

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE ECONOMIA

**MAESTRIA EN ECONOMIA DEL MEDIO AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS
NATURALES (PEMAR)**

**ESTIMACION DE LA DEMANDA POR AGUA DE RIEGO EN LA PROVINCIA
AVAROA, DEPARTAMENTO DE URURO-BOLIVIA: ENFOQUE DE LA
PROGRAMACION DINAMICA**

Artículo Publicable

**Realizado por:
JOSE MIGUEL HERRERA YUCRA**

**Asesor:
Dr. JORGE HIGINIO MALDONADO**

**BOGOTA D.C.
2005**

RESUMEN

Dado que el agua es un recurso escaso y valioso económicamente, se necesita estimar un precio real del mismo a partir de la función de demanda por agua para optimizar su uso. El presente trabajo toma en cuenta el problema de la estimación de la demanda por agua de riego. Se desarrolla un modelo de programación dinámica para explicar un plan de manejo de riego óptimo. Basado en una aproximación microeconómica describiendo el comportamiento del agricultor, el modelo económico se combina con un modelo agronómico (CropSyst), con el cual se busca el máximo beneficio asociado a cantidades de agua determinadas. Con estos datos se estima por métodos paramétricos una función de beneficios. La función de demanda de agua por riego es estimada usando un procedimiento de derivación.

La aplicación se realiza en la Provincia Avaroa del Departamento de Oruro-Bolivia, donde el consumo de agua es pagado por una cuota fija. Los resultados obtenidos muestran que para pequeñas cantidades de agua disponible la demanda parece ser inelástica, si uno incrementa la cantidad de agua disponible, la forma de la curva cambia y la demanda parece ser más elástica. La cantidad y precio al cuál ocurre este cambio es $1.500 \text{ m}^3/\text{ha}$ y $0,89 \text{ Bs/m}^3$ ($0,11 \text{ US\$/m}^3$)¹ respectivamente

El valor del agua para esta zona oscila entre Bs. 0,43 (US\$ 0,053) y Bs. 0,49 (US\$ 0,061) por metro cúbico (m^3) superando en gran medida el precio que se cobra por el recurso. Empíricamente se muestra que existe una relación inversa del volumen de agua disponible con el precio.

Estos resultados son una importante información para el regulador, con el fin de analizar los efectos de una política de regulación del agua basada en los precios. El impacto de un incremento del precio del agua va a depender de la localización del precio inicial sobre la función de demanda y de la cantidad de agua disponible para la estación de riego.

¹ Tipo de cambio al 16/11/05, US\$ 1= Bs 8,08

AGRADECIMIENTOS

Al culminar el presente trabajo quiero agradecer a las personas que directa e indirectamente han contribuido a su realización, pero en especial:

- A Dios, nuestro padre celestial por su ayuda incondicional durante toda nuestra vida.

- A mi familia, por su apoyo brindado durante toda la etapa de estudio, en especial a mis padres, por el apoyo y la confianza depositada en uno para la realización y culminación de la tesis y por transmitirme ese espíritu de lucha y superación.

- Al Dr. Jorge Higinio Maldonado, mi asesor de tesis, por su guía, disponibilidad de tiempo, sus comentarios y valioso aporte por llevar adelante el trabajo.

- Al Dr. Ramón Rosales y Dr. Javier Rozo, mis jurados, por sus sugerencias y comentarios en la evaluación del trabajo.

INDICE

1.- INTRODUCCION.....	1
1.1.- Asignación eficiente de agua	1
1.2.- Uso del agua en Bolivia	3
2.- OBJETIVOS.....	11
3.- MÉTODOS PARA ESTIMAR DEMANDA DE AGUA.....	11
4.- METODOLOGÍA.....	14
4.1.- Modelo analítico.....	15
4.2.- Definición del valor del agua.....	20
4.3.- Estimación de la función de demanda	21
5.- MARCO EMPIRICO.....	21
5.1.- Datos.....	21
5.2.- Procedimiento.....	23
5.3.- Simulaciones.....	24
6.- RESULTADOS.....	26
6.1.- Función de beneficios.....	27
6.2.- Función de demanda por agua de riego.....	29
6.3.- Análisis económico.....	31
7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	32

8.- REFERENCIAS.....	36
----------------------	----

9.- ANEXOS

9.1.- Anexo 1. Condiciones necesarias de optimalidad.....	39
9.2.- Anexo 2. Programas de riego.....	41
9.3.- Anexo 3. Salidas EVIEWS. Formas funcionales y gráficas.....	42

1.- INTRODUCCIÓN.

1.1.- Asignación eficiente de agua.

La asignación del recurso agua es un tema que está siendo discutido en todo el mundo. El recurso agua se está volviendo escaso y está tomando mayor importancia en el ambiente natural ya que la disponibilidad de agua para uso humano está disminuyendo (Schoengold, 2003).

La demanda por los recursos de agua dulce se esta acelerando y la competencia por la misma es una preocupación cada vez mayor por parte de los planeadores y diseñadores de política. Actualmente el 70% de agua dulce extraída en el mundo entero es usada para agricultura, mientras que el 20% se usa en la industria y solamente el 10% en el consumo municipal (ONU, 2003).

La actual expansión global de la tierra cultivable es muy pequeña, alrededor del 0,1% anual, mientras que la producción se está incrementando alrededor del 1,9%. Este incremento en la producción es el resultado de la intensificación y un componente clave de ésta es el riego (ONU, 2003).

El riego es una forma de protegerse del riesgo climático, pero es una solución costosa que puede someterse a dificultades del recurso agua. Un conocimiento de los consumos de agua para riego es importante para asegurar la eficiencia y mejorar la gestión de los recursos.

Es así como el 40% del suministro de comida está creciendo bajo riego y existe una presión en aumento para incrementar el riego a pesar de los problemas reconocidos (salinización, erosión y anegamiento).

El uso de agua para riego genera una disminución en la calidad y cantidad de agua, con implicaciones en el funcionamiento de los ecosistemas, por el excesivo consumo del recurso para la agricultura. Sin embargo, como área de demanda, el campo está a menudo distante de las áreas de necesidades críticas, urbanas/industriales, entonces esos vínculos son frecuentemente ignorados (Morales *et. al.*, 2000)

La irrigación de cultivos usa un alto volumen de agua, especialmente en áreas de escasez de agua, debido a las bajas precipitaciones que se dan en esas zonas. En ésta situación, como el agua se vuelve escasa, los realizadores de política intentan inducir a los

agricultores a reducir el consumo de agua con la implementación de medidas económicas, tales como cuotas o un sistema de precios.²

Reformas recientes sobre políticas de agua han sido implementadas para hacer que los agricultores respondan a la conservación de este recurso, por ejemplo se está incentivando a éstos a pagar por el agua su verdadero valor (Dinar, 2000).

En cuanto al sistema de precios, el papel de precio del agua para manejo del recurso es ampliamente reconocido por la escasez de este recurso. Ya que existe una alta competencia entre uso del agua y degradación ambiental, incrementos en el precio del agua podrían aliviar el conflicto entre oferta y demanda de agua, por que se supone que el valor del agua está muy por debajo de su valor económico, encontrando un precio que refleje ese valor económico va a hacer que el consumo por riego disminuya (Lui, 2002).

El precio del agua es una respuesta a la realidad económica implementada por la necesidad de crear y mantener una oferta, incluyendo el tratamiento del agua. Se señala que si algo no tiene un valor claro se devalúa, ponerle un precio va a hacer que la gente le de su verdadero valor (Llamas, 1999). Se requiere implementar un sistema de precios que haga que el valor marginal del agua para el usuario refleje exactamente su costo marginal para la implementación de un mercado de agua.

Para optimizar el uso de agua en un distrito de riego es necesario determinar su precio o costo de oportunidad, el cuál es el valor de bienes y servicios al cuál se renuncia por usar un recurso escaso para determinado propósito en vez de su siguiente mejor uso alternativo. La mejor manera de determinar el costo de oportunidad del agua en un distrito de riego es la estimación de su valor marginal, el cuál es su precio sombra (Palacios, 1976; Gibbons, 1986; Le Moigne *et al.*, 1994; Young, 1996) a partir de la estimación de la función de demanda. El valor marginal representa el incremento en el valor total debido a una unidad adicional de agua y puede considerarse el elemento básico para estimar cuánto podría pagar un usuario por metro cúbico de agua utilizado.

Según Robinson y Eatwell (1992), el agua se considera un bien económico por su carácter de bien escaso. El agua tiene un valor de uso, para quien esté dispuesto a pagar por

² Este problema ha sido mencionado por los economistas desde mucho tiempo atrás; el primer volumen de American Economic Review en 1911 contiene un paper sobre este problema (Coman, 1911)

él, los consumidores van a usar agua hasta que los beneficios del uso de un metro cúbico adicional exceda el costo en que se incurre. Para bienes económicos normales, este valor puede teóricamente ser medido mediante la estimación del área bajo la curva de demanda; el problema es que no existen mercados para el agua o son altamente imperfectos y por eso no es simple estimar este valor para los diferentes usuarios (Briscoe, 1996).

En cuanto a los costos del agua, existen tres diferentes tipos de costos incurridos en proporcionar este recurso. Primero, costo de construcción y de operación de la infraestructura necesaria que incluye la distribución del agua. Segundo, el costo de oportunidad incurrido cuando uno usa el agua el cuál afecta el uso del recurso para otro usuario. Hay un costo de oportunidad percibido por la sociedad debido a la mala asignación del recurso, este costo es cero sólo cuando no hay un uso alternativo. Ignorar este costo conduce a fallas en la inversión y causa fallas de asignación del recurso entre usuarios. Tercero, el costo de la externalidad referidos a la sobre extracción o contaminación de lagos y acuíferos (Lui, 2002).

Para determinar el precio del agua se debe estimar la disponibilidad a pagar por parte de los agricultores por el recurso, esto se hace mediante la estimación de la función de demanda de agua de riego.

1.2.- Uso del agua en Bolivia.

Bolivia ocupa la parte central de América del Sur, por el norte limita con el Brasil, por el este y sudeste con el Paraguay, por el sur con Argentina y Chile y por el oeste con Chile y Perú. La superficie de Bolivia alcanza 1'098.581 Km², distribuida en una compleja morfología. Más del 60% del territorio se encuentra debajo de los 500 m.s.n.m., aproximadamente el 15% entre los 500 y 2.500 m.s.n.m. y el restante 25% por encima de los 2.500 m.s.n.m. (Morales *et al.*, 2000)

El sistema hidrográfico de Bolivia comprende tres grandes vertientes: la vertiente Amazónica con una extensión aproximada de 724.000 Km², ocupando el 65.9% del territorio nacional; la vertiente cerrada o endorreica que cubre 145.081 Km² de superficie (13.2%) y la vertiente del Plata que abarca 229.500 Km² (20.9%) del territorio nacional.

En el sector rural, a pesar de que el avance ha sido importante, se cuenta con índices de cobertura menores que los urbanos, referido principalmente a la instalación de redes domiciliarias de agua y del desagüe. Los problemas que afectan a ésta categoría poblacional están derivados de aspectos financieros, poca capacidad municipal para generar proyectos y canalizar financiamiento hacia ellos y aspectos derivados de las condiciones de dispersión de la población (PRONARYD, 2002).

En el caso de la región andina, la escasa cobertura vegetal, la reducida precipitación y las condiciones adversas de clima obligan a realizar una agricultura intensiva y una ganadería extensiva. En esta zona (que se circunscribe en su mayor parte a la vertiente endorreica) se asienta casi un 40% de la población de Bolivia que en su mayoría se dedican a actividades agrícolas, mineras y de comercio (Mattos y Crespo, 2000)

Como es de suponer, las restricciones hídricas se presentan en las regiones áridas y semiáridas del país, que representan aproximadamente el 42% de la extensión total de Bolivia, donde los valores de precipitación en la meseta del Altiplano varían de 200 mm. a cerca de 600 mm. por año. La estación lluviosa, se concentra en el verano se inicia generalmente en diciembre para concluir en marzo. De 60 a 80 % de las precipitaciones ocurren durante estos 4 meses. La estación seca es en invierno, con un mínimo entre Mayo a Agosto.

Se observa una distribución heterogénea de la precipitación, donde la vertiente Endorreica es una región con poca disponibilidad de agua en relación a las otras regiones hidrográficas o vertientes (Mattos y Crespo, 2000).

La superficie potencial de riego en Bolivia, teniendo en cuenta la aptitud del clima, suelos y recursos hídricos, se estima aproximadamente en dos millones de hectáreas. Las principales limitaciones al desarrollo del riego en Bolivia son de carácter técnico (disponibilidad hídrica, fisiografía irregular y topografía accidentada, altitud y clima), social (capacitación, capacidad técnica y capacitación de los usuarios), institucional (ausencia de una institución central de planificación y normativa) y económico financiero.

De las cerca de 129.000 ha. que se encuentran inventariadas en 1999 como superficie bajo riego de verano en Bolivia, se estima que la mayor parte son regadas a partir de aguas superficiales (presa de derivación o toma directa), mientras que una pequeña parte

se riega a partir de aguas subterráneas (pozos y galerías filtrantes). Dentro de otro tipo de captaciones se incluyen manantiales, obras sin toma, trincheras, etc. (Mattos y Crespo, 2000).

Los principales cultivos en riego del Altiplano son patatas, alfalfa, coca, quinua y otros cereales; en los Valles se cultiva maíz, frutales, hortalizas, cereales, legumbres y patatas, mientras que en los llanos se está desarrollando una agricultura comercial con buenas perspectivas futuras: caña de azúcar, algodón, soja, café, etc., especialmente para cultivos destinados a la exportación (Morales *et. al.*, 2000)

En Bolivia el PRONARYD (2002) ha inventariado 5.743 sistemas de riego de los cuáles 5.459 se encuentran en funcionamiento. El 98 % de estos sistemas de riego son de uso agrícola y sólo un 2 % tiene un uso pecuario (bofedales). Un total de 4.724 sistemas de riego que comprenden microriego, pequeños, medianos y grandes sistemas sirven para regar 226.564 hectáreas y benefician a 217.975 familias.

El grueso de los sistemas de riego en Bolivia se encuentra concentrado en el departamento de Cochabamba: 1.035 sistemas benefician a 81.925 familias y abarcan 87.534 hectáreas regadas. En términos porcentuales casi el 40 % del total de la superficie regada inventariada se encuentra en Cochabamba, el 16 % en Tarija, otro 16 % en La Paz, el 9,4 % en Chuquisaca y del 6 al 7 % en cada uno de los departamentos de Oruro, Potosí y Santa Cruz (PRONARYD, 2002)

Se pueden distinguir tres tipos diferentes de sistemas de riego en Bolivia: públicos, mixtos y privados. Existen sólo dos sistemas de riego públicos: La Angostura (Valle de Cochabamba) con 5.500 ha. y Tacagua (Oruro) con 5.357 ha. en los cuáles el Estado se encarga de los valores de operación y mantenimiento. Ambos se riegan a partir de pequeñas presas y redes de canales en tierra para el riego por superficie. El número de usuarios se estima alrededor de 6.000 y 1.200 respectivamente (PRONARYD, 2002), la eficiencia total del sistema de riego³ se estima entre el 30 y 40% en el primero y menor del 30% en el segundo.

³ La eficiencia total del sistema está estimado por un índice que incluye: Eficiencia en captación (Ecap.), Eficiencia en conducción (Econ.), Eficiencia en distribución (Edist.) y Eficiencia en aplicación (Eapl.). Entonces para la represa de Tacagua se tiene con datos estimados en un estudio de campo realizado por el Ing. García, 2003. $ET = Ecap.*Econ.*Edist.*Eapl. = 0,90*0,50*0,85*0,74 = 0,28$ aproximadamente.

El sistema de riego público de la represa Tacagua está ubicado en la jurisdicción del Municipio de Challapata, Provincia Avaroa del Departamento de Oruro, a 130 Km, al sudeste de la ciudad de Oruro, a unos 3.720 m.s.n.m., planicie altiplánica que corresponde a la zona Endorreica. Las características climáticas de la zona están basadas en los registros proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), correspondiente a la estación climática Tacagua de la gestión de 1981 a 2002. Se tomó esta estación por ser la estación más cercana a la zona. De acuerdo a este informe, la precipitación anual alcanzó en los últimos años un valor promedio de 343 mm/año, la evaporación total promedio es de 129.5 mm/año (SENAMHI).

De acuerdo con la clasificación del clima, por el método de Holdrige (1987) basada en zonas de vida de la región Central, la provincia Avaroa, posee un clima frío templado, semiárido con vegetación de estepa y con invierno seco (Consultora “H y S”, 2003)

La represa de Tacagua beneficia a 1.138 familias; esta represa está diseñada para regar 5.357 ha.; podría señalarse que en promedio la represa regaría 4,70 ha. por familia. La capacidad máxima de la represa es de 29,31 MMC (millones de metros cúbicos).

Las principales fuentes de abastecimiento de la represa lo constituyen el Lago Poopo y las subcuencas del río Crucero, del río Berenguela y del río Huacarani.⁴

Los diferentes estudios en la Provincia Avaroa, dan referencia que el potencial más importante, es la producción agrícola de forrajes, que tiene su incidencia en el ganado lechero (bovino y ovino). La importancia de esta producción forrajera se evidencia con el pasar del tiempo, ya que algunos cultivos fueron reemplazados, principalmente por la producción de alfalfa (Ver Tabla 1).

⁴ Según datos de la Estación Tacagua

Tabla 1: Evolución de los cultivos bajo riego (has.)

Año	Alfalfa	Haba	Cebada grano	Cebada forrajera	Papa	Trigo y otros	Total
1967-1968	739	759	182	216	167	127	2.190
1968-1969	586	779	310	116	55	114	1.959
1969-1970	713	1.030	278	216	84	130	2.552
1970-1971	851	909	397	154	254	149	2.713
1976-1977	989	923	331	245	218	168	2.874
1977-1978	1.167	784	320	553	222	113	2.959
1978-1979	1.366	829	437	196	161	111	3.098
1983-1984	1.502	831	391	297	190	132	3.343
1984-1985	1.707	734	409	252	244	133	3.479
1985-1986	1.892	715	331	289	242	119	3.587
1990-1991	2.138	653	308	367	176	94	3.738
1991-1992	2.482	600	335	333	55	102	3.907
1992-1993	2.764	677	432	141	88	70	4.172
1993-1994	2.900	400	160	115	40	70	3.685
1994-1995	3.343	260	52	282	15	27	3.979
1997-1998	3.754	264	27	314	13	48	4.420
1999-2000	3.403	46	212	82	14	5	3.761
2000-2001	4.234	20	349	27	9	9	4.649
2001-2002	4.836	64	318	112	22	6	5.357

Fuente: Administración Tacagua 2003

La variedad de alfalfa más utilizada es la Ranger, en menor proporción le siguen Altiplano, Africana y la Boliviana (Moapa, Riviera y Bolivia 2000). Una evaluación de campo en el Centro Agropecuario Condoriri, ubicado en el departamento de Oruro nos permite afirmar que aproximadamente un 30% son cultivos con una edad mayor a los 10 años, con baja cobertura y rendimiento (Consultora “H y S”, 2003).

En esta comunidad, la economía del agua es de vital importancia para el sostenimiento del estrato arbóreo, forrajes y cultivos andinos, debido a los periodos de sequía. La producción se basa en el sistema de riego, ya que la producción sin riego se realiza en menor cantidad (Ver Tabla 2).

Tabla 2: Cultivos con y sin riego. Gestión agrícola 2001/2002

Cultivos	Superficie cultivada (ha.)		Total	% del total bajo riego
	Con riego	Sin riego		
Alfalfa	4.836	1.497	6.332	74
Haba	64	1.225	1.288	15
Cebada Forrajera	112	96	208	2,4
Cebada grano + trigo	323		323	3,8
Papa	22	391	412	4,8
Total	5.357	3.208	8.565	100
Porcentaje	62,5	37,5	100	

Fuente: García , 2003

Uno de los cultivos que mayor riego emplea es el cultivo de la alfalfa, ya que el 90% de la superficie regada se dedica exclusivamente a producir este grano (Ver Tabla 3).

Tabla 3: Cédula actual de cultivos bajo riego. Gestión agrícola 2001/2002

Cultivo	Superficie has.	Porcentaje
Alfalfa	4.836	90
Cebada grano	318	6
Cebada Forrajera	112	2,1
Haba	64	1,3
Papa	22	0,5
Trigo	5	0,1
Total	5.357	100

Fuente: Consultora "H y S" 2003

El rendimiento de la alfalfa en materia seca fluctúa de 3,3 a 8,9 tn/ha/año, con una media de 6,1 toneladas/hectárea/año (Ver Tabla 4).

Tabla 4: Volúmenes de producción y rendimiento de cultivos bajo riego actual (2003)

Cultivo	Área total en has.	Rendimientos tn/ha.	Volumen de producción
Alfalfa	4.836	6,1	29.450
Cebada grano	318	1,3	407
Cebada forrajera	112	2,6	2.975
Haba	64	1,7	113
Papa	22	3,4	74
Trigo	5	1,3	6,5

Fuente: Consultora "H y S" 2003

La alfalfa se está constituyendo en el cultivo de preferencia de los agricultores en la zona donde está ubicada la represa de Tacagua, principalmente debido a que ésta es una planta de recuperación rápida después del corte, resistente al frío y a la sequía, gracias a la capacidad de entrar en un periodo de dormancia o letargo.

Este cultivo ha desarrollado alto potencial para las condiciones prevalentes en el Altiplano ya que brinda oportunidades de maximizar la producción forrajera en comparación con otro tipo de cultivos; se constata que los factores agronómicos brindan mayor posibilidad de incremento en la productividad que los factores genéticos. Específicamente hablando sobre el cultivo de la alfalfa, es así que solamente con riego, se puede tener mucho más impacto que con la liberación de nuevos cultivares (Meneses, 2003).

Tradicionalmente, las aguas de riego no son pagadas; en algunos casos los sistemas tienen alguna forma de administración, logrando cubrir parcialmente los costos de mantenimiento.

La inexistencia de un marco regulatorio no ha permitido la formación de un sistema administrativo del recurso hídrico sólido. A través de la historia de Bolivia diversas instituciones públicas se han hecho cargo de la administración del recurso, desde Ministerios hasta instituciones independientes.

La legislación boliviana con relación al recurso hídrico principalmente al agua de riego tiene su base en la Ley General de Aguas de 1906. Las consideraciones de esta Ley, en su mayor parte, se encuentran fuera de contexto por lo que se hace necesaria la aprobación de una nueva legislación acorde con los cambios estructurales que ha sufrido Bolivia y con los cambios que se realizan a nivel internacional. La Ley 2066 del 12 de Abril de 2002, Ley de Agua Potable y Alcantarillado, no hace referencia al agua de riego en sí, sólo se refiere a los servicios de saneamiento básico, transfiriendo al sector privado la responsabilidad del desarrollo, sostenimiento y administración de los servicios básicos.

Tradicionalmente, las aguas de riego no son pagadas vía tarifa por m³ de agua; existen algunos pagos asociados a la inscripción del regante, operación y mantenimiento, que se paga en un jornal de trabajo por cada hectárea.

La Legislación sobre aguas no contempla ningún tipo de pago por el uso del recurso. Los reglamentos relacionados con el agua para riego establecen que el pago que deberán realizar los agricultores será igual al costo de mantenimiento del sistema (especialmente para los sistemas de riego de La Angostura y Tacagua). Esta estrategia de desarrollo agrícola, hasta la fecha no considera la recuperación de la inversión, las amortizaciones de capital o ampliaciones del sistema.

En Challapata, donde se ubica la represa de Tacagua, el costo de utilización de agua de riego está distribuido de la siguiente manera (Ver Tabla 5):

Tabla 5: Costo de utilización de agua de riego por año

Detalle	Costo por ha/regada/año (Bs.)
Servicio de riego	7
Administración	3
Amortización de obras	1
Total	11

Fuente: Consultora "H y S" 2003

Como se ve en la anterior tabla el costo asciende a Bs. 11 que es un costo fijo, aproximadamente en dólares se tiene US\$ 1,36

El único proyecto de riego en Bolivia que tiene tarifas basadas en el volumen de agua es el proyecto San Jacinto⁵, donde se cobra 0.05 US\$/m³.

El Gobierno Central opta por un proyecto de Ley actual que introduzca el agua en el mercado y que el precio de la misma se fije por las reglas de oferta y demanda del recurso, mientras que las organizaciones campesinas y ambientalistas proponen un sistema más regulado y protegido con severas exclusiones.

Obviamente, en el uso del agua para riego, la entrega de agua con base en un tiempo fijo mensual (mita), hace que el uso de la misma sea altamente ineficiente ya que se riega más allá de la capacidad de campo de manera que el agua humedezca en exceso el terreno hasta que se tenga la nueva mita. Esto no necesariamente tiene que ver con las necesidades de la planta y más bien induce una pérdida de agua que como no es pagada o es fuertemente subvencionada, no repercute en la economía del agricultor pero sí en el bienestar social en su conjunto, ya que se tiende a proponer e implementar proyectos grandes para cubrir la

⁵ Represa ubicada en el departamento de Cochabamba- Bolivia

demanda de agua potable, con costos por metro cúbico que tienen que cubrir los gastos que se vayan a realizar y que se cobran vía tarifa.

2.- OBJETIVOS.

El objetivo principal del presente trabajo es encontrar un precio real de este recurso que refleje su valor económico a partir de estimar la función de demanda por agua de riego, estimando la disponibilidad a pagar por el recurso por parte de los agricultores, realizado en la localidad de Challapata-Provincia Avaroa, represa de Tacagua.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Encontrar programas de riego que hagan máximos los beneficios del agricultor.
- Encontrar el precio del agua que refleje el costo de oportunidad del recurso.
- Estimar las funciones de beneficios del agricultor que incluya el agua como insumo.
- Evaluar la capacidad de pago por el agua por parte de los agricultores.
- Proponer una política de regulación del recurso agua basada en los precios y plantear sus posibles efectos.

Con esta información (si es el caso) se incitaría a las grandes compañías de agua a invertir en áreas remotas. Esto facilitaría información para considerar rentable la construcción de pozos profundos en determinadas zonas donde este recurso es escaso y con esto se esperaría que los rendimientos de los principales cultivos del país puedan incrementarse con el riego.

La participación privada, en este marco, introduce necesariamente elementos de eficiencia en el manejo del servicio. Al contrario de la administración pública, la privada tiene mayor facilidad y disposición para identificar costos, tarifas y otros elementos económicos que afectan la eficiencia.

3.- MÉTODOS PARA ESTIMAR DEMANDA POR AGUA.

Existen varios métodos para la estimación de funciones de demanda por agua de riego, que se pueden clasificar en valoración directa y valoración indirecta. Bajo el enfoque de valoración directa se destacan el método de precios de mercado y el método de valoración contingente. El enfoque de valoración indirecta reúne metodologías como el

cálculo de la función de demanda a partir de las funciones de producción de los productos, el método del valor residual, el método del ingreso marginal neto, el método de precios hedónicos, el método de programación matemática, entre otros. Sin embargo, cada uno de ellos tiene su propio contexto de aplicabilidad dependiendo de la información disponible (Garcés, 2004)

Existen pocos estudios que estiman demanda de agua para agricultura, una de las razones para esto es la dificultad de obtener datos de uso de agua por los agricultores. Algunos de ellos se detallan a continuación.

- Estudios de Caswell y Zilberman (1986) muestran que un incremento en precio del agua conduce a la adopción de sistemas de riego más eficientes. Estos autores usan datos de California para estimar cómo los agricultores adoptan nuevas tecnologías de riego cuando se incrementa el precio del agua. Ellos también muestran que es importante incluir características de calidad de tierra, así la respuesta en cambios en precios va a variar de acuerdo con las características del suelo.

Estos autores muestran que cuando el precio del agua se incrementa, los ahorros incurridos por usar menos agua van a ser compensados por la instalación de sistemas de riego más eficientes. Un resultado intuitivo de su análisis, es que un propietario de una tierra de baja calidad va a adoptar tecnología eficiente de riego a un precio bajo del agua a diferencia del propietario de un terreno de alta calidad.

- En un trabajo de Ogg y Gollehon (1989) se usan datos del Oeste de Estados Unidos para estimar demanda de agua para la agricultura. Ellos usan datos de sección cruzada y encuentran una demanda inelástica, estimando una elasticidad precio en el rango de -0,26 a -0.07, encontrando diferencias entre regiones y entre diferentes especificaciones de demanda.

- Faux y Perry (1999) emplearon la metodología de precios hedónicos para valorar el agua de riego en Oregon, Estados Unidos, con el fin de facilitar la reasignación del recurso en nuevos usos. Se asumió que las características que definían los precios de los terrenos eran: ubicación, valor de las construcciones y calidad del suelo tomando en cuenta la existencia de agua de riego y su fuente. La información sobre precio de los terrenos y sus características fueron obtenidas en registros de venta de fincas en el período 1991 – 1995

en la zona de estudio y estimaron que el valor del agua de riego era US\$9 por acre-foot para la tierra irrigada menos productiva y US\$44 por acre-foot para la más productiva (aproximadamente US\$ 0,0073 y US\$ 0,036 por m³, respectivamente)⁶.

· Moore (1999), bajo la metodología de valor residual desarrolla un modelo de bienestar del irrigador y disponibilidad a pagar, siguiendo el enfoque dual partiendo de una función de ingreso multiproducto. El precio sombra (ingreso marginal) del agua es calculado para medir la disponibilidad a pagar por acre-foot de agua. El modelo fue estimado económicamente con información disponible para 13 distritos en California, Estados Unidos, obteniendo funciones de precio sombra a nivel de distrito para el periodo 1981 – 1991. Como resultados del estudio, el autor estimó que para el año 1989, el rango de precio sombra para 12 distritos es US\$42 – US\$70 por acre-foot (aproximadamente US\$ 0,034 – US\$ 0,057 por m³) y la media del precio sombra para el periodo 1985 – 1989 para 11 distritos cae al rango US\$44 – US\$65 por acre-foot (US\$ 0,0062- US\$0,0085 por m³).

· Bontemps y Couture (2002) usan un modelo dinámico para estimar la demanda por agua de riego en el sudoeste de Francia; ellos usan simulación de datos (EPIC-PHASE) y aplican el análisis a un solo cultivo (maíz) y encuentran una demanda de agua de riego no lineal; en tierras áridas la demanda de agua es inelástica y a medida que la cantidad de agua se incrementa, ésta se convierte en elástica. Usando un análisis de programación dinámica, ellos son capaces de determinar el punto de inflexión donde la demanda se vuelve elástica.

· Otro estudio el cuál tiene la finalidad de estimar el valor económico del agua de riego (superficial y de pozo) en el distrito de riego 011 Alto Río Lerma en México (Cruz, Valdivia y Scott 2002). Para ello se modelan escenarios mediante técnicas de programación lineal con énfasis en la posibilidad de reducir la disponibilidad de agua entre el 18 y 24%. La tierra, el agua, la mano de obra y la maquinaria agrícola son las restricciones del modelo. Los beneficios netos (precios netos) son la diferencia entre el ingreso bruto y los costos de producción. El ingreso neto, el patrón de cultivos y el ingreso marginal son reportados. El ingreso marginal es usado como el precio sombra del agua de riego, y de acuerdo con los resultados oscila entre \$0.54 y \$2.28/m³ para agua superficial (pesos

⁶ Un acre-foot es igual a 1.233,5 metros cúbicos.

mexicanos), aproximadamente en dólares 0.048 y 0,20/m³ respectivamente⁷, y entre \$0.66 y \$6.85/m³ para agua subterránea (en dólares 0,059 y 0.61/m³ respectivamente), llegando este caso hasta \$1.52/m³ para cultivo altamente rentables (aproximadamente US\$ 0,135).

· Garcés (2004) estimó el valor económico del agua para riego en México empleando información básica a nivel agregado de 14 distritos de riego para el periodo comprendido entre los años agrícolas 1992-1993 y 2000-2001. Utiliza el modelo de valor residual sobre un sistema multiproducto en donde se parte de la estimación de una función de ingresos con una forma cuadrática normalizada, de la cuál se deriva una función de precio sombra que determina el valor marginal del agua. La evidencia empírica muestra que este valor oscila entre Mex\$ 0,05 y Mex\$ 2,33 por metro cúbico de agua (US\$ 0,044 y US\$ 0,1982 por m³) superando en general los costos de oferta del recurso que oscilan entre Mex\$ 0,04 y Mex\$ 1,1 por metro cúbico (US\$ 0,0035 y US\$ 0,0977 por m³ respectivamente).

En cuanto a trabajos realizados en el altiplano Boliviano no se tiene ninguna referencia hasta el momento, el único trabajo que llega a mencionarse en cuánto a la estimación de demanda por agua pero de agua potable, es el trabajo de Mercado (2004).

4.- METODOLOGÍA.

El presente estudio utiliza la valoración indirecta. El cálculo de la función de demanda por agua está basado en la disponibilidad a pagar por tener una unidad adicional de agua por el agricultor, en un escenario de escasez.

La función de demanda por agua de riego es obtenida a través de un programa secuencial de decisión, el cuál consiste en una asignación óptima intra-estacional, sin considerar la asignación inter-temporal. El procedimiento de estimación está basado en una generación de datos, a partir de la integración de un modelo de crecimiento del cultivo, un modelo económico y un método de estimación paramétrica (Bontemps y Couture, 2002).

Lo importante es el modelo de simulación del crecimiento del cultivo. El modelo de simulación de rendimiento de cultivo reproduce su comportamiento, permite seleccionar distintos ambientes de simulación y evaluar la respuesta al ambiente que lo circunda. El

⁷ Tipo de cambio 1 dólar (US\$) = 11.25 pesos mexicanos (\$)

modelo agronómico tiene que ser adecuado y calibrado al cultivo, a la tierra y al clima que se desea estudiar. Flinn y Musgrave (1967) fueron los primeros economistas en estimar una función de respuesta al agua por simulaciones y desde entonces ésta metodología ha sido aplicada ampliamente por numerosos economistas agrícolas.

En el presente trabajo, se adecua el programa de simulación agronómica CropSyst (Donatelly, Stöckle y Nelson, 1998) para el cultivo de alfalfa, ya que éste es el principal cultivo de la región; este programa de simulación tiene una ventaja mayor sobre otros simuladores, si es adecuadamente calibrado (Jara y Stöckle, 1999)

Este programa puede simular el crecimiento del cultivo con diferentes cantidades de riego y con el pronóstico del clima. Con esta información se logrará obtener diferentes rendimientos del cultivo para diferentes cantidades de agua, lo que se trata es de obtener la respuesta del cultivo a la cantidad de agua aplicada.

Una vez que se tenga los rendimientos en función a las cantidades de agua, se va aplicar un modelo económico, dados los precios de insumos y del producto el modelo económico va a generar los beneficios máximos para cada secuencia de decisión en función a la cantidad de agua aplicada. Con los pares de datos obtenidos de beneficios y cantidades de agua se estima la función de beneficios de forma paramétrica (Bontemps, Couture y Favard 2001) y a partir de ella se estima la función de demanda por agua de riego.

4.1.- Modelo analítico.

Bontemps y Couture (2002) proponen un método para estimar la demanda por agua de riego. El presente estudio se basa en el modelo descrito por esos autores.

Considere un agricultor neutro al riesgo, quien encara un problema de una decisión secuencial de riego para $t = 1, \dots, T$ con $T-1$ decisiones. Al periodo 1 el agricultor conoce perfectamente la cantidad total de agua disponible para la estación Q , el stock de agua inicial en la tierra \bar{V} y el estado de la biomasa del cultivo M . A cada decisión, el agricultor tiene determinado riego, usando una cantidad de agua denotada por q_t a cada fecha t . Además si el agricultor no riega, entonces $q_t = 0$

Es una asignación óptima intraestacional del agua de riego dentro de un ambiente dinámico. Por consiguiente este es un problema de control óptimo de elecciones discretas para un horizonte finito o de cantidad de agua limitada, con las tres variables de estado

(M_t, V_t, Q_t) para $t = 1, \dots, T$.

La evolución de las tres variables de estado para los periodos $t = 1, \dots, T - 1$:

$$M_{t+1} - M_t = f(M_t, V_t) \quad (1)$$

$$V_{t+1} - V_t = g(M_t, V_t, q_t) \quad (2)$$

$$Q_{t+1} - Q_t = -q_t \quad (3)$$

En la ecuación (1) la expresión del desarrollo de la biomasa es una forma sintetizada de la dinámica del crecimiento de la planta (la función de transición de la biomasa es una función muy compleja que controla un número importante de variables. Para facilitar la presentación del marco teórico del análisis, simplemente se consideran estas dos variables como las más importantes). El cambio en el nivel de biomasa en algún momento es función de datos corrientes de la biomasa y stock de agua en la tierra. Esta función se asume continua, diferenciable y creciente en cada uno de sus argumentos ($f_M > 0$)⁸ y ($f_V > 0$)⁹.

La ecuación (2) es un balance de aportaciones – deducciones de stock de agua en la tierra. La función g , sintetiza el balance neto entradas – salidas. El cambio en el stock de agua en la tierra depende del estado de las variables nivel de agua y biomasa de la planta, así como de la decisión tomada en el periodo actual, decreciente con los dos primeros argumentos y creciente con el último.

La cantidad total de agua tiene una dinámica decreciente en la cantidad de agua utilizada (ecuación 3).

Existen restricciones técnicas sobre el riego representado por la ecuación $\underline{q} \leq q_t \leq \bar{q}$ donde \underline{q} y \bar{q} son valores exógenos, que representan la restricción tecnológica para el riego.

El periodo final ($t = T$) corresponde a la fecha de cosecha, supuesta exógena, cuando el cultivo actual se vuelve conocido.

⁸ $f_M = \frac{\partial f_t(M_t, V_t)}{\partial M_t}$

⁹ $f_V = \frac{\partial f_t(M_t, V_t)}{\partial V_t}$

Tenemos $Y(\cdot)$ denotado por la función de rendimiento de la planta o la función de producción del cultivo, aquella cantidad que depende sólo del final de biomasa al tiempo T y es denotado por $Y(M_T)$.

La función de beneficios por hectárea del agricultor puede ser escrita como:

$$\Pi = r \cdot Y(M_T) - C_{FT} - \sum_{t=1}^{T-1} (c \cdot q_t + \delta_t \cdot C_F) \quad (4)$$

donde r representa el precio del producto,

C_{FT} representa el costo fijo de producción

c precio del agua

δ_t variable dummy, que toma el valor de 1 si el agricultor riega y 0 si no riega.

C_F representa costos referidos a trabajo y energía.

El problema secuencial del agricultor es el siguiente

$$\text{Max}_{(q_t)_{t=1, \dots, T-1}} r \cdot Y(M_T) - C_{FT} - \sum_{t=1}^{T-1} (c \cdot q_t + \delta_t \cdot C_F) \quad (5)$$

$$\text{s/a} \quad \left\{ \begin{array}{l} M_{t+1} - M_t = f(M_t, V_t) \\ V_{t+1} - V_t = g(M_t, V_t, q_t) \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\text{y s/a} \quad \left\{ \begin{array}{l} Q_{t+1} - Q_t = -q_t \\ \delta_t = 0 \quad \text{si } q_t = 0 \\ \delta_t = 1 \quad \text{si } q_t > 0 \\ 0 \leq q_t \leq \bar{q} \\ M_t \geq 0, \quad V_t \geq 0, \quad Q_t \geq 0 \\ M_1 = \bar{M}, \quad V_1 = \bar{V}, \quad Q_1 = Q \end{array} \right. \quad (7)$$

Las restricciones en (6) son lo principal del proceso dinámico, mientras que las restricciones dadas en (7) reflejan la restricción técnica y física.

Vamos a aplicar la teoría de control, para obtener los resultados analíticos relativos a las condiciones necesarias que debería fijar la senda óptima de decisiones.

Así como $f(\cdot) > 0$, la planta crece siempre entre dos intervalos, así pues, $M_t > 0 \forall t \in [1, T]$, una situación donde la planta muere no es contemplada. Suponemos también que el depósito suelo jamás está vacío (si no la planta perece), y pues que $V_t > 0 \forall t \in [1, T]$. Resulta de eso que las variables de estado $M(t) > 0$ y $V(t) > 0$ jamás son saturadas sobre el intervalo $[1, T]$.

El agua contenida en el depósito suelo no tiene más valor después de la cosecha (se considera que no hay cultivos siguientes sobre la parcela).

Este problema es puramente analítico y las funciones f y g son desconocidas. Este problema va a ser resuelto usando un modelo de simulación agronómico y un procedimiento de optimización.

Las condiciones de optimalidad que describe el programa óptimo de riego son las siguientes (los detalles de los cálculos son dados en el Anexo 1).

· El principio de máximo discreto:

$$p_{t+1} = \begin{cases} < c + \alpha_{t+1} & \text{si } q_t = 0 \\ = c + \alpha_{t+1} & \text{si } q_t \in \left[\underline{q}, \bar{q} \right] \\ > c + \alpha_{t+1} & \text{si } q_t = \bar{q} \end{cases} \quad (8)$$

Las expresiones p_{t+1} , α_{t+1} y λ_{t+1} representan las variables adjuntas asociadas a la dinámica de las variables de estado. Se interpretan como las contribuciones marginales de una unidad adicional de la variable de estado sobre el objetivo final o los precios implícitos de estas variables a cada periodo de decisión. Esta condición (8) determina la oportunidad de una regada. Si el valor del agua en el depósito suelo p_{t+1} , es superior al valor de la cuota, α_{t+1} , aumentando el coste unitario variable, c , entonces el explotador agrícola riega; si no, no riega.

· El sistema de las ecuaciones adjuntas:

- Los valores de la biomasa

$\forall t = 1, \dots, T-1,$

$$\lambda_{t+1} - \lambda_t = -\lambda_{t+1} \cdot \frac{\partial f_t}{\partial M_t} \Big|_{(M_t^*, V_t^*)} - p_{t+1} \cdot \frac{\partial g_t}{\partial M_t} \Big|_{(M_t^*, V_t^*)} \quad (9)$$

La variación en el transcurso del tiempo de λ puede ser negativa o positiva. Depende del signo de $-\lambda_{t+1} \cdot \frac{\partial f_t}{\partial M_t} \Big|_{(M_t^*, V_t^*)} - p_{t+1} \cdot \frac{\partial g_t}{\partial M_t} \Big|_{(M_t^*, V_t^*)}$. De acuerdo a la hipótesis $\frac{\partial f_t}{\partial M_t} > 0$ y

$\frac{\partial g_t}{\partial M_t} < 0$, el valor futuro de la planta aumenta si la productividad marginal de la biomasa en

el depósito suelo es superior a la productividad marginal en valor de la biomasa.

- Los valores de la reserva útil:

$\forall t = 1, \dots, T-1,$

$$p_{t+1} - p_t = -\lambda_{t+1} \cdot \frac{\partial f_t}{\partial V_t} \Big|_{(M_t^*, V_t^*)} - p_{t+1} \cdot \frac{\partial g_t}{\partial V_t} \Big|_{(M_t^*, V_t^*)} \quad (10)$$

p_t puede aumentar o disminuir en el transcurso de la campaña; su sentido de variación

depende del signo $p_{t+1} - p_t = -\lambda_{t+1} \cdot \frac{\partial f_t}{\partial V_t} \Big|_{(M_t^*, V_t^*)} - p_{t+1} \cdot \frac{\partial g_t}{\partial V_t} \Big|_{(M_t^*, V_t^*)}$ que es indeterminado. El

valor del agua en el suelo aumenta si la productividad marginal del agua en el depósito suelo es superior a la productividad marginal del agua como factor de crecimiento de la biomasa.

- Los valores de la cuota:

$$\alpha_{t+1} - \alpha_t = 0 \quad \text{si} \quad Q_t > 0 \quad (11)$$

α_t es una constante, α , en tanto que el agricultor no haya agotado su cuota.

· Las condiciones de transversalidad

$$\lambda_T = r \frac{dY}{dM} \Big|_{(M_T^*)} \quad (12)$$

$$p_T = 0 \quad (13)$$

El valor marginal de la biomasa a la fecha de cosecha debe igualar al ingreso marginal, ecuación (12). El agua contenida en el depósito suelo no tiene más valor después de la cosecha (se considera que no hay cultivos siguientes en la parcela), ecuación (13).

La solución del empleo del programa es una secuencia óptima de decisión la cuál da:

$$q^*(Q) = \{q_t^*\}_{t=1, \dots, T-1} \quad (14)$$

Esta secuencia depende de la cantidad total de agua disponible para riego, Q .

Usando las ecuaciones (14) y (4), se va a obtener la función de beneficios optimizada, aquella que depende de Q y tiene la siguiente expresión:

$$\Pi^*(Q) = r \cdot Y^*(M_T) - C_{FT} - \sum_{t=1}^{T-1} (c \cdot q_t^*(Q) + \delta_t^* \cdot C_F) \quad (15)$$

4.2.- Definición del valor del agua.

Como cualquier otro bien, el agua va a ser usada por el agricultor mientras los beneficios del uso de una unidad adicional del recurso exceda su costo. Como el agua se vuelve un bien escaso, el valor del agua para el agricultor se vuelve cada vez más grande que el precio real del agua, c . El beneficio marginal $\frac{\partial \pi}{\partial Q}$ es más grande que el cargo por el agua c , por lo tanto el agricultor está dispuesto a consumir más agua que su cantidad total disponible.

Para una cantidad dada, se define el valor del agua como el máximo monto de dinero que el agricultor estaría dispuesto a pagar por el uso de una unidad adicional del recurso. Este costo de oportunidad, representado por $\lambda(Q)$, es definido como la derivada de la función óptima de beneficios con respecto a Q , entonces tenemos:

$$\lambda(Q) = \frac{\partial \Pi^*(Q)}{\partial Q}$$

evaluado para una cantidad determinada de agua.

El conocimiento de $\lambda(Q)$, para algún valor de Q , da la función de la disponibilidad a pagar por el agua para el agricultor. Esta función, usualmente denotado por $p(Q)$, es la

inversa de la función derivada de demanda de agua para riego, denotado por $Q(p)$, donde p es el precio de agua para riego (Bontemps y Couture 2002).

4.3.- Estimación de la función de demanda.

Para estimar la función de demanda, es necesario inicialmente tener datos relacionados con cantidades totales de agua y asociar beneficios máximos, y luego un procedimiento de estimación.

La estimación de la función de beneficios se la realiza usando la ecuación (15), la estimación de beneficios óptima, se apoya en el conjunto de datos simulados $(Q_i, \pi_i^*)_{i=1, \dots, n}$, obtenido por el modelo numérico (Bontemps y Couture, 2002). La función desconocida, $\pi^*(\cdot)$ es estimada de estos pares de datos (Q_i, π_i^*) . La estimación se realizará paramétricamente por regresión no-lineal, examinando varias especificaciones para estimar la función de demanda por agua de riego.

5.- MARCO EMPÍRICO.

5.1.- Datos.

Los datos a ser utilizados para el modelo de simulación son:

- El clima y la temperatura, son datos mensuales tomados de la Estación Meteorológica de la Represa de Tacagua para los años 1981 – 2002 (SENAMHI), los cuáles cubren el conjunto de situaciones climáticas en la región. El modelo utiliza las relaciones meteorológicas anteriores de esta estación y se considera estos datos como un escenario posible para la campaña de riego.
- Características del suelo en el área de riego.- Los suelos de la zona de riego de Challapata presentan una formación de tipo coluvial y aluvial, capa superficial de 0 - 45 cm. de textura franca a franca arcillosa, consideradas como suelos profundos, presentando una textura areno – limoso, arcilla – limoso y en gran parte arcilloso (suelos pesados), el pH es de neutro a ligeramente salino, oscilando entre 7 y 8,5 (Consultora “H. y S.”, 2003).

Topográficamente la zona presenta una planicie con ligera pendiente de 1 a 3%, en cuyos cerros la pendiente es dominante. Las características químicas del suelo desde el

punto de vista de fertilidad de suelos, presentan un bajo contenido de nitrógeno en los primeros horizontes, niveles bajos de fósforo y su fertilidad entre baja y media. La conductividad eléctrica de 0,790 umhos/cm (CE), nos indica la presencia de un suelo moderadamente salino donde los rendimientos de los cultivos son restringidos, por el contenido de materia orgánica alrededor del 3%, los suelos presentan un rango de bajos a moderados.

- El cultivo a ser utilizado para la estimación de la demanda de agua, es el cultivo de la alfalfa (*Medicago sativa*), no se toman en cuenta las variedades que existe, ya que entre las cuatro variedades que existe en la región, la diferencia en rendimiento de producción no es significativa (Meneses, 2003). Como se vio anteriormente este cultivo representa el 90% de área cultivada bajo riego, en la localidad de Challapata provincia Avaroa.

Todos estos datos son utilizados por el programa de simulación de crecimiento del cultivo CropSyst.

El precio de la materia seca de alfalfa puesto en finca en la Provincia Avaroa es de Bs. 61 por quintal, siendo el quintal de 46 kilos, esto equivale a Bs. 1,33 el kilogramo de alfalfa, el precio en dólares sería de 0,16 aproximadamente.

- Siembra y costos de producción de la alfalfa en la Provincia Avaroa.- De acuerdo a entrevistas a los usuarios la siembra se realiza a mediados de año con tractos, al voleo, con una densidad de siembra de 13,5 a 17 kg. por hectárea. El segado se realiza con diferentes métodos, unos manualmente ya sea con hoz, pala, guadaña, y otros con máquina cortadora y tractor; según los usuarios, se prefiere el segado con hoz pues permite un corte más homogéneo y buen rebrote.

La preparación de terreno la mayoría de los usuarios la realizan con tracción mecánica; en cambio las siembras temporales la efectúan con tracción animal tomando en cuenta que son terrenos con menor pendiente (0 a 3%). La aplicación de fertilizantes orgánicos (guano bovino, ovino y de camélidos) se efectúa manualmente y existe poca costumbre de aplicar pesticidas (Barrientos, 2001).

Las Tablas 6 y 7 resumen los costos de establecimiento y explotación de alfalfa en la región.

Tabla 6: Costo de establecimiento de una hectárea de alfalfa.

Detalle	Unidad	Cantidad	Precio unitario Bs.	Precio total Bs.
Roturado en seco	Hrs. Tractor	4	50	200
Semilla	Kilogramos	15	30	450
Inoculante	Bolsas	2	18	36
Siembra	Hrs. tractor	1.5	50	75
Riego (1 riego)	Jornales	1	30	30
Agua (fijo)	Horas	24	11	11
Total				802

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Costo de producción de una hectárea de alfalfa por año.

Detalle	Unidad	Cantidad	Precio unitario Bs.	Precio total Bs.
Fertilizante	Bolsas	3	120	360
Riego (5 riegos/año)	jornales	5	30	150
Agua (5 riegos)(fijo)	-	5	11	11
Corte (3 hrs/corte)*2 cortes	hrs. tractor	6	50	300
Total				821

Fuente: elaboración propia

Costo de establecimiento + Costo de producción = 1.623 Bs. Costo total de producción de una hectárea de alfalfa por año. En promedio con una producción de 6,1 tn/ha/año, el costo de producción de un kilogramo de alfalfa asciende aproximadamente a Bs. 0,27 (US\$. 0,033).

5.2.- Procedimiento.

Los periodos y las etapas de decisión.- La estación de riego no es endógena y se asume que empieza en una fecha determinada, ésta estación de riego está dividida en 5 periodos que corresponde a intervalos de riego predeterminados. Aparecen 5 etapas en el proceso de decisión¹⁰. El problema del explotador agrícola es decidir si riega o no a cada etapa sabiendo que el calendario de riego está dado. Ahora, el número de contribuciones

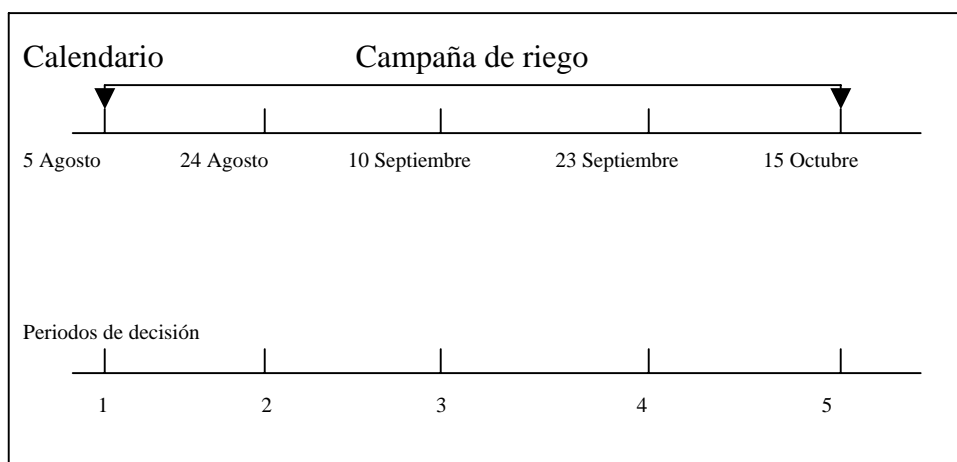
¹⁰ En la localidad de Challapata el riego se hace entre los meses de Agosto, Septiembre y Octubre, de acuerdo a la disponibilidad de agua en el embalse se programa anualmente entre 1 a 3 largadas, esto debido a las restricciones del recurso, anteriormente se realizaban hasta 5 riegos en fechas preestablecidas. La cantidad de riego que se aplica es uniforme y depende de las cuotas que tiene cada agricultor.

durante la campaña es de 3, debido al número de usuarios que se ha incrementado.

La cantidad de agua es determinada como una repartición uniforme de la cantidad total, con el supuesto que a los usuarios del principio del canal y a los del final les llega la misma cantidad del recurso (tipo de riego tradicional, superficial).

La campaña de riego se desea saber a corto plazo cuando los cultivos ya fueron colocados, las decisiones del agricultor se reducen a la elección de la conducta de riego del cultivo. La única variable es la cantidad de agua aportada y las demás variables que se suponen fijas.

Los periodos y etapas del proceso de decisión durante la campaña están representados según el siguiente diagrama¹¹:



5.3.- Simulaciones.

Este modelo se resuelve mediante el modelo agronómico CropSyst, un modelo económico para obtener unos beneficios máximos asociados a cantidades de agua disponible.

Para simplificar la presentación del trabajo numérico, se va a considerar el caso de conocer las condiciones del clima y las cantidades determinadas de agua. El modelo

¹¹ De acuerdo a las experiencias de los agricultores.

agronómico CropSyst es usado para generar información relativa a las variables de estado y para determinar el rendimiento del cultivo para varios programas de riego¹² (Ver anexo 2).

Dados los precios de insumos y productos, el modelo económico usa las predicciones del rendimiento del modelo de simulación y luego evalúa los beneficios para cada secuencia de decisión, para obtener un beneficio máximo π^* ,

Este procedimiento se repite para diferentes cantidades de agua, con esto se obtiene una base de datos en la cuál se va a basar la estimación.

Un proceso de mucha importancia es la calibración del modelo agronómico, esto se hace de acuerdo al clima, temperatura y características del suelo de la zona de estudio. Un importante asunto para la calibración es que se toma los datos reales de producción de alfalfa de un experimento realizado en el Centro Agropecuario Condoriri, en el altiplano Boliviano (Meneses, 2003) con cuatro tipos de cultivos, con y sin riego, esto sirvió para que el programa agronómico sea adecuado a la zona de estudio. En la Tabla 8 se muestra el rendimiento de uno de los cultivos de la Alfalfa con el cuál se realizó la calibración.

Tabla 8: Rendimiento del cultivo de Alfalfa (Africana)

Datos estadísticos				
Cultivar africana				
Años	1	2	3	4
1996 Nov.	3.578	3.809	1.299	2.040
1997 May.	3.315	3.511	1.008	666
1997 Nov.	5.974	5.762	4.350	4.774
1998 May.	3.776	4.944	2.956	3.960
1998 Nov.	9.160	11.346	4.541	3.832
1999 May.	5.588	5.741	4.220	3.515
1999 Nov.	5.220	5.395	0	0
1.- Rendimiento prod. Kg/ha con riego sin fertilización				
2.- Rendimiento prod. Kg/ha con riego y fertilización 20 Kg P/ha.				
3.- Rendimiento prod. Kg/ha sin riego sin fertilización				
4.- Rendimiento prod. Kg/ha sin riego con fertilización 20Kg P/ha				

Fuente: Ing. Ruddy Meneses. 2003

Cabe señalar que en el experimento se utilizo fertilización fosforada, pero en cuánto a este factor no hubo diferencias significativas. El único factor que presentó diferencias significativas fue el riego, la diferencia promedio es superior al 65% (Meneses, 2003).

¹² Cada rendimiento máximo del cultivo tiene un programa de riego, que consta de 10 decisiones de riego establecidas en las fechas predeterminadas, con esto se obtuvo los máximos beneficios para los diferentes programas de riego.

6.- RESULTADOS.

Una vez adecuado y calibrado el programa agronómico, se realizaron las simulaciones con diferentes cantidades de agua para obtener rendimiento del cultivo con base en la cantidad de agua disponible; con estos rendimientos y asociando precio del producto y todos los costos de explotación del cultivo, se obtienen beneficios máximos asociados a programas de riego secuenciales. Se realizó la estimación de la demanda por agua con base en los beneficios máximos obtenidos del proceso de simulación, teniendo la cantidad de agua disponible para riego que varía de 0 a 6.390 m³ donde alcanza el máximo valor y los beneficios son los mismos para mayores cantidades de agua (Bontemps y Couture, 1999). Esta generación de datos se corrió en base a las precipitaciones y temperaturas existentes en la zona para 20 años (1981-2000). En la Tabla 9 se muestra la relación de cantidad de agua con beneficios máximos.

Tabla 9: Beneficios máximos

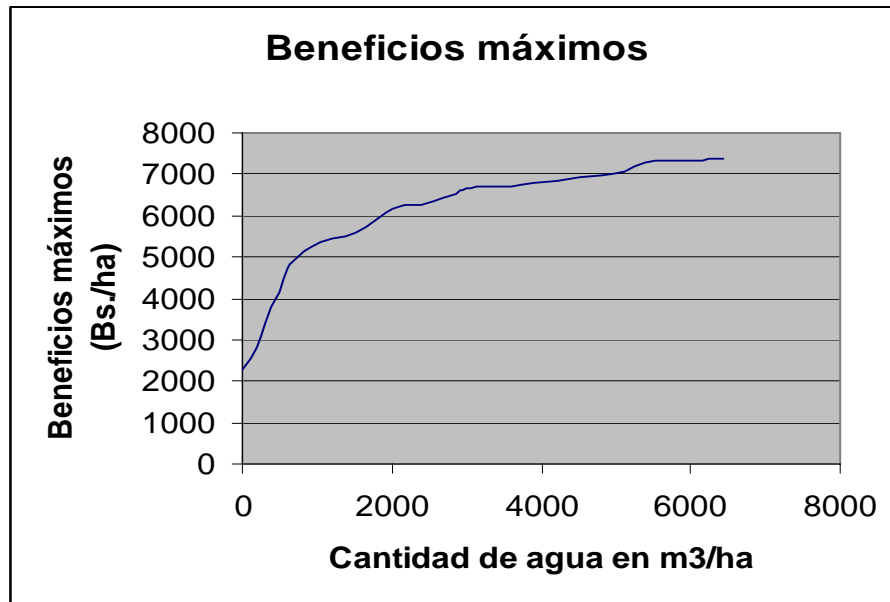
Cantidad de agua m ³ /ha	Producción (kg/ha)	Beneficio máximo (Bs/ha)
0	2.164	2.294
200	2.659	2.819
300	3.193	3.385
500	3.915	4.150
600	4.458	4.725
750	4.708	4.990
900	4.929	5.225
1.200	5.124	5.431
1.500	5.264	5.580
1.800	5.566	5.901
2.100	5.845	6.196
2.400	5.910	6.265
2.700	6.066	6.430
2.850	6.151	6.520
3.000	6.293	6.671
3.300	6.311	6.690
3.600	6.343	6.724
3.900	6.404	6.788
4.200	6.455	6.842
4.500	6.540	6.932
4.800	6.591	6.986
5.100	6.651	7.050
5.400	6.861	7.273
5.700	6.901	7.315
6.000	6.903	7.317

6.150	6.920	7.335
6.300	6.940	7.356
6.390	6.947	7.364
6.425	6.947	7.364

Fuente: Elaboración Propia

En el Gráfico 1 se muestra la tendencia de estos beneficios hasta alcanzar un máximo valor.

Gráfico 1. Tendencia de los beneficios máximos



Fuente: Elaboración propia. Cuadro anterior

La tendencia que tiene esta función es debida a la relación agua rendimiento (Hexem y Heady, 1978), donde el rendimiento del cultivo se incrementa a medida que se incrementa la cantidad de agua bajo algún valor máximo, los beneficios alcanzan ese valor máximo y se estabilizan siendo los mismos hacia delante (Bontemps y Couture, 1999). El máximo beneficio alcanza aproximadamente a Bs. 7.364 con una cantidad disponible de agua aproximada de 6.390 m³.

6.1.- Función de beneficios.

Teniendo una vez los datos, lo que se quiere es ajustarlos a una determinada función para luego derivar la función de demanda. Se examinan varias especificaciones para poder obtener la función que más se adecue a los datos disponibles, se estimó paramétricamente por regresión no lineal (Moore, 1994 o Hassine y Thomas, 1997) con base en la tendencia

que muestran los datos (Ver Anexo 3 para las salidas de la estimación). En la Tabla 10 se presenta algunas de ellas

Tabla 10: Resultados de las funciones de regresión no lineal

Especificaciones	Parámetros	Coefficientes
1) $\pi = \alpha_1 + b_1Q + b_2Q^{1/2} + u$	$\hat{\alpha}_1$	1898,18 (0.000)
	\hat{b}_1	-0.678983 (0.000)
	\hat{b}_2	122,1935 (0.000)
	R^2	0,9793
2) $\pi = \alpha_2 + b_3Q + b_4Q^{1/2} + b_5Q^{1/3} + u$	$\hat{\alpha}_2$	1962,218 (0.000)
	\hat{b}_3	0,421051 (0.057)
	\hat{b}_4	- 0,000058 (0.0107)
	\hat{b}_5	267,9716 (0.000)
	R^2	0,9612
3) $\ln \pi = \ln \alpha_3 + b_6 \ln Q + u$	$\hat{\alpha}_3$	929,3515 (0.000)
	\hat{b}_6	0.241343 (0.000)
	R^2	0.9491

Fuente: Elaboración Propia

donde:

π son los beneficios máximos obtenidos del proceso de simulación

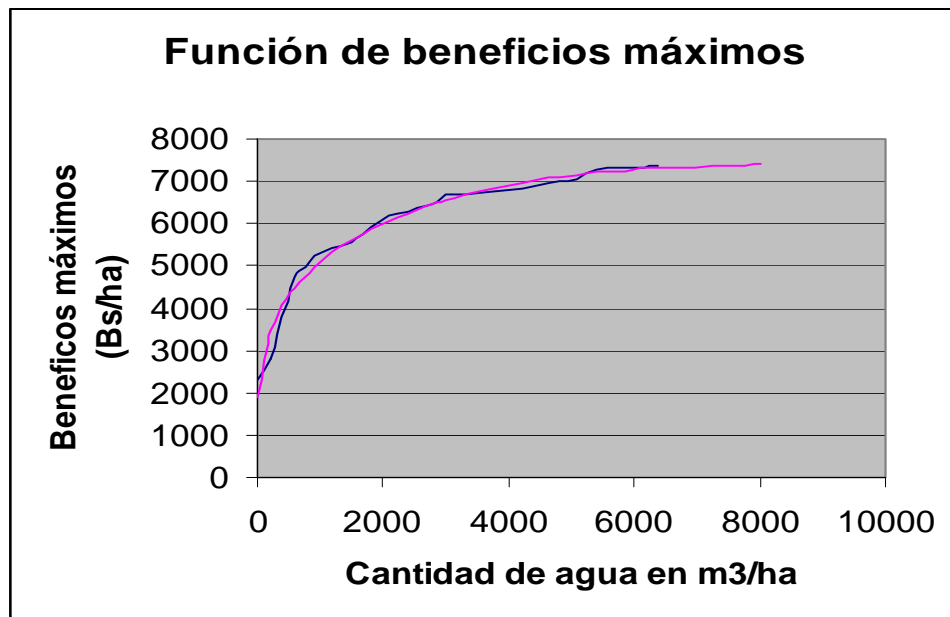
Q es la cantidad de agua disponible

La curva que más se adecua de acuerdo al nivel de significancia de las variables (P-valor en paréntesis) y al coeficiente de determinación es la primera (función de raíz cuadrada), con lo cuál la función queda especificada de la siguiente forma:

$$\hat{\pi} = 1.898,18 - 0,678983Q + 122,1935Q^{1/2}$$

En el Gráfico 2 se muestra el ajuste de esta curva a los beneficios máximos

Gráfico 2. Ajuste de los beneficios máximos



Fuente: Elaboración propia

6.2.- Función de demanda por agua de riego

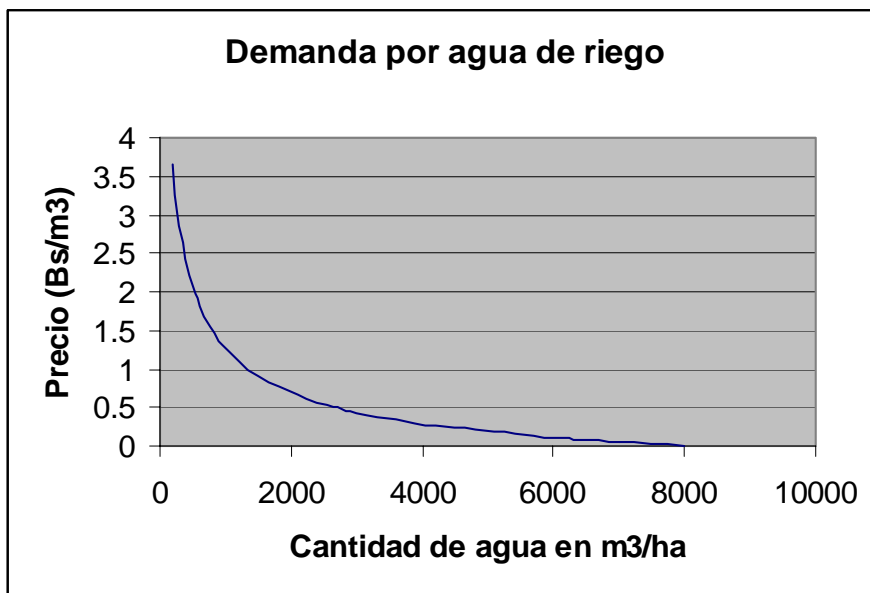
La estimación de la función de demanda es directamente derivada de la estimación de la función de beneficios, por consiguiente derivando la anterior función respecto a Q tenemos la inversa de la función derivada de demanda de agua para riego, denotada por $p(Q)$ donde p es el precio del agua para riego

$$p(Q) = -0,678983 + 61,09675Q^{-1/2}$$

Esta función de demanda estimada es decreciente y no lineal.

En el Gráfico 3 se presenta la relación descrita anteriormente

Figura 3. Función de demanda por agua de riego



Fuente: Elaboración propia

Los puntos localizados cerca de ambos ejes son de mucho interés, por ejemplo un precio arriba de $3,70 \text{ Bs/m}^3$ aproximadamente va a reducir la demanda de agua a pequeñas cantidades, mientras que para una cantidad total de agua cerca de $7.850 \text{ m}^3/\text{ha}$ aproximadamente ya no es de interés para el agricultor.

También se puede ver con base en el gráfico que para cantidades pequeñas de agua disponible, la demanda por agua de riego parece ser bastante inelástica, donde el agricultor considera el agua como un insumo esencial, consecuentemente el va a reducir su consumo con cambios significativos en el precio del agua. La elasticidad precio de la demanda está por encima de menos uno (alrededor de $-0,88$), esto ocurre con cantidades de agua menores a $1.200 \text{ m}^3/\text{ha}$ con un precio aproximado de $1,08 \text{ Bs/m}^3$. Si uno incrementa la cantidad total de agua disponible, la forma de la curva cambia y la demanda parece ser más elástica, la elasticidad precio de la demanda está por debajo de menos uno (alrededor de $-1,2$) esto ocurre para cantidades de agua mayores a $1.500 \text{ m}^3/\text{ha}$ a un precio de $0,89 \text{ Bs/m}^3$. A grandes cantidades de agua el agricultor es más sensible a cambios en el precio, el cultivo ha alcanzado un nivel satisfactorio de crecimiento, donde el agua ya no es más un insumo esencial.

El precio calculado del agua para la Provincia Avaroa con un rendimiento del cultivo de la alfalfa en promedio de 6,1 tn/ha está dentro de un rango de precios de 0,43 y 0,49 Bs/m³, para un consumo de agua entre 2.700 m³/ha y 3.000 m³/ha.

Si se considera que el pago por el uso del agua es fijo en la Provincia Avaroa que es de Bs. 11 por hectárea/año, se está pagando el metro cúbico de agua (con un rendimiento promedio de 6,1 tn/ha/año) entre 0,0037 y 0,0041 Bolivianos. Esto demuestra que el precio pagado por el agua en la Provincia Avaroa es muy inferior al que se debería cobrar, ya que el agricultor está en la capacidad de pagar más por el recurso.

El precio del agua calculado en dólares está para ese nivel de producción entre US\$ 0,053 y US\$ 0,06 el metro cúbico. Si comparamos este precio calculado con el precio de US\$ 0,05 cobrado en el proyecto San Jacinto (Cochabamba-Bolivia), se puede apreciar que los precios del agua calculados no difieren mucho del precio cobrado en este proyecto.

Además señalar que comparado con el precio estimado de un metro cúbico de agua realizado por Garcés (2004) en México que está en el rango de US\$ 0,004 y US\$ 0,21 por metro cúbico, se verifica que el precio calculado en el presente trabajo está dentro de esa banda de precios por metro cúbico.

6.3.- Análisis Económico.

Los resultados previos son una importante información para el regulador con el cuál puede analizar los efectos de una política basada en precios. El impacto de un incremento del precio del agua va a depender del rango del precio inicial y final. Por ejemplo si nosotros analizamos un incremento del precio arriba de 1,08 Bs/m³ aproximadamente, donde las cantidades de agua consumidas son pequeñas, el efecto de este cambio en precios no va a disminuir la cantidad de agua consumida en gran medida ya que la demanda es inelástica, mientras que por el contrario un incremento del precio en la parte elástica de la función de demanda, el efecto de cambio en precios va a tener un impacto mayor en la cantidad de agua reducida.

Si uno se encuentra en la parte elástica de la función de demanda e incrementamos el precio del agua en aproximadamente 0,10 Bs/m³ con un precio inicial de 0,65 Bs/m³ la cantidad de agua reducida alcanzaría aproximadamente a 300 m³/ha, esto haría disminuir

los beneficios del agricultor en aproximadamente 4,8%. Mientras tanto en la parte inelástica de la función de demanda este mismo incremento del precio con un precio inicial de 1,36 Bs/m³, la cantidad de agua reducida sería menos de 120 m³/ha, reduciendo el beneficio del agricultor también en 4,8%. Cabe señalar que la disminución de los beneficios del agricultor en ambos casos es la misma, pero la cantidad de agua reducida es muy distinta y es más significativa cuando la demanda es elástica.

La cantidad de agua que hace máxima la función de beneficios es 8.096.89 m³/ha con lo cuál se alcanza un beneficio de 7.395,84 Bs/ha, hasta ese punto la función tiene una tendencia creciente a partir de este punto la función de beneficios empieza a disminuir.

Un incremento del precio real del agua va a tener siempre un impacto sobre el consumo del agua. Esto va a depender de la localización del nuevo precio sobre la función de demanda por agua. Estos resultados necesitan ser integrados cuando se van a definir políticas con base en el precio del agua. El regulador tiene que determinar un rango de precios del agua dependiendo donde se encuentre el precio inicial. Se va implementar un precio real del agua, y negociar la cantidad de agua disponible sobre toda la estación cuando el agricultor empiece la estación de riego.

7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El agua es un elemento esencial en el desarrollo del sector agrícola en la Provincia Avaroa, debido principalmente a la escasez del recurso en la zona del altiplano por las bajas precipitaciones que se presentan en la zona. La principal fuente de ingresos para las 1.138 familias se basa en la producción de forrajes, la cuál permite la alimentación del ganado bovino y ovino, cabe hacer notar que toda esta producción se realiza bajo riego ya que éste mejora los índices productivos del cultivo de la Alfalfa, que es el principal cultivo realizado en la provincia Avaroa con cerca del 90% del total de terreno cultivado.

El problema existente es que los usuarios del sistema de riego no se sienten en la capacidad de hacerse cargo de la administración de la Represa de Tacagua, argumentando que no están en la capacidad de cubrir todos los costos de administración, además debido a la falta de normatividad y reglamentación con respecto al agua, la regulación en materia tarifaria es muy débil permitiendo que el recurso se ofrezca de manera casi gratuita o con

un costo fijo por hectárea al año. Sumado a esto se aprecian otros problemas con respecto al agua como, asignación ineficiente, financiamiento insuficiente para obras de ampliación del sistema de riego, impactos ambientales, derroche, sobreexplotación y agotamiento.

Debido a esto se estimó la función de demanda por agua de riego, para que a partir de ella se encuentre el verdadero valor del recurso. Esto se realizó sobre la disponibilidad a pagar por una unidad adicional de agua por parte del agricultor. La función de demanda por agua es obtenida a través de un programa de decisión secuencial, ésta se realiza con la obtención de beneficios máximos para cada decisión que hace el agricultor. Por lo tanto tenemos programas de riego óptimos para diferentes cantidades de agua disponible. Cada programa de riego contiene 10 diferentes formas de regar el cultivo en las fechas determinadas, donde solo una de ellas es escogida, aquella que hace máximo el beneficio con determinada cantidad de agua. Este procedimiento es basado en la generación de datos por un método numérico, integrando un programa de rendimiento del cultivo de la alfalfa unido a un modelo económico, y una estimación paramétrica de la función de demanda.

La demanda de agua estimada tiene una forma decreciente y no lineal, es menos sensible a cambios en el precio para pequeñas cantidades de agua, a medida que la cantidad de agua se incrementa el cambio en los precios hace que la cantidad de agua sea más sensible. Se puede señalar que este cambio de demanda inelástica a elástica ocurre alrededor de Bs. 0,89 el metro cúbico con una cantidad de agua de 1.500 m³/ha aproximadamente. Políticas de agua tienen que incluir esta información para definir programas de precios tomando en cuenta la cantidad de agua disponible.

El valor económico del agua para riego en la Provincia Avaroa- Represa de Tacagua oscila entre Bs. 0,43 y Bs. 0,49 el metro cúbico, superando en general el precio cobrado en la zona que es un monto fijo de Bs. 11 ha/año, si se toma como promedio de producción de la alfalfa de 6,1 tn/ha para lo cual se necesita entre 2.700 a 3.000 m³/ha, el precio que el agricultor paga en estos momentos está en el rango de Bs. 0,0037 y Bs. 0,0041 el metro cúbico el cual está muy por debajo del verdadero valor del agua que debería pagar, por lo cual se demuestra que este precio cobrado al agricultor debe ser incrementado, ya que ellos están en la capacidad de pagar más por el recurso.

Una política para ser implementada tomando en cuenta estos resultados parciales, es la aplicación del cobro por el agua por metro cúbico, teniendo en cuenta la capacidad de pago por parte del agricultor, ya que éste está en la capacidad de pagar más por el agua. En el escenario actual cuando se espera que la producción alcance un rendimiento de 6,1 tn/ha aproximadamente (producción promedio en la región), con un consumo de agua de 2.850 metros cúbicos de manera óptima, el agricultor estaría en la posibilidad de pagar un precio de Bs. 0,47 el metro cúbico. Este pago por el agua incrementaría los costos de producción del agricultor a Bs. 0,74 por hectárea, reduciendo los beneficios de éste en aproximadamente 44 por ciento de Bs. 6.466 a Bs. 3.599 por hectárea, con estos resultados se puede ver que la medida económica de incremento del precio del agua hace que todavía el agricultor obtenga beneficios muy significativos, teniendo un margen aceptable de ganancia (Bs. 2.867 por hectárea), de esta manera se lograría que el agricultor pague por el agua a su verdadero valor económico, este precio implementado haría reducir el consumo de agua a 2.850 m³/ha que es el óptimo para producir 6,1 tn/ha.

También en base al anterior análisis y si la represa está en la capacidad de almacenar mucha más agua por hectárea, una posible política sería fijar cuotas de uso de agua que no sobrepasen el límite de 2.850 m³/ha, ya que se demostró que con esa cantidad de agua se puede obtener un rendimiento del cultivo de 6,1 tn/ha, con el restante se puede beneficiar a otros usuarios, o se puede pensar en la ampliación del sistema de riego.

La inconveniencia de esta política es que implica costos en la compra de medidores de volúmenes de agua, así como costos de monitoreo, además se requiere una fuerte inversión para que los canales de distribución de agua sean mejorados (por que por el momento son de tierra) para que la eficiencia de riego pueda alcanzar índices más altos.

También se puede señalar que viendo la capacidad de pago de los agricultores con relación al recurso agua, incrementando el precio y cobrando por metro cúbico de agua, los proyectos de inversión en el sector riego serían atractivos tanto para la empresa privada como para el propio Gobierno, sin ir lejos incrementando el precio del agua, haría que la administración de la represa se autofinancie y está pasaría definitivamente a manos de los agricultores, dejando de ser una carga más para la sociedad en su conjunto. Este último punto está enmarcado en la Ley No. 2878 de enero de 2005 (Ley de Promoción y Apoyo al

Sector Riego), donde en su artículo 19 textualmente señala: “La administración y el manejo de la infraestructura de los sistemas de riego, mejorados o nuevos, construidos o por construirse con recursos públicos serán transferidos a las diferentes organizaciones de usuarios a través del Sistema Nacional de Riego (SINARI).

Mientras el aporte de un metro cúbico de agua en el valor de la producción supere el costo de usarla, el sector riego continuará usando grandes cantidades de agua sin considerar la posibilidad de alcanzar un uso más racional del recurso.

El cobro por el agua por un monto fijo como se da hasta el momento hace que el agricultor riegue más allá del requerimiento de la planta, conduciendo este comportamiento a una contaminación del suelo por el agua, ya que este mal uso del agua de riego provoca la salinización y la sodificación del suelo. En el primer caso se produce una acumulación de sales que interfieren en el crecimiento del cultivo, en el segundo se produce una acumulación de sodio, que afecta negativamente a las propiedades físicas del suelo, por lo que el medio será menos apto para el crecimiento de los cultivos.

Una de las limitaciones del trabajo es que no se tomo en cuenta el agua subterránea, puede que este tipo de abastecimiento de agua haga variar la cantidad de agua por hectárea.

Otra de las limitaciones es que el cálculo de los beneficios del agricultor se hizo suponiendo que toda la producción de alfalfa era vendida en el mercado a un precio establecido, cosa que no es del todo cierta, ya que la Provincia Avaroa como zona de actividad lechera, utiliza este cultivo en la alimentación del ganado, generando beneficios diferentes y tal vez mucho más altos que vendiéndolo directamente.

Y por último dentro las limitaciones tenemos que el programa CropSyst utilizado en el presente trabajo no considera rendimientos negativos, una vez que alcanza la máxima producción, los beneficios permanecen constantes en ese nivel para cantidades mayores de agua (Bontemps y Couture, 1999).

El método ha sido usado para estimar funciones de demanda por agua de riego para determinado cultivo. Sin embargo el método puede ser adaptado a otra clase de cultivos o cuando existe rotación entre cultivos, tomándose en cuenta las características propias de cada cultivo y de la región en estudio.

Se recomienda hacer un análisis exhaustivo de beneficios derivados de la producción de leche y de carne en la zona, para que la disponibilidad a pagar por el agua sea calculada de manera más exacta.

Además se recomienda hacer un análisis costo-beneficio de la implementación de todo el equipo y material para que el agua sea cobrada por metro cúbico y así poder constatar que la inversión en sistemas de riego es o no factible. Este trabajo presenta algunos resultados parciales y una primera aproximación a pagar un precio real del agua en la Provincia Avaroa.

7. - REFERENCIAS

Barrientos, E. 2001. Manejo de Praderas y Producción de Forrajes. Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias - Universidad Técnica de Oruro (FCAP-UTO). Oruro-Bolivia. p 108-120.

Bontemps, C. y Couture S., 1999. "Utilization d'un modèle agro-économique pour la gestion de l'irrigation dans un contexte de rareté. Working Paper. INRA-Toulouse-Francia.

Bontemps, C. y Couture, S. 2002. "Irrigation water demand for the decision maker". *Environmental and Development Economics* 7: 643-657.

Bontemps, C., Couture, S. y Favard, P. 2001. "Is the Irrigation Water Demand Really Convex?". Working Paper. Mimeo LEERNA-INRA. Francia.

Briscoe, J. 1996. "El agua como bien económico": su verdadera significancia en la práctica. Estudio del Banco Mundial. Septiembre de 1996.

Caswell, M. y Zilberman, D. 1986. "The Effects of Well Depth and Land Quality on the Choice of Irrigation Technology". *American Journal of Agricultural Economics* 68 (4): 798-881.

Coman, K. 1911, "Some unsettled problems of irrigation", *American Economic Review*, 1 : 1-19

Consultora "H. y S." 2003. Documento de Trabajo. Oruro-Bolivia.

Cruz, V., Valdivia, R. y Scott, C. 2002. Productividad del Agua en el Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma. México". *Agrociencia* 36: 483-493.

Dinar, A. 2000. "The Political Economy of Water Pricing Reforms". Washington D.C. Oxford University Press. 405 p.

- Donatelly, J., Stöckle, C. y Nelson, R.. 1998. CropSyst: Modelo de simulación de crecimiento y del rendimiento de una serie de cultivos. Universidad del Estado de Washington, Pullman, USA.
- Faux, J. y Perry, G. 1999. “Estimating Irrigation Water Value Using Hedonic Price Analisis: A Case Study in Malheur Conty, Oregon”. *Land Economics* 75 (3): 440-452.
- Flinn, J., y Musgrave, W. 1967. “Development and analysis of input-output relations for irrigation water”. *The Australian Journal of Agricultural Economics*, 11 (1):1-19
- Garcés, O. 2004. “El valor económico del agua para riego en México”. Trabajo de Grado para optar al título de Magíster en Economía y Magíster en Economía del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad de Los Andes.
- García, E. 2003. Consultoría Proyecto Incremento de la capacidad de embalse de la Represa de Tacagua. Oruro-Bolivia
- Gibbons, D. 1986. “The Economic Value of Water”. *Resources for the Future*. Washington, D.C.
- Hassine, N. y Thomas, A. 1997. “Agricultural production, attitude towards risk, and the demand for irrigation water: the case of Tunisia”. Mimeo, Université de Toulouse.
- Hexem, R. y Heady, A. 1978. *Water Production Functions for Irrigated Agriculture*, Ames Iowa: The Iowa State University Press.
- Jara, J. y Stöckle, C. 1999. “Simulation of Water Uptake in Maize, Using Different Levels of Process Detail”. Publicado en *Agronomy J.* 91: 256-265.
- Le Moigne, G., Ashok, S., Mei, X., y Sandra, G. 1994. *A Guide to the Formulation of Water Resources Strategy*. The World Bank. Washington, D. C.
- Lui, S. 2002. “Water pricing towards sustainability of water resources: a case study in Beijing”. *Journal of Environmental Sciences*. Vol. 14. No. 4: 518-523.
- Llamas, R. 1999. “Eficiencia y Uso Sostenible del Agua en México: Participación del Sector Privado”. Centro de Estudios del Sector Privado para el Desarrollo Sustentable. Cuadernos de Trabajo. Agosto
- Mattos, R. y Crespo, A. 2000. *Informe Nacional Sobre la Gestión del Agua en Bolivia*. La Paz-Bolivia.

Meneses, R. 2003. Potencial Para la Producción de Alfalfa en el Altiplano Central y Norte de Bolivia. Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias- Universidad Mayor de San Simón (FCAP-UMSS). Cochabamba-Bolivia. p 95-108

Mercado, J. 2004. Estimación de la Demanda de Agua para Consumo Humano en Extrema Pobreza. Trabajo de Grado para optar al título de Magíster en Economía y Magíster en Economía del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad de Los Andes.

Moore, M. 1999. "Estimating Irrigators' Ability to Pay for Reclamation Water". Land Economics Ed. 75 (Nov). 562-568.

Moore, M., Gollehon, N., Carrey, M. 1994. "Multicrop production decisions in Western irrigated agriculture: the role of water price". American Journal of Agricultural Economics: 359-374.

Morales, R., Galoppo, E., Jemio, L., Choque, M. y Morales N. 2000. Bolivia: Geografía y Desarrollo Económico. Research Network working paper. Banco Interamericano de Desarrollo. R-387.

Ogg, C. y Gollehon, N. 1989. "Western Irrigation Response to Pumping Costs: A Water Demand Analysis Using Climatic Regions". Water Resources Research. 25 (5): 767-773.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Ganadería (ONU) 2003. Informe de Gestión.

Palacios, E. 1976. "Strategies to improve water management in Mexican irrigation districts: a case study in Sonora". Ph. D. dissertation. The University of Arizona. Tucson, Arizona. 196 p.

Programa Nacional de Riego y Drenaje (PRONARYD), 2002. Informe de Gestión. Secretaria Nacional de Agricultura y Ganadería. Bolivia.

Robinson, J. y Eatwell, J. 1992. "Introducción a la Economía Moderna". Fondo de Cultura Económica. México. Pág. 52-56

Schoengold, K. 2003. "An Estimation of Agricultural Water Demand: How Do Water Demand and Land Allocation Respond To Water Price Changes?". Working Paper. University of California, Berkeley.

SENAMHI. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia. Anuarios Estadísticos 1979-2002.

Young, R. 1996. "Measuring Economic Benefits for Water Investment and Policies". The World Bank. Washington, D. C.

Anexo 1

A.- Las condiciones necesarias de optimalidad

A. 1 Hamiltoniano

El Hamiltoniano, H_t , del problema (5) se escribe:

$$H_t = -(c \cdot q_t + \delta_t C_{FT}) + \lambda_{t+1} \cdot f_t(M_t, V_t) + p_{t+1} \cdot g_t(M_t, V_t, q_t) - \alpha_{t+1} \cdot q_t \quad (\text{A.1})$$

El Hamiltoniano es la contribución total al objetivo final debido al paso del período t al período $t + 1$, si se aplica el control q_t y si tiene el estado del sistema (M_t, V_t, Q_t) .

Comprende 4 términos: el primero representa la contribución directa al objetivo final, los tres otros describen las variaciones de las variables de estado y pueden ser considerados como las contribuciones indirectas.

A cada período de decisión, t , hay que tener en cuenta la restricción técnica $\underline{q} \leq q_t \leq \bar{q}$ que debe respetar la dosis aportada. Denotemos \underline{v}_t y \bar{v}_t los multiplicadores asociados con esta restricción.

El lagrangiano L_t , para el período t , se escribe entonces:

$$L_t = H_t + \underline{v}_t \cdot (q_t - \underline{q}) + \bar{v}_t (\bar{q} - q_t) \quad (\text{A.2})$$

A.2.- Las condiciones necesarias

Las condiciones necesarias de optimalidad obtenidas por la teoría del control son descompuestas en tres categorías: el principio del máximo discreto, el sistema de las ecuaciones adjuntas y las condiciones de transversalidad, que deben ser resueltas simultáneamente afín de obtener el programa óptimo de decisiones de riego.

• El principio del máximo discreto

A cada período de decisión, $t = 1, \dots, T - 1$, la variable de control, q_t , debe maximizar el Hamiltoniano, H_t , bajo la restricción $\underline{q} \leq q_t \leq \bar{q}$. Una condición necesaria de optimalidad es que q_t maximiza a L_t a cada etapa t , para $t = 1, \dots, T - 1$:

$$\frac{\partial L_t}{\partial q_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad -c + p_{t+1} - \alpha_{t+1} + (\underline{v}_t - \bar{v}_t) = 0 \quad (\text{A.3})$$

Que se puede reescribir:

$$p_{t+1} = \begin{cases} < c + \alpha_{t+1} & \text{si } q_t = 0 \\ = c + \alpha_{t+1} & \text{si } q_t \in \left[\underline{q}, \bar{q} \right] \\ > c + \alpha_{t+1} & \text{si } q_t = \bar{q} \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

• **El sistema de las ecuaciones adjuntas:**

El sistema de las ecuaciones adjuntas define la dinámica de los valores in situ es decir dinámica de las variables adjuntas asociadas con las variables de estado:

$$(\lambda_{t+1}, p_{t+1}, \alpha_{t+1})$$

La dinámica de los valores in situ de la biomasa esta definido del modo siguiente:

$$\forall_t = 1, \dots, T-1,$$

$$\lambda_{t+1} - \lambda_t = -\frac{\partial H_t}{\partial M_t} = -\lambda_{t+1} \cdot \frac{\partial f_t(M_t, V_t)}{\partial M_t} - p_{t+1} \cdot \frac{\partial g_t(M_t, V_t, q_t)}{\partial M_t} \quad (\text{A.5})$$

Los valores in situ del agua en la tierra evolucionan según la dinámica siguiente:

$$\forall_t = 1, \dots, T-1,$$

$$p_{t+1} - p_t = -\frac{\partial H_t}{\partial V_t} = -\lambda_{t+1} \cdot \frac{\partial f_t(M_t, V_t)}{\partial V_t} - p_{t+1} \cdot \frac{\partial g_t(M_t, V_t, q_t)}{\partial V_t} \quad (\text{A.6})$$

La dinámica de los valores in situ de la cuota es:

$$\forall_t = 1, \dots, T-1$$

$$\alpha_{t+1} - \alpha_t = 0 \quad \text{si } Q_t > 0 \quad (\text{A.7})$$

• **Las condiciones de transversalidad:**

Las condiciones de transversalidad permiten fijar la senda óptima de las decisiones. Ellas son definidas del modo siguiente:

$$\lambda_T = r \frac{dY}{dM} \Big|_{(M_t^*)} \quad (\text{A.8})$$

$$p_T = 0 \quad (\text{A.9})$$

Anexo 2

Programas de riego

Programa de riego para $Q = 3.000 \text{ m}^3/\text{ha}$

1	2	3	4	5	Producción	Beneficio
1.000	1.000	1.000			6.158	6.527
1.000	1.000		1.000		6.153	6.522
1.000	1.000			1.000	5.993	6.353
1.000		1.000	1.000		6.119	6.486
1.000		1.000		1.000	6.154	6.523
1.000			1.000	1.000	6.178	6.549
	1.000	1.000	1.000		6.118	6.485
	1.000	1.000		1.000	6.293	6.671
		1.000	1.000	1.000	6.155	6.524
	1.000		1.000	1.000	6.245	6.620

Programa de riego para $Q = 5.400 \text{ m}^3/\text{ha}$

1	2	3	4	5	Producción	Beneficio
1.900	1.900	1.900			6.846	7.257
1.900	1.900		1.900		6.816	7.225
1.900	1.900			1.900	6.845	7.256
1.900		1.900	1.900		6.665	7.065
1.900		1.900		1.900	6.746	7.151
1.900			1.900	1.900	6.720	7.123
	1.900	1.900	1.900		6.816	7.225
	1.900	1.900		1.900	6.901	7.315
		1.900	1.900	1.900	6.695	7.097
	1.900		1.900	1.900	6.890	7.304

Anexo 2

Salidas de las formas funcionales con el programa EViews

$$\hat{\pi} = 1898.18 - 0.678983Q + 122.1935Q^{1/2}$$

Dependent Variable: BENEFICIOS

Method: Least Squares

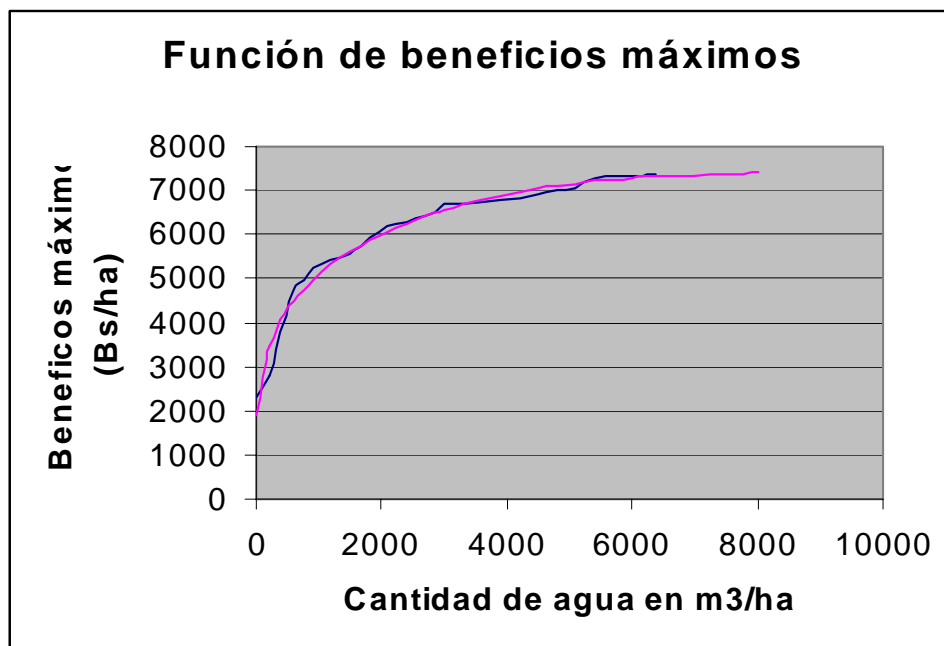
Date: 12/03/05 Time: 16:32

Sample: 1 28

Included observations: 28

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	1898.180	162.5085	11.68050	0.0000
Q	-0.678983	0.082904	-8.190020	0.0000
QR	122.1935	7.747339	15.77231	0.0000
R-squared	0.979341	Mean dependent var		6019.786
Adjusted R-squared	0.977688	S.D. dependent var		1423.515
S.E. of regression	212.6342	Akaike info criterion		13.65798
Sum squared resid	1130333.	Schwarz criterion		13.80072
Log likelihood	-188.2117	F-statistic		592.5502
Durbin-Watson stat	1.676620	Prob(F-statistic)		0.000000

Gráfica del ajuste de los beneficios con una función de raíz cuadrada



$$\hat{\pi} = 3279.672 + 1.585733Q - 0.000155Q^2$$

Dependent Variable: BENEFICIOS

Method: Least Squares

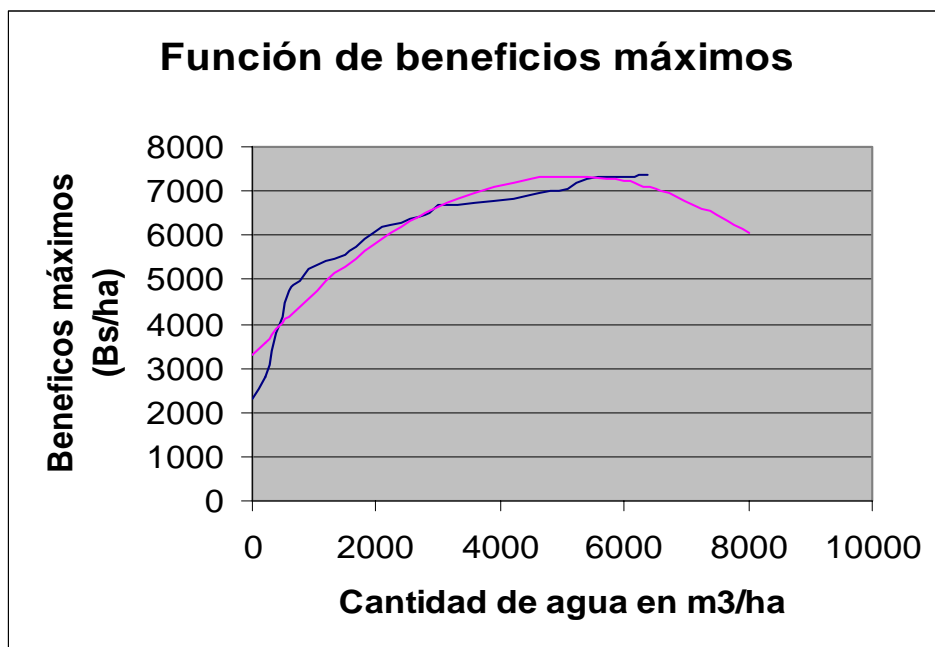
Date: 12/03/05 Time: 16:32

Sample: 1 28

Included observations: 28

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	3279.672	186.6408	17.57211	0.0000
Q	1.585733	0.143210	11.07281	0.0000
Q2	-0.000155	2.16E-05	-7.174606	0.0000
R-squared	0.926043	Mean dependent var	6019.786	
Adjusted R-squared	0.920127	S.D. dependent var	1423.515	
S.E. of regression	402.3122	Akaike info criterion	14.93329	
Sum squared resid	4046377.	Schwarz criterion	15.07603	
Log likelihood	-206.0661	F-statistic	156.5174	
Durbin-Watson stat	0.217522	Prob(F-statistic)	0.000000	

Grafica del ajuste de los beneficios con una función cuadrática



$$\hat{\pi} = 1962.218 + 0.421051Q - 0.000058Q^{1/2} + 267.9716Q^{1/3}$$

Dependent Variable: BENEFICIOS

Method: Least Squares

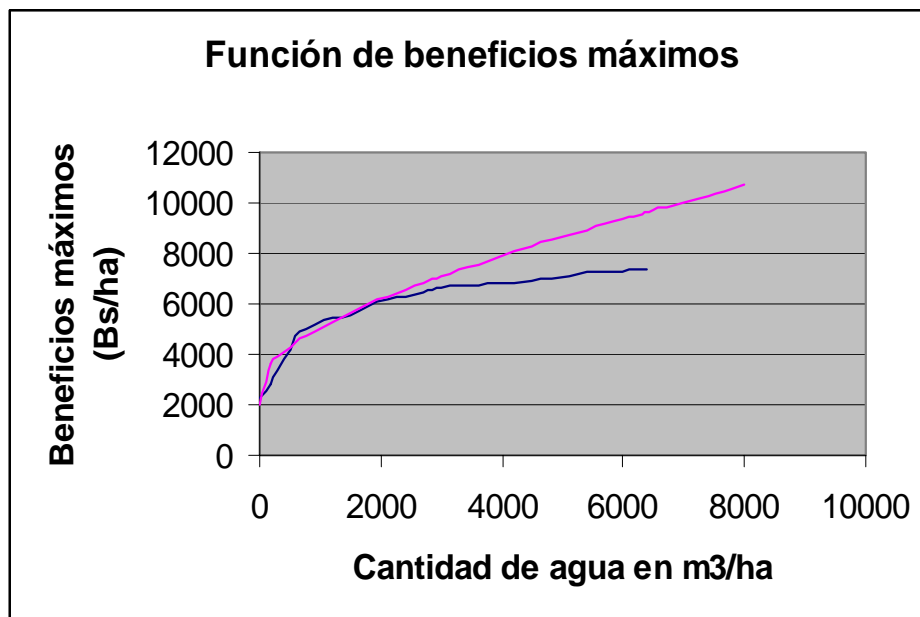
Date: 12/08/05 Time: 20:46

Sample: 1 28

Included observations: 28

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	1962.218	245.3748	7.996817	0.0000
Q	0.421051	0.210552	1.999750	0.0570
Q2	-5.81E-05	2.10E-05	-2.767631	0.0107
Q3	267.9716	43.66521	6.136959	0.0000
R-squared	0.971215	Mean dependent var	6019.786	
Adjusted R-squared	0.967617	S.D. dependent var	1423.515	
S.E. of regression	256.1672	Akaike info criterion	14.06110	
Sum squared resid	1574919.	Schwarz criterion	14.25142	
Log likelihood	-192.8554	F-statistic	269.9199	
Durbin-Watson stat	1.135590	Prob(F-statistic)	0.000000	

Gráfica del ajuste de los beneficios con una función de raíz cúbica



$$\ln \hat{\pi} = 6.834487 + 0.241343 \ln Q$$

Dependent Variable: LNB

Method: Least Squares

Date: 12/08/05 Time: 21:01

Sample(adjusted): 2 28

Included observations: 27 after adjusting endpoints

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	6.834487	0.087061	78.50209	0.0000
LNQ	0.241343	0.011174	21.59817	0.0000
R-squared	0.949133	Mean dependent var	8.700282	
Adjusted R-squared	0.947099	S.D. dependent var	0.244354	
S.E. of regression	0.056202	Akaike info criterion	-2.848541	
Sum squared resid	0.078967	Schwarz criterion	-2.752553	
Log likelihood	40.45530	F-statistic	466.4810	
Durbin-Watson stat	0.317497	Prob(F-statistic)	0.000000	

Gráfica del ajuste de los beneficios con una función Cobb-Douglas

