.
- *Fuentes de ingreso*: Diferenciación de flujos por ingresos relacionados con la actividad agropecuaria, la venta de jornales y la venta o compensación por servicios ambientales.

Para navegar fácilmente sobre esta hoja se creo el menú *Resultados* en la parte superior de la ventana del modelo. Este menú le facilitará acceder a la gráfica o a sus datos fuente de una manera más ágil (figura 50).


Figura 50. Hoja Resultados. Menú Resultados, opciones Cuadros y Gráficas

3.5 Opciones para finalización y reiniciación

▶ 3.5.1 Finalizando la aplicación

Al extremo izquierdo de la barra de menús del modelo encontrará el menú *Terminar*. Allí encontrará las opciones *Guardar, Guardar como* y *Salir* (figura 51).

Tricielizar Datos Básicos - Cálculos - Datos Calculados - Optimizar - Resultados - Termi A B FO FP FQ FR FS ad		1 Elle	Edit	Yew Inser	t Format I	ools Data We	ndow Help			
A B FO FP FO FR FS d	4	Inicia	izar De	atos Básicos •	Cálculos • D	atos Calculados •	Optimizar •	Resultados •	Term	ninar •
	1	A	B	FO	FP	FO	FR	FS	5	Save
										Save As

Figura 51. Menú Terminar. Opciones Guardar y Salir

NUNCA olvide ejecutar la opción Salir para cerrar el modelo. De lo contrario, Microsoft Excel quedará funcionando permanentemente con los submenús personalizados de este modelo.

▶ 3.5.2 Reiniciando el modelo

En caso de requerir utilizar el modelo para evaluar distintos escenarios que necesiten información básica diferente de la utilizada en simulaciones previas, usted necesitará reiniciar el modelo. Para esto, deberá identificar y oprimir el submenú *Inicializar*, el cual limpiará todo el contenido de la hoja *Datos básicos* (figura 52).

Microsoft Excel - ECOSAUT_Mod-MO2003.Manual.xls
Elle Edit View Insert Format Iools Data Window Help
⇒ Inicializar | Datos Básicos ▼ | Cálculos ▼ | Datos Calculados ▼ | Optimizar ▼ | Resultados ▼ | Terminar ▼ _

Figura 52. Menú Inicializar, para reiniciar el modelo

Usted debe ser consciente de que los datos que se encontraban allí no son guardados y se perderán.

Bibliografía

Arce, J.

1991 "Desarrollo de modelos para la transferencia de agro-tecnología en el altiplano peruano". *En Perspectivas de la investigación agropecuaria para el altiplano*. Lima: Convenio Agencia Internacional Canadiense de Desarrollo, Centro Internacional de Investigación y Desarrollo e Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, pp. 49-66.

Le Tacon, Ph.

1989 "Manifestation des risques climatiques à l'echelle de l'exploitation agricole, conséquences sur les pratiques paysannes. Cas de láltiplano bolivien. Mémoire d'étude". Dijon: ENSSAA-CNEARC.

Le Tacon, Ph., J. J. Vacher, M. Eldin Y E. Imaña

1991 "Los riesgos de helada en el altiplano boliviano". En D. Morales y J. J. Vacher (editores). *Actas del VII Congreso Internacional sobre Cultivos Andinos*. La Paz: Instituto Boliviano de Tecnología Agropecuaria-L'Institut Francais de Recherche Scientifique pour le Developpement en Cooperation.

National Research Council

1989 *Nutrient Requirements of Dairy* Cattle (Sixth Revised Edition Update 1989). Washington: National Research Council.

United States Department Of Agriculture. Agricultural Research Service

1999 *Soil & Water Assessment Tool SWAT 99.2.* En <www.brc.tamus.edu/ swat/>.

Vacher, J. J.

1988 *Agroclimatología del altiplano.* Informe final. Tomo 2. París: L'Institut Francais de Recherche Scientifique pour le Developpement en Cooperation.

Anexo

Reporte de la modelación hidrológica de la cuenca utilizando la interfase ArcView-SWAT

URC	HRU	A	REAkm2P	RECIPHIS	URQmin L	ATOmn (SW QremRE	/AFmr SA	RCHGDA	RCHGY	VYLDmm S	YLDsha PN	DEVPn PN	DSEPm
PAST		1	4.239	12.6	0	0.29	0	0	0	0	0.29	0	0	0
PAST		1	4.239	21.4	0	0.612	0	0	0	0	0.512	0	0	0
PAST		1	4.239	2.9	0	0.07	0	0	0	0	0.07	0	0	0
PAST		1	4.239	0	0	0.001	0	0	0	0	0.001	0	0	0
PAST		1	4.239	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PAST		1	4.239	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PAST		1	4.239	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PAST		1	4.239	7.2	0	0.031	0	0	0	0	0.031	0	0	0
PAST		1	4.239	37.5	0	0.996	0	0	0	0	0.996	0	0	0
PAST		1	4.239	45.4	0	3.035	0	0	0	0	3.035	0	0	0
PAST		1	4.239	96.5	0	4.339	0	0	0	0	4.339	0	0	0
PAST		1	4.239	39.1	0	1.43	0	0	0	0	1.43	0	0	0
PAST		1	4.239	263.5	0	10.804	0	0	0	0	10:304	0	0	0
PAST		1	4.239	19.3	0	0.396	0	0	0	0	0.396	0	0	0
PAST		1	4.239	30.4	0	0.964	0	0	0	0	0.964	0	0	0
PAST		1	4.239	22	0	0.676	8	0	0	8	0.576	0	0	0
PAST		1	4.239	46.5	0	1.036	0	0	0	0	1.036	0	0	0
PAST		1	4.239	48.5	0	0.096	0	0	0	0	0.996	0	0	0
PAST		1	4.239	19	0	0.928	0	0	0	0	0.928	0	0	0
PAST		1	4.239	40.5	0	0.797	0	0	0	0	0.797	0	0	0
PAST		1	4.239	41.7	0	1.519	0	0	0	0	1.519	0	0	0
PAGE		1	4.239	44.6	0	1.010	0	0	0	0	1.019	0	0	Ó
PAST		1	4.239	21.9	0	0.989	0	0	0	0	0.989	0	0	0
PAST		11	4.239	114.9	0	4,324	0	0	0	0	4.324	0	0	0
PAST		1	4 239	49.1	0.007	3.546	0	0	0	0	3.548	0.001	0	0
PAST		1	4.239	498.4	0.007	17.088	0	0	0	U	17.091	0.001	0	0
PAST		1	4.239	26.5	0	0.814	0	0.	0	0	0.814	0	0	0
PAST		1	4.239	31.3	0	0.717	0	0	0	0	0717	0	0	0
PAST		1	4.239	84.1	0	2.563	0	0	0	0	2563	0	0	0
PAST		1	4.239	88.2	0.062	5.109	0	0	0	Ö	5.155	0.041	0	0
PAST		1	4.239	188.8	7.002	10.743	0	0	0	0	17.727	15 935	0	0
PAST		1	4.239	31.4	0	1.797	0	0	0	0	1.797	0	0	0
DACT			4 239	37.5	0	1.005	0		10		1.025	0	0	

En celeste se destacan los valores de aporte de sedimentos y agua al caudal por parte de cada una de las unidades de respuesta hidrológica.

Proyecto Regional Cuencas Andinas (CONDESAN-REDCAPA-GTZ) CIP, La Molina 1895 - Lima 12, Perú Telf: (51-1) 349-6017 Anexo: 2181 Fax: (51-1) 317-5326 www.condesan.org/cuencasandinas