

VALORACION ECONOMICA DE LOS PROCESOS DE SALINIZACION
DE SUELOS EN EL CANTON DE UNUPATA
ESTUDIO DE CASO: UNUPATA CENTRO
(LA PAZ - BOLIVIA)

Por

Isidro Callízaya M.

Tesis para optar al grado de Magister Scientiae en
Gestión de Recursos Naturales Renovables y Medio Ambiente

CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO
E INVESTIGACION AMBIENTAL Y TERRITORIAL
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
Mérida, Venezuela
1997

AGRADECIMIENTOS

- Al Banco Interamericano de Desarrollo por su apoyo a la realización de esta Maestría
- Al Doctor Carlos Grassi por su orientación y apoyo durante todo mi trabajo
- A los asesores, Doctor Roberto López y prof. Francisco Rivas por su valiosa colaboración y orientación en la realización de la tesis.
- Al profesor Miguel Cabeza por su cooperación desinteresada.
- A mis amigos del CIDIAT, Felix Careño, Merino, Germán, Mercedes, Antonieta, Anita, y a la señora Palma.
- A mis amigos Jacky y Edgar Albornoz, Nelson Vacaflor y Angel Infante.

INDICE

AGRADECIMIENTO	iii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABLAS.....	xi
LISTA DE SIMBOLOS.....	xiii
RESUMEN.....	xv
 Capítulo	 pág
I INTRODUCCION	1
Objetivos.....	2
General.....	2
Específico.....	2
II REVISION BIBLIOGRAFICA	
Aspectos generales de los suelos y aguas salinos.....	3
Salinidad en suelos y aguas.....	3
Origen de las sales solubles.....	3
Procesos de salinización de los suelos.....	4
Causas del problema de suelos salinos a potencialmente salinos.....	4
Efecto de las sales sobre los cultivos.....	5
Efecto de las sales sobre los suelos.....	5
Clasificación de suelos y aguas desde el punto de vista de la salinidad	6
Clasificación de suelos	6
Clasificación del agua de riego.....	7
Estimación del rendimiento relativo de los cultivos según la concentración salina del suelo.....	7
Aspecto socioeconómicos en Unupata Centro y su relación con el proceso de salinización.....	8
Aspectos generales de la teoría económica acerca de los recursos naturales renovables.....	8
Métodos que utilizan valores reales de mercado	9
Técnica del Cambio de productividad.....	10
Consideraciones acerca del modelo de simulación utilizado en el trabajo.....	11
Limitaciones del modelo PROSAL.....	12
III ASPECTOS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO	13
Aspectos generales del área de estudio (Unupata Centro).....	13
Físico natural.....	13
Ubicación y extensión.....	13
Geología	13
Fisiografía.....	15

Temperatura.....	15
Evaporación.....	15
Humedad relativa.....	15
Velocidad del viento.....	15
Radiación.....	16
Insolación.....	16
Heladas.....	16
Nevadas.....	16
Clasificación climática.....	16
Balance hídrico.....	16
Vegetación natural.....	16
Fauna.....	17
Recursos hidrológicos.....	17
Hidrología superficial.....	17
Riego en el Cantón Unupata.....	17
Uso actual.....	17
Características de salinidad de los suelos del Cantón Unupata.....	18
Origen de las sales solubles en Unupata Centro.....	19
Efecto de las sales solubles sobre los suelos y cultivos en Unupata Centro.....	20
Clasificación por su salinidad de los suelos y aguas de Unupata Centro.....	20
Características físicas y químicas de los suelos en Unupata Centro.....	22
Características físicas de los suelos.....	22
Características químicas de los suelos.....	22
Características socioeconómicas de la zona de estudio.....	23
Problemática económica.....	23
Aspectos demográficos.....	24
Migración.....	24
Aspectos de la actividad técnico-económicas.....	24
Estructura y producción agrícola.....	24
Tenencia de tierra.....	24
Uso de la tierra.....	24
Propiedad familiar.....	25
Características de la producción agrícola.....	25
Rendimiento de los cultivos andinos.....	25
Costos de producción de los cultivos.....	26
Origen del recurso económico para el productor agropecuario de Un.....	27
Comercialización de productos agrícolas.....	27
IV MATERIALES Y MÉTODOS	
Técnica de valoración económica y el modelo producción salinidad.....	29
Técnica del cambio de productividad.....	29
Características de la técnica de valoración.....	29
Descripción del Modelo PROSAL.....	31
Datos de entrada.....	35
Análisis de la salida.....	37
Descripción del generador de trazas.....	37
Secuencia metodológica.....	40

IV	RESULTADOS Y DISCUSION	
	Información recopilada para la aplicación del modelo y su análisis evolutivo.....	49
	Precipitación y evaporación utilizada en el modelo PROSAL.....	49
	El recurso suelo.....	51
	Características físicas de los suelos utilizadas en el modelo PROSAL.....	51
	Características químicas del suelo utilizada por el modelo PROSAL.....	51
	El recurso agua.....	52
	Calidad del agua de riego.....	52
	Características y rendimiento de los cultivos.....	52
	Características socioeconómicas del cantón Unupata.....	54
	Aspectos de la actividad técnico - económica.....	55
	Estructura y producción agrícola.....	55
	Uso de la tierra	55
	Características de la producción agrícola.....	55
	Evolución de la salinización en suelos y aguas.....	56
	Análisis evolutivo de la salinidad de los suelos de Unupata Centro.....	56
	Evolución de la salinidad en el recurso suelo.....	56
	Evolución de la salinidad en el recurso agua de riego.....	57
	Aplicación del modelo PROSAL.....	59
	Calibración del modelo PROSAL.....	59
	Simulación de la evolución de la salinidad de los suelos y rendimiento de los cultivos.....	66
	Evolución de la salinidad de suelos.....	68
	Efecto de la salinidad de los suelos sobre el rendimiento del cultivo de papa	70
	Efecto de la salinidad de los suelos sobre el rendimiento del cultivo de alfalfa	74
	Estimación de los beneficios netos por el cambio de la productividad, para determinar el efecto salinidad en los cultivos.....	78
	Beneficios por la producción de los cultivos de papa y alfalfa.....	79
	Beneficios anuales obtenidos por el cambio de productividad al aplicar diferentes láminas de riego.....	79
	Cultivo de papa.....	79
	Cultivo de alfalfa.....	81
	Beneficios netos por ciclo de cultivo sin riego.....	84
	Cultivo de papa.....	85
	Cultivo de alfalfa.....	85
	Identificación de efectos ambientales debidos a la agricultura con y sin riego de Unupata Centro.....	85
	Evaluación del impacto social por la salinidad.....	87
V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
	Conclusiones.....	89
	Recomendaciones.....	91
	BIBLIOGRAFIA.....	95

APENDICES	99
1 Diagrama para la clasificación de las aguas para riego (USDA, 1954).....	99
2 Análisis físico químico de suelos salinos representativos del Cantón Unupata u Unupata Centro-provincia G. Villarroel.....	101
3 Datos mensuales y anuales de precipitación y evaporación en mm, Estación Climatológica San José Alto, provincia Gualberto Villarroel.....	109
4 Demandas de riego mensuales del cultivo de papa y alfalfa generadas por el modelo Producción Salinidad cond.eléctrica del agua a 1,52 dS/m.....	113
5 Relación entre el coeficiente hidrodinámico del suelo y su textura, coeficiente de desarrollo foliar para el cálculo de $E_{t\max.}$, y densidad de enraizamiento para el cálculo umbral óptimo de riego (Norero, 1976 y Mass, 1987).....	135
6 Imagen de los suelos salinos y cultivos de quinua y alfalfa - Unupata Centro.....	139
7 Mapa de suelos y aptitud para el riego provincia Gualberto Villarroel.....	143
8 Ubicación de canales de riego (provincia. Gualberto Villarroel).....	147
IMAGEN	
9 Imagen LANDSAT, 1987.....	151
10 Glosario.....	155

	FIGURAS	Pág
1	Clasificación de las principales técnicas de valoración.....	10
2	Mapa de ubicación.....	14
3	Flujograma metodológico seguido en el trabajo.....	41
4	Precipitación y evaporación mensual en mm de la estación climatológica San José Alto.....	50
5	Evolución histórica de rendimiento en suelos salinos, bajo condiciones de riego, período 1974- 1988.....	53
6	Evolución de la salinidad en los suelos de Unupata Centro, provincia Gualberto Villarroel, provincia Gualberto Villarroel, período 1974-1988.....	57
7	Evolución de la salinidad del agua para riego, período de 6 años discontinuos, Unupata Centro (1974-1988).....	58
8	Comparación de la conductividad eléctrica medida con la simulada, para el cultivo de papa, período 1974- 1988 (Unupata Centro).....	62
9	Comparación de la conductividad eléctrica medida con la simulada, para el cultivo de cebada, período 1974-1988.....	62
10	Comparación de la conductividad eléctrica medida con la simulada para el cultivo de quinua, período 1974-1988.....	63
11	Comparación de la conductividad eléctrica medida con la simulada para el cultivo de alfalfa, período 1974-1988.....	63
12	Simulación de la evolución de la conductividad eléctrica final de los suelos en un período de 20 años, cultivo de papa	69
13	Simulación de la evolución de la conductividad eléctrica final de los suelos simulados en período de 20 años, cultivo de alfalfa	70
14	Evolución del rendimiento de papa en Mg/ha a 0,47 de eficiencia de lavado y el factor de 1,2 y 1,56 (20% y 56%) de lámina de riego que realmente se infiltra (perspectiva por 20 años)...	73
15	Evolución en rendimiento del cultivo alfalfa generados por el modelo PROSAL en Mg/ha y 0,47 de eficiencia de lavado y lámina de riego que realmente se infiltra de 1,2 y 1,58.....	77
16	Beneficios anuales del cultivo de papa a láminas de riego en exceso de 20% y 56% (perspectiva de 20 años)	81
17	Beneficios anuales del cultivo de alfalfa a láminas de riego en exceso de 20% y 58% (perspectiva de 20 años).....	83
18	Encadenamiento de efectos ambientales producidos por la actividad agrícola en suelos salinos sin riego.....	86
19	Encadenamiento de efectos ambientales producidos por la actividad agrícola en suelos salinos con láminas de riego no adecuadas.....	86
20	Impacto social por la salinidad de los suelos en la producción de papa, tasa de descuento de 10%, expresadas en US\$ por año de tres ha - cesta básica.....	89
21	Impacto social por la salinidad de los suelos en la producción de alfalfa, a tasa de descuento de 10%, expresadas en US\$ por año de tres ha - cesta básica.....	89

No	TABLAS	Pág
1	Características químicas de los suelos salinos bajo riego - Cantón Unupata.....	19
2	Aniones solubles y RAS de los suelos salinos bajo riego (Cantón Unupata)	19
3	Textura de los suelos salinos del Cantón Unupata (período 1974-1988).....	19
4	Características químicas de los suelos salinos bajo riego - Unupata Centro.....	21
5	Aniones solubles y Relación de Adsorción de Sodio correspondiente a los suelos salinos bajo riego, Unupata Centro	21
6	Aspectos texturales de los suelos salinos de Unupata Centro (período 1974-1988).....	21
7	Posesión de tierras por familia del cantón Unupata	25
8	Rendimiento promedio de cultivos papa, cebada, quinua y alfalfa en suelos ensalitrados en condiciones de secano y riego (15 años).....	26
9	Costos de producción de los cultivos: papa, cebada, quinua y alfalfa-período 1995-1996.....	26
10	Fuente de ingreso familiar.....	27
11	Precipitación y evaporación promedio por ciclo de los cultivos papa, cebada, quinua y alfalfa, Estación Climatológica San José Alto, provincia Gualberto Villarroel.....	50
12	Características físicas y humedad de los suelos (capa arable) de Unupata Centro.....	51
13	Característica de la salinidad promedio a diferentes profundidades de los suelos salinos de Unupata Centro.....	51
14	Parámetros de los cultivos evaluados en el sector de Unupata Centro.....	52
15	Rendimientos históricos de los cultivos andinos (Mg/ha) en suelos ensalitrados bajo condiciones de riego (período 1974-1988).....	53
16	Determinación promedio de precios a puerta de finca (1995-1996).....	54
17	Costos de producción de los cultivos agrícolas	54
18	Distribución de tierras por uso familiar del Cantón Unupata (ha).....	55
19	Conductividad eléctrica medida en campo, período 1974-1988.....	56
20	Análisis químico del agua de riego, análisis realizado a mediados del ciclo vegetativo de los cultivos (1974-1988).....	58
21	Datos de la conductividad eléctrica (dS/m) medidos y simulados en extracto de saturación del suelo, para la eficiencia de lavado 0,47 y lámina que realmente se infiltra con base a datos históricos (1974-1988), Unupata.....	61
22	Valores de eficiencia de lavado y lámina de riego que realmente se infiltra los cuales permitieron calibrar el parámetro de cond. eléctrica final medida "in situ" (CEf).....	65
23	Cultivos seleccionados con base en la calibración del modelo PROSAL.....	65
24	Trazas generadas con base en datos históricos (San José Alto).....	67
25	Simulación de la evolución de la salinidad final de suelos en dS/m simulados para una eficiencia de lavado 0,47 C.E.a 1,52 dS/m constante y lámina que realmente se infiltra para cultivos de papa y alfalfa (1,2 ; 1,56 y 1,58), Unupata Centro.....	68
26	Simulación de la evolución del rendimiento y conductividad eléctrica final por período de siembra establecido para el cultivo de papa a una eficiencia de lavado de 0,47, C.E.e de 4,77 dS/m y factor de lámina de riego que se infiltra realmente de 1,20 y 1,56.....	72
27	Evolución del rendimiento y conductividad eléctrica final por periodo de siembra establecido para el cultivo de alfalfa a una eficiencia de lavado de 0,47, C.E.e de 4,77 dS/m y factor de lámina de riego que se infiltra realmente de 1,20 y 1,58.....	76
28	Comparación de rendimientos históricos promedio de los cultivos papa y alfalfa bajo condiciones normales de producción con los estimados por el cambio de productividad a una lámina en exceso de 1,20-1,56 y 1,20-1,58 (Mg/ha), Cantón Unupata.....	

29	Beneficios anuales obtenidos a diferentes láminas de riego que realmente se infiltra 1,20 y 1,56 en suelos salinos bajo riego en el cultivo de papa, perspectiva de 20 años.....	80
30	Beneficios anuales por el cambio de productividad para el cultivo papa a 1,20 y 1,56 de lámina de riego en exceso, período de 20 años.....	81
31	Beneficios anuales obtenidos a diferentes láminas de riego que realmente se infiltra 1,20 y 1,58 en suelos salinos bajo riego en el cultivo de alfalfa, perspectiva 20 años.....	82
32	Beneficios anuales obtenidos por el cambio de productividad para el cultivo de alfalfa al aplicar 1,20 y 1,58 de lámina de riego que realmente se infiltra, perspectiva de 20 años.....	84
33	Beneficios netos de los cultivos de papa y alfalfa bajo condiciones normales de producción - Cantón de Unupata.....	85
34	Ingreso anual por cambio en la productividad por familia con base en la producción de tres hectáreas del cultivo de papa y alfalfa bajo condiciones normales y de riego (perspectiva por veinte años).....	88

LISTA DE SÍMBOLOS

BN	Beneficio neto
CEe	Conductividad eléctrica en extracto de saturación del suelo
CEa	Conductividad eléctrica del agua (salinidad del agua de riego)
Mg	Megagramo
Mg/m ³	Megagramos por metro cúbico
cmol/L	Centimoles por litro
cmol/Kg	Centimoles por kilogramo
mg/kg	Miligramo por kilogramo
PROSAL	Producción-Salinidad
SNAG	Secretaría Nacional de Agricultura y Ganadería
SENAMHI	Secretaría Nacional de Meteorología e Hidrología

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como fin evaluar el impacto del problema de la salinidad en los suelos de Unupata Centro, provincia Gualberto Villarroel, Bolivia, mediante la técnica de valoración económica del "Cambio de Productividad" utilizando el modelo Producción-Salinidad (PROSAL).

La valoración económica tuvo su base en la determinación de la salinización en los suelos y su efecto directo en los cultivos bajo condiciones de riego, así como su correspondiente impacto social.

Para los fines del estudio se consideró la información histórica de suelos, cultivos, agua, y socioeconomía de Unupata Centro. La calibración del modelo PROSAL se hizo con las curvas de datos medidos "*in situ*" y simulados por el modelo. Estos permitieron seleccionar los cultivos papa y alfalfa para su posterior valoración económica.

El proceso de simulación sirvió básicamente para determinar la evolución de la salinidad de los suelos y su efecto sobre el rendimiento de los cultivos. Para la obtención de tales indicadores se utilizó la siguiente información: trazas de precipitación y evaporación, características agronómicas de los cultivos, características de suelo y del agua. Para estos fines la eficiencia de lavado fue 0,47, y las láminas de riego que realmente se infiltran fueron de 56% y 58% para los cultivos de papa y alfalfa, respectivamente.

La evaluación económica o estimación de los beneficios se basó en los rendimientos, precios y costos de producción históricos de los cultivos de papa y alfalfa, los cuales sirvieron para establecer comparación con el costo de la cesta básica, en Unupata Centro y así determinar el impacto social por la salinidad de los suelos en la familia rural de la región.

La evolución de la salinidad en la capa arable de Unupata Centro evidencia un aumento de sales de 1,56 dS/m a 4,77 dS/m, para el periodo 1974 -1988. Los resultados obtenidos confirman que las sales solubles en los suelos ocasionan el deterioro del recurso suelo, ya que como produce la disminución en el rendimiento de los cultivos, por lo tanto, ello amerita un cambio en el tipo de cultivo y/o una mejora en las características físico-químicas de los suelos.

La aplicación de una metodología de simulación de la relación de la salinidad con la productividad y de técnicas de valoración económica de "Cambio de Productividad" constituyen herramientas que facilitan la toma de decisiones a nivel de prefactibilidad para la utilización de los recursos existentes, tal como se pretende demostrar en este trabajo.

CAPITULO I

INTRODUCCION

La salinización es un proceso edafológico afectado por el riego con aguas de mala calidad, particularmente en los suelos de las regiones áridas y semiáridas, lo cual limita el número de especies que pueden ser cultivadas sin afectar sus rendimientos.

Diversas regiones del Altiplano Central y Sur Boliviano se están deteriorando rápidamente por la salinización de los suelos, principalmente asociado a los materiales de la formación geológica del mismo, agravado por factores externos que han ocasionado los cambios ambientales y/o agrícolas.

El deterioro ambiental del Altiplano Central Boliviano amerita realizar investigaciones orientadas a la evaluación de la salinidad del suelo y de su influencia en el rendimiento de los cultivos bajo riego, desarrollando y adaptando metodologías que permitan estudiar la evolución de las sales, con antelación suficiente para diagnosticar sus consecuencias, desde lo que comprende la relación suelo-agua-planta hasta el manejo adecuado de los recursos suelo y agua. El propósito es que los impactos negativos, tanto en la producción agrícola como del medio social, sean minimizados para obtener un desarrollo sostenido del ambiente agrícola.

El desarrollo del Cantón de Unupata está estrechamente relacionado con la influencia que pueda ejercer el poblador sobre el recurso suelo y agua, y a su vez la influencia de estos dos en los cultivos. De la interrelación de estos tres factores, depende el bienestar social de la familia y el desarrollo agroeconómico de la región.

El presente trabajo está orientado a estudiar el problema de la salinidad en los suelos para, de esta forma, determinar los impactos sobre la productividad agrícola y sobre el ingreso de los agricultores. Para tales fines, se procedió a aplicar una metodología de valoración económica de los cultivos bajo riego, en suelos salinos, a través del método de "Cambio de Productividad", con base en los resultados obtenidos con la aplicación del Modelo Producción-Salinidad, utilizado específicamente para este propósito.

Objetivos

Objetivo general

- Efectuar la valoración económica del efecto de la salinidad a través de su impacto sobre el nivel de ingreso de los productores en áreas bajo riego de Unupata Centro.

Objetivos específicos

- Determinar la evolución de la salinidad en suelos y aguas de Unupata Centro.
- Determinar la evolución del efecto de la salinidad en los cultivos bajo riego de Unupata Centro.
- Cuantificar el efecto de la salinidad sobre el rendimiento de los cultivos utilizando un modelo de Producción - Salinidad.
- Valorar el impacto económico del problema de la salinidad a través del efecto sobre el ingreso de los productores de Unupata Centro.

CAPITULO II

REVISION BIBLIOGRAFICA

Aspectos generales de los suelos y aguas salinos

Es pertinente considerar que no se cuenta con la información detallada sobre la salinidad de los suelos de Unupata Centro, su formación y evolución; se tiene una información a nivel general de Quisbert (1980), Ledezma (1995) y Sejas (1993). Este último realizó estudios en zonas aledañas al área de estudio.

A continuación se mencionan los aspectos generales de los suelos salinos:

Salinidad en suelos y aguas

La salinidad del suelo y del agua reduce la disponibilidad del agua para los cultivos, a tal punto que llegan a afectar significativamente los rendimientos. En consecuencia, el problema de la salinidad existe cuando las sales se acumulan en la zona radical a una concentración tal que ocasiona pérdidas en la producción (FAO, 1987).

El término salino se aplica a suelos cuya conductividad eléctrica en el extracto de saturación es mayor de 4 dS/m (USDA, 1954) a 25°C, con un porcentaje de sodio intercambiable menor de 15. El pH generalmente es menor de 8,5. Los suelos salinos casi siempre se encuentran floculados debido a la presencia de un exceso de sales y a la ausencia de cantidades significantes de sodio intercambiable. En consecuencia la permeabilidad es igual o mayor a la de suelos similares no salinos (USDA, 1954).

La calidad del agua de riego puede variar significativamente según el tipo y cantidad de sales disueltas. Las sales se encuentran en cantidades relativamente pequeñas pero significativas, y tienen su origen en la disolución y meteorización de las rocas y suelos, además de los procesos de disolución lenta de la caliza, del yeso y de otros minerales (Ayers y Westcot, 1987).

Origen de las sales solubles

De acuerdo a Pizarro (1979), citado por Alarcón (1982), los suelos salinos con frecuencia se desarrollan en áreas de mal drenaje subterráneo, bien por razones topográficas, como depresiones, y/o edafológicas, tales como la presencia de estratos impermeables.

Las sales solubles del suelo están constituidas, principalmente, por los cationes sodio, calcio y magnesio y por los aniones cloruro, sulfato y bicarbonato; el catión potasio y los aniones carbonatos y nitratos, se encuentran en cantidades menores. La fuente original y directa, de la cual provienen las sales señaladas, son

los minerales primarios que se encuentran en los suelos de la corteza terrestre (Allison, 1962).

Richards (1977) señala que la intemperización de los minerales primarios es la fuente indirecta de casi todas las sales solubles, aunque hay pocos ejemplos en los que se haya acusado suficiente cantidad de sal de este origen como para formar un suelo salino.

Muchos investigadores están de acuerdo en que el océano puede ser la fuente de sales en aquellos suelos en los que el material original geológico está constituido por depósitos marinos, ocasionados por movimientos tectónicos durante el período Terciario y a partir de entonces han emergido.

Procesos de salinización de los suelos

Los suelos salinos se encuentran principalmente en zonas de clima árido o semiárido. En condiciones de humedad, las sales solubles son generalmente llevadas a las capas inferiores del suelo, hacia el agua subterránea de donde son transportadas a los aceáños.

A continuación se presentan los conceptos expuestos por diferentes autores sobre la dinámica de formación y las características de los suelos afectados por sales.

Causas del problema de suelos salinos o potencialmente salinos. La concentración, composición y distribución de sales en el perfil del suelo, asociadas a condiciones climáticas, de drenaje, de composición y de sales en las aguas disponibles, pueden producir, al introducir el riego, problemas en los cultivos derivados de la concentración total de sales en la solución del suelo.

Según Grassi (1993) el drenaje restringido es un factor que frecuentemente contribuye a la salinización de los suelos y que puede llevar consigo la presencia de una capa freática poco profunda o una baja permeabilidad del suelo.

Según Ayers y Westcot (1987) las sales son llevadas a la zona radical del suelo disueltas en las aguas de riego y su concentración aumenta a medida que los cultivos evapotranspiran gran parte del agua almacenada, quedando casi todas las sales en la zona radical.

Allison et al. (1962) señala que las texturas arcillosas a arcillo limosas coadyuvan en la salinización de los suelos. Por regla general un suelo de textura fina tiene una elevada capacidad de retención de humedad y menor permeabilidad. Además, son afectados con mayor intensidad para un valor determinado de PSI, que los de textura gruesa.

Efectos de las sales sobre los cultivos

Los cultivos desarrollados en suelos salinos, donde las plantas usualmente presentan "achaparramiento" con una variabilidad considerable de tamaño, el follaje es de color verde - azulado y se ven áreas sin planta alguna; sin embargo, estas características no son indicaciones infalibles de la salinidad. En efecto se debe evitar la confusión entre los efectos debidos a la baja fertilidad del suelo y aquellos causados por la salinidad. Las plantas achaparradas debido a la baja fertilidad, son comúnmente verde-amarillentas, mientras que las afectadas por la salinidad, son por lo general verde-azuladas (USDA, 1954).

Según Ayers y Westcot (1987) las plantas extraen el agua del suelo cuando las fuerzas de imbibición de los tejidos de las raíces son superiores a las fuerzas de retención del agua ejercida por el suelo. A medida que es extraída el agua del suelo, las fuerzas que retienen el agua restante se hacen mayores, esto es, la presión osmótica del suelo es mucho mayor que la de la planta.

Levit (1972), citado por Ledezma (1995), señala que, en la mayoría de los casos, las sales provocan daños primarios y secundarios en los cultivos. Los daños primarios involucran efectos tóxicos específicos, directamente en la membrana exterior de las células; el daño secundario está relacionado con la deshidratación por efecto osmótico.

Pérez *et al.* (1993) señalan que el efecto principal de las sales solubles sobre las plantas es osmótico, tanto, que altos contenidos de sales en el suelo dificultan la obtención de agua para el crecimiento de las plantas.

El efecto nocivo de las sales solubles se debe a que produce presiones osmóticas en la solución del suelo que está en contacto con las raíces de la planta, las cuales, al pasar de ciertos valores producen una disminución en los rendimientos o pérdida total de la cosecha. Estos efectos son diferentes para cada cultivo en distintas etapas de su desarrollo (Aguilera, 1980).

Efectos de las sales sobre los suelos

Allison *et al.* (1962) expresan que la presencia elevada de sales alcalinotérreas permite que los coloides del suelo puedan permanecer coagulados, pero la presencia de sodio da lugar a la eliminación paulatina de otras sales, debido al efecto peptizante que este elemento adsorbido origina.

Según Thorne y Peterson (1950) citados por Grassi (1991) las sales ejercen, como componentes de la solución del suelo, los siguientes efectos: a) aumentan la presión osmótica y disminuyen el potencial hídrico total; b) dispersan los coloides del suelo y hacen que éste sea menos permeable y c) efecto tóxico específico de algunas sales en ciertos cultivos.

Allison *et al.* (1962) señalan que los suelos salinos casi siempre se encuentran floculados debido al exceso de sales (calcio y magnesio) y de cantidades no significativas de sodio intercambiable, en consecuencia, la permeabilidad de estos suelos salinos puede ser similar a los normales; esto se debe a que los cationes bivalentes son adsorbidos más fuertemente por las partículas de arcilla que los monovalentes de sodio y potasio, permitiendo agregados más estables y de mayor tamaño.

Clasificación de suelos y aguas desde el punto de vista de la salinidad

Clasificación de suelos. Investigadores dedicados al estudio de suelos adoptaron los criterios propuestos por USDA, (1954) y SSSA (1973) para clasificar los suelos y aguas afectados por la salinidad, los mismos que se describen a continuación:

USDA (1954) establece su clasificación de los suelos, basándose en la conductividad eléctrica en el extracto de saturación (CEe) y el Porcentaje de Sodio intercambiable (PSI), de acuerdo a los siguientes criterios:

Suelos normales : CEe menor a 4 dS/m
Suelos salinos : CEe mayor a 4 dS/m
Suelos sódicos : CEe menor a 4 dS/m
Suelos salino-sódicos: CEe mayor de 4 dS/m

Suelos normales : PSI menor a 15
Suelos salinos : PSI menor a 15
Suelos sódicos : PSI mayor a 15
Suelos salino-sódicos: PSI mayor de 15

La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo, (SSSA, 1973) introdujo una clasificación basada en la conductividad eléctrica en el extracto de saturación del suelo y la Relación de Adsorción de Sodio (RAS). A diferencia de la clasificación anterior el límite para el suelo salino es de 2 dS/m, a saber:

Suelos normales: CEe menor a 2 dS/m
Suelos salinos : CEe mayor a 2 dS/m
Suelos sódicos : CEe menor a 2 dS/m
Suelos salino-sódicos: CEe mayor a 2 dS/m

Suelos normales : RAS menor a 15
Suelos salinos : RAS menor a 15
Suelos sódicos : RAS mayor a 15
Suelos salino-sódicos: RAS mayor a 15

Clasificación del agua de riego. Según USDA (1954) esta clasificación se basa en la conductividad eléctrica CEa y la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) del agua de riego.

Los rangos establecidos para la conductividad eléctrica son los siguientes:

C1	agua de baja salinidad	CE a 25°C entre	0-0,250	dS/m
C2	agua de salinidad media	CE a 25°C entre	0,251- 0,750	dS/m
C3	agua altamente salina	CE a 25°C entre	0,751- 2,250	dS/m
C4	agua muy altamente salina	CE a 25°C mayor a	2,250	dS/m

El USDA (1954) evalúa la RAS y la CEa para verificar el posible problema que puede causar el agua en la permeabilidad del suelo, los rangos generales son:

S1	agua baja en sodio	RAS de 0 a 10
S2	agua media en sodio	RAS de 10 a 18
S3	agua alta en sodio	RAS de 18 a 26
S4	agua muy alta en sodio.	RAS mayores de 26

El diagrama para la clasificación de las aguas de riego por su conductividad eléctrica y por su Relación Adsorción de Sodio (RAS) se muestran en el Apéndice 1.

Estimación del rendimiento relativo de los cultivos según la concentración salina del suelo

La producción de cebada, papa, quinua y alfalfa constituyen una actividad normal y tradicional en el Cantón Unupata y en las regiones del Altiplano Central del país. Una de las áreas destinadas a la producción bajo riego de estos cultivos es Unupata Centro con fines de alimentación o autoconsumo y en porcentaje menor para la comercialización, específicamente en el caso de la papa y la cebada en grano(SNAG, 1996).

El método de riego por surco es uno de los más comúnmente utilizado en los cultivos de papa, cebada y quinua. Las parcelas de riego generalmente son mayores de 0,5 ha, y la topografía casi plana (Sejas, 1993).

Ayers y Westcot (1987), y Mass y Hoffman (1977) consideran que existe una relación lineal entre el rendimiento relativo de los cultivos y la salinidad, tal que:

$$y = 100 - b (CE_m - Su) \quad (2.1)$$

Donde:

- y = Rendimiento relativo en %
- CE_m = Es la conductividad eléctrica media en el extracto de saturación del suelo en dS/m.
- Su = Es el valor umbral o de la salinidad umbral en dS/m.
- b = Es la disminución de rendimiento por aumento unitario de salinidad.

Aspectos socioeconómicos en Unupata Centro y su relación con el proceso de salinización

Los problemas sociales y económicos en la región datan desde la época anterior a la Reforma Agraria (1952). Según INE (Instituto Nacional de Estadística, 1992) los problemas de Unupata Centro son: económicos, donde los ingresos obtenidos por la producción agrícola es baja; sociales, caracterizados por la migración; físico -naturales y ambientales, expresados en la degradación de los recursos suelo-agua, etc. Estos problemas se deben a la salinización de los suelos, inasistencia del gobierno local, problemas de manejo y conservación de suelos, inasistencia técnica en el riego parcelario, ausencia de agua para el riego y otros. Además de la ausencia de datos sociales y económicos de la zona de estudio; tales como, ausencia de datos de la tasa migratoria de los ingresos de los agricultores entre otros.

Aspectos generales de la teoría económica acerca de los recursos naturales renovables

Cottrel (1980) menciona que la característica más importante de la tierra como recurso económico es el suelo, pues la capa arable se pierde paulatinamente con el uso. La agricultura, especialmente la intensiva moderna, produce efectos negativos, con implicaciones económicas desfavorables al medio ambiente, debido a la descarga de fertilizantes químicos, desperdicios animales en los ríos, deforestación, riego con aguas de mala calidad y la salinidad de suelos, destruyendo así el hábitat de los animales y, por que no, del hombre mismo.

Randal (1985), citado por Bishop (1995), señala que los productores, transformadores y consumidores de los productos naturales y agrícolas, confrontan los constantes cambios de las condiciones económicas, puesto que, una economía coordina producción y consumo, ahorro e inversión, ello de acuerdo con la escasez de los recursos, la tecnología limitada, las necesidades y deseos de los ciudadanos.

Según FAO (1993) cualquier proyecto de desarrollo puede dar lugar a una reducción, transformación e incluso eliminación de los bienes suministrados por el medio ambiente. Así, la contaminación del aire, de los ríos, la salinización de suelos, etc., implica una reducción en los beneficios provenientes de su uso.

Flores y Chávez (1993) y Anderson (1989) señalan que las externalidades en las actividades productivas que lleva a cabo el agricultor, pueden ser la causa de la degradación del suelo, aire y agua, que afectan la productividad agrícola por medio del riego, el uso intensivo del suelo, la erosión producida por la deforestación y otros.

Pearce *et al.* (1995) señalan que los efectos secundarios de la contaminación del recurso suelo se notan en la explotación agrícola a nivel local. Los efectos más relevantes son: el cambio agrícola en términos de variación de productividad en los usos de la tierra, cambios de localización, infección de cultivos, cambios de usos de la tierra debido a la migración de la población y otros.

El cambio de la calidad ambiental afecta la producción vinculada con el mercado real; una decisión de inversión suele tener un impacto ambiental, que afecta la cantidad y calidad de la producción, cuyo valor puede calcularse fácilmente en términos económicos, según Munasinghe (1994).

Gómez (1994) señala que los cambios en la función de producción pueden ser de carácter interno del proyecto, por ejemplo, con bastante frecuencia, en condiciones de aridez, el funcionamiento de un proyecto de riego implica el constante aumento de la salinidad del suelo y por ende la constante reducción del valor de los cultivos.

El agente receptor de un efecto puede ser al mismo tiempo el agente generador y la actividad receptora ser al mismo tiempo la actividad generadora del efecto, en cuyo caso la situación corresponde a una externalidad "*in situ*". Un ejemplo de esta situación lo representa la reducción en la productividad del suelo en actividades agrícolas y ganaderas como consecuencia de la acumulación de sales por el riego, y pérdida de nutrientes por erosión (CEPAL, 1994).

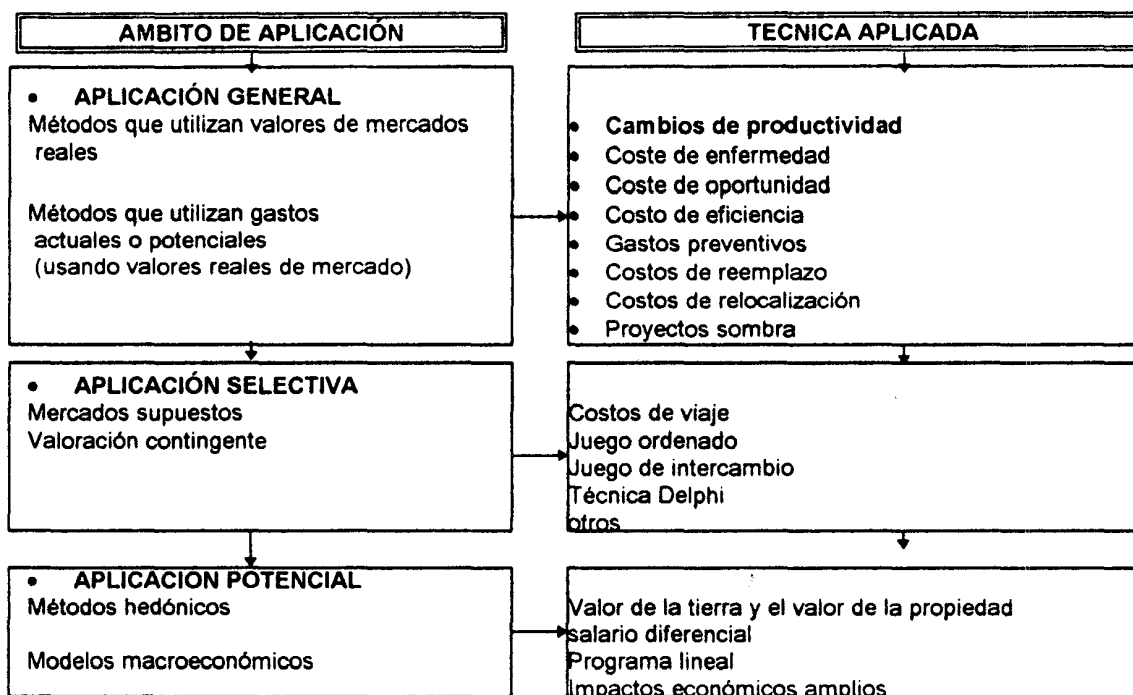
López (1991) señala que los aspectos económicos sobre todo relativo a costos y beneficios derivados de las prácticas agronómicas, es de interés, porque: "*las prácticas por ejemplo de conservación de suelos generan beneficios a largo plazo a cambio de inversiones o costos inmediatos*".

Métodos que utilizan valores reales de mercado

Dixon, *et al.* (1994) clasifica las metodologías de valoración de impactos ambientales de acuerdo al ámbito de aplicación, distinguiendo entre aquellas de aplicación general, selectiva y potencial. El método de Cambio de Productividad pertenece al ámbito de la utilización de valores de mercado real, que a la postre será aplicado para el propósito del estudio (Figura 1).

La técnica del Cambio de Productividad es una valoración económica de uso directo. Referente a ello, Bergstrom *et al.* (1990) señalan que el valor de uso directo, espacialmente, es el uso de un recurso en un lugar específico, es decir la relación

directa que existe entre las actividades humanas y un determinado espacio físico. Asimismo, el valor puede ser de carácter consuntivo o no consuntivo.



Fuente: Dixón *et al.*, 1994.

Figura 1: Clasificación de las principales técnicas de valoración

A continuación se desarrolla la técnica del cambio de productividad.

Técnica del cambio de productividad

Moreno (1992), señala que la técnica basada en Cambio de Productividad se utiliza para la evaluación de un Cambio de la Productividad en algún producto, esto sirve para valorar los efectos que cambian a calidad y cantidad de productos que son eventualmente intercambiados en el mercado; la idea es la utilidad del bien, donde los beneficios deben proceder del cambio en el nivel de bienestar de los individuos que constituyen la sociedad. Valora a precios de mercado reales, mientras que los demás están basados en suposiciones e inferencias.

Según Riera (1993), el cambio de productividad busca determinar el valor económico y/o valor del recurso ligado al valor social de un bien o servicio que está relacionado con el mercado común o real. Se fundamenta en datos históricos o reales de producción y evolución del grado de contaminación del recurso para un determinado beneficio máximo o mínimo.

Azqueta (1995) señala que el caso más común en la agricultura, es la contaminación del agua que puede afectar la producción del agua potable y del agua para riego, degradando los suelos con efectos directos en la disminución del rendimiento de los cultivos; por tanto, reduce el valor de los cultivos sembrados en determinadas tierras.

Según el Banco Mundial (1991), los Cambios de Productividad pueden ser internos del proyecto, en tal caso: la implementación de un proyecto de riego implica el constante aumento de la salinidad del suelo y, como consecuencia de ello, la constante reducción de la producción de los cultivos. Ahora bien, cuando el efecto ambiental es interno, las pérdidas de bienestar debidas a la mayor salinidad pueden reflejarse en los ingresos decrecientes obtenidos al cosechar.

Hufschmidt *et al.* (1983), citado por Pérez (1996), señalan que la clave de la técnica es que la calidad ambiental es evaluada como un factor de producción, es decir, que los cambios producidos en la productividad y en los costos de producción, inciden en los cambios de precios y niveles de oferta de tales productos, lo cual puede ser medido y observado.

Muchos economistas señalan que la técnica de cambio de productividad se usa para evaluar los efectos que cambian la calidad y cantidad de productos que son intercambiados en el mercado. Por ejemplo, la salinización de los suelos afecta la productividad de los cultivos por su efecto directo sobre el rendimiento.

Consideraciones acerca del modelo de simulación utilizado en el trabajo

A continuación sólo se hacen algunas consideraciones generales del modelo: PROSAL y del generador de trazas, HEESMM. Posteriormente en el Capítulo IV se indican los datos necesarios para la activación de los mismos.

Según Pérez (1993) los modelos de Producción-Salinidad son expresiones matemáticas que relacionan los rendimientos de los cultivos con la salinidad del agua de riego, condiciones del clima, y características físicas y químicas de los suelos donde el agua se aplica.

Pérez *et al.* (1993), acerca del PROSAL, expresan que es un modelo estacional, basado en el balance de sales y agua en el suelo durante un periodo de tiempo determinado, cuyo objetivo es estimar el nivel de productividad a obtener de un determinado cultivo, considerando el efecto de las sales en el agua y el suelo, las características físicas del suelo, las características del cultivo, los datos climatológicos y la relación Salinidad - Productividad.

El modelo ayuda a seleccionar los cultivos potenciales que se pueden sembrar en áreas bajo condiciones de riego y de cierto grado de salinidad, con requerimientos

climáticos específicos y características químicas y físicas de suelo dadas (Pérez *et al.*, 1993).

El archivo de salida del modelo PROSAL ofrece información, para periodos mensuales, donde los valores de lámina de riego y E_{tm} (evapotranspiración mensual) son expresados en mm, conductividad eléctrica en dS/m y el rendimiento en porcentaje.

Limitaciones del modelo PROSAL

Pérez (1993) señala las siguientes supuestas limitaciones del modelo Producción-Salinidad:

- El cultivo responde durante el ciclo a la salinidad media de la zona radical. Esto puede ser cierto para cultivos irrigados mediante métodos de riego por superficie.
- La salinidad en la zona radical es homogénea y el cultivo absorbe el agua donde está disponible.
- Se sigue la tendencia de Maas y Hoffman (1977) de que existe una relación lineal entre rendimiento y salinidad. Sin embargo, puede que dicha suposición no sea válida para todos los cultivos.
- No hay dilución ni precipitación de sales que puedan afectar el balance salino. Tampoco existe aporte de sales de las aguas que ascienden por capilaridad desde el nivel freático.

CAPITULO III

ASPECTOS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

Aspectos generales del área de estudio (Cantón Unupata)

Físico - natural

Las características físico-naturales y socioeconómicas descritas a continuación corresponden al Cantón de Unupata en general y para el área de estudio de Unupata Centro, en particular. Estos datos fueron recopilados en el taller comunal realizado en julio de 1996 y de informes obtenidos de SNAG (1993), Sejas (1993), Quisbert (1980), Ledezma (1995), Yunta (1996) e INE (1992 y 1996).

Ubicación y extensión

El Cantón de Unupata se encuentra localizado en el Altiplano Central de Bolivia, concretamente en la provincia Gualberto Villarroel del departamento de La Paz. Circunda la margen derecha del río Desaguadero y comprende las comunidades de Escalona, Janko Huicho, Unupata Centro, Alianza y Bolívar; zona conocida como el pie de Monte de Villarroel.

El Cantón de Unupata, geográficamente se ubica entre los paralelos 17 ° 30' y 17° 49' de latitud sur, y entre los meridianos 67° 32' y 67° 50' de longitud oeste del meridiano de Greenwich. Tiene una extensión territorial aproximada de 4118 ha; de ella el área de estudio (Unupata Centro) tiene una superficie aproximada de 500 ha, de las cuales 75 ha se encuentran bajo riego y sólo 18 ha. son efectivamente regadas. El área de Unupata Centro se encuentra ubicada a una altura de 3.720 m.s.n.m. (Figura 2).

Geología

Las planicies inundables y no inundables del Cantón se encuentran en las formaciones cuaternarias; correspondientes a la subregión de la cuenca del río Desaguadero, en la llamada Puna; donde los suelos son de origen volcánico, ceniza, tufa, y lavas, así como de rocas piroclásticas SNAG (1971).

Los suelos son originados por depósitos aluviales jóvenes del cuaternario, con perfiles que van de profundos a muy profundos; imperfectamente drenados y con problemas de materia orgánica, salinidad, erosión hídrica y eólica.



Figura 2. Mapa de ubicación

Fisiografía

La característica fisiográfica predominante de la zona es la llanura aluvial; que posee una topografía plana con pendientes entre 0,05 y 0,2%. Está cubierta con vegetación del tipo Estepa, donde se distinguen dos unidades fisiográficas: la llanura aluvial y el área eólica.

Relieve y topografía

La llanura aluvial inundable presenta relieve plano a casi plano y suelos de texturas pesadas, se caracteriza por tener pendientes entre 0,05 % y 0,2%; a excepción de algunas áreas que despliegan pendientes entre 1 y 2%.

Clima

El clima de esta zona es semiárido, frío o mesotérmico. Presenta deficiencia de agua en las cuatro estaciones, con una concentración térmica anormal para este clima de acuerdo a datos obtenidos en las estaciones climatológicas de Eucaliptus, Chuquiña y San José.

Precipitación. El 80,1% de la precipitación local se concentra en períodos cortos, de diciembre a marzo; reducidas en abril, mayo, octubre y parte de noviembre, y casi nulas en el resto de los meses del año. La precipitación promedio es de 377 mm/año, para el período 1974 - 1994, la deficiencia de agua ocurre durante 8 a 9 meses del año, durante los meses de abril a noviembre (SENAMHI, 1995).

Temperatura. La temperatura media anual es de 7,6 a 10,17°C., los meses de ascenso de temperatura son noviembre y diciembre, la temperatura extrema llega a 25°C. Los meses con descensos abruptos de temperatura son mayo, junio y julio, llegando a una mínima extrema de -17 °C inclusive de -26 °C bajo cero, medida en la Estación climatológica de San José.

Evaporación. La evaporación media anual es de 1585 mm para un registro de 20 años (1974-1994). Generalmente la evaporación supera la precipitación del año.

Humedad relativa. La humedad relativa anual fue de 45%, correspondiente a un registro de 20 años (1974-1994). Las máximas medias anuales de humedad relativa corresponden a los meses de enero y febrero presentando valores de 60 y 62%, respectivamente, y la mínima media anual de 40% en los meses de junio y julio

Velocidad del viento. Los vientos alisios predominantes provienen de NW, cuyo rumbo varía desde el norte hasta el sudoeste. Los vientos fuertes se

presentan en los meses de julio y agosto; la velocidad media del viento es de 3,2 m/s aproximadamente, a una altura de dos metros sobre el suelo (SENAMHI, 1995).

Radiación. La radiación solar presenta un promedio anual de 226,7 cal/cm²/día a una altura de 1,5 metros del suelo (SENAMHI, 1995).

Insolación. La zona de estudio manifiesta una insolación promedio anual de 7,5 h; el máximo promedio corresponde al mes de julio con 8,8 h y la mínima de 5,4 h que caracteriza al mes de enero, según registros climatológicos de 15 años (SENAMHI, 1995).

Heladas. Las heladas ocurren durante los meses de mayo, junio, julio y agosto, durante un lapso que varía de 124 a 140 días. Problema inevitable durante el ciclo vegetativo para la región, provoca muchas veces pérdidas totales de la producción agrícola.

Nevadas. La presencia de nevadas en los meses de julio, agosto y septiembre, facilita la preparación de los suelos, previo a la siembra.

Clasificación climática. La caracterización climática, tomando como base el sistema de clasificación de Holdridge en ésta región altiplánica, corresponde a la zona de vida Estepa montano, con biotemperatura entre 11 a 18°C y un clima frío, semiárido, con estaciones secas de invierno y parte de primavera.

Balance hídrico. De acuerdo a la información climatológica, el balance hídrico de la zona identifica un déficit hídrico durante todo el año, debido a que la evapotranspiración potencial (ETP) es generalmente superior a la precipitación.

Vegetación natural

La vegetación natural presente se caracteriza por ser del tipo xerofítico, con muy pequeñas variaciones microclimáticas. Varía desde estepa formada por gramíneas y leguminosas, hasta matorral de arbustos, por tanto, la vegetación existente es baja con ausencia de árboles. Se distinguen dos paisajes: planicie inundable con arbustos y otra con pastizales, entre las especies más importantes cabe destacar:

Arbustos. *Lepidophyllum quadrangulare*, *Bacharis microphylla*, *Margiricarpus cristatus*.

Pastos. *Brunus unioides*, *Nasella sp.*, *Boutelona simplex*, *Etipa pungens*, *Azorilla diapensoides*, *Azorilla bilola*.

Entre las variedades de importancia para uso y consumo se distinguen las siguientes: alfalfa, cebada, festuca, avena, coliflor, cebolla, lechuga, papa y quinua, así como especies forrajeras de garbanzo, chillihua, llapa, q'ora, y otros pastos nativos.

Fauna

Las especies más importantes desarrolladas en la zona son: ovinos, vacunos, cerdos, gallina y conejos, los dos primeros tienen alto valor comercial, mientras que los otros son utilizados sólo para el sustento familiar.

Recursos hidrológicos

Hidrología superficial. El río Desaguadero representa la fuente principal para el sistema de riego cantonal y comunal.

El río Desaguadero nace en el extremo sur del Lago Titicaca, denominado Wiñaymarca, el cual es afluente principal. Este río básicamente es un vaso comunicante entre los lagos Titicaca y Poopó, con una pendiente mínima de 0,032%. El caudal del río Desaguadero varía entre 6 - 20 m³/s, según la época de estiaje o lluvia. El curso del río generalmente se orienta de NO - SE, desde el Lago Titicaca hasta el Lago Poopó, aproximadamente 345 km.

El origen de las sales del río Desaguadero está en las fuentes del río Mauri, y en la intemperización de las rocas; el río al atravesar sectores muy salinos arrastra consigo cantidades considerables de sales.

La calidad del agua se identificó según USDA (1954), como aguas de alta salinidad y contenido moderado de sodio, factibles para riego en suelos con buena drenabilidad natural.

Riego en el Cantón Unupata

En la población de Unupata Centro se han establecido sistemas de riego no planificados, por iniciativa de los propios agricultores, donde la construcción de canales, distribución, área de riego, mantenimiento y operación son realizados sin conocimiento técnico, que se evidencia en el uso y manejo inadecuado de las aguas y las tierras.

Uso actual

En la actualidad la agricultura practicada representa sólo el 45%, y la ganadería alrededor del 55%, ambas actividades constituyen las principales fuentes de ingresos de los habitantes de Unupata Centro.

Los cultivos tradicionales de la zona son la papa, cebada, quinua y alfalfa. Estos son sembrados en surco y en superficies restringidas bajo riego por la escasez de agua durante la siembra (agosto - octubre). El ciclo vegetativo de la papa, cebada y quinua es de cinco meses, mientras que la alfalfa, como cultivo semi-perenne, suele entrar en estado de latencia durante los meses de marzo a septiembre, es decir, parte de otoño y todo el invierno.

La escasa agricultura que se desarrolla en el área es en secano, siendo muy pequeñas las superficies que disponen de riego por medio de pequeñas tomas libre sobre el río Desaguadero. Por consiguiente, existen grandes superficies no cultivadas, donde no ha intervenido la mano del hombre; de igual forma, existe un gran porcentaje de tierras en barbecho o abandonadas debido a las siguientes causas: ausencia de mano de obra, falta de recursos económicos, suelos salinos, deficiencia en fertilidad y factores climáticos adversos.

La siembra de los cultivos mencionados se realizan de acuerdo al grado de salinidad que presentan los suelos. En Unupata Centro, afectados por sales predominan los cultivos de quinua (*Chenopodium quinoa* sp), cebada (*Hordeum vulgare*) y haba (*Vicia faba*), papa (*Solanum andigenum* sp.), y forrajeras. En general, los rendimientos de los cultivos en estas tierras son bajos, debido a factores edafoclimáticos adversos y métodos tradicionales de producción.

Características de salinidad de los suelos del Cantón Unupata

Los suelos de Unupata corresponden al Orden de los ARIDISOL de la taxonomía de suelos Norteamericana: son suelos de pH alcalino, con capacidad de intercambio catiónico (CIC) mediana a alta, saturación de bases alta, con predominio de calcio, conductividad eléctrica mayor a 4 dS/m, y el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) menor de 15 % (Quisbert, 1980).

Los suelos del cantón Unupata se clasifican como suelos salinos, que presentan las siguientes características físicas: suelos profundos, imperfectamente drenados, con textura superficial de franco arcillo-limoso a arcillo limoso, estructura blocosa, prismática fuerte gruesa y de coloración pardo rojizo en todo el perfil (Quisbert, 1980).

Ledezma (1995) señala que los suelos de Unupata Centro bajo condiciones de riego, presentan las siguientes características químicas: a) la concentración salina en los dos primeros horizontes aumentó con tasas de 4,44 y 3,28 dS/m, es decir, de 1,52 a 5,96 dS/m en el primero; de 3,79 a 7,07 en el segundo, y el tercer horizonte se mantiene casi constante, b) la suma de bases intercambiables se incrementó a lo largo del perfil y principalmente en el horizonte superficial, posiblemente por el aumento de materia orgánica e inorgánica y c) el pH en el horizonte superficial es ligeramente alcalino, aunque disminuyendo en los horizontes inferiores. Estos considerados para los años 1974 y 1988.

Las propiedades químicas y físicas de los suelos señaladas en las Tablas 1, 2 y 3, corresponden a un suelo salino tipo bajo riego del Cantón de Unupata, correspondiente a los años 1974 y 1988. Los datos fueron tomados de una parcela específica, citados por Quisbert (1980) y Ledezma (1995), respectivamente.

Tabla 1. Características químicas de los suelos salinos bajo riego (Cantón Unupata)

PROFUNDIDAD (cm)	EXTRACTO DE SUELO (cmol/kg), PERIODO 1974-1988						
	AÑO	Na+	K+	Ca++	Mg++	SUMA DE CATIONES	COND.ELECTRICA dS/m
00-23	1974	3,78	0,78	3,46	1,99	10,01	1,52
00-24	1988	8,37	0,98	7,24	3,08	19,67	5,96
23-38	1974	3,84	0,96	5,77	5,25	15,82	3,79
24-48	1988	8,68	1,87	14,48	5,99	31,02	7,07
38-48	1974	2,30	0,98	10,86	3,84	17,98	4,38
48-90	1988	5,41	1,06	13,48	4,13	24,08	4,37

Fuente: Quisbert ,1980 y Ledezma, 1995.

Tabla 2. Aniones solubles y RAS de lo suelos salinos bajo riego (Cantón Unupata)

PROFUNDIDAD cm	AÑO	VARIACIÓN DE ANIONES EN EL SUELO (me/l), PERIODO 1974-1988						
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	BORO mg/Kg	SUMA DE ANIONES	RAS
00-23	1974	3,40	6,35	1,63		2,93	11,38	2,29
00-24	1988	8,86	10,73	1,20		7,07	20,79	3,68
23-38	1974	4,02	11,46	0,60		2,44	16,08	1,64
24-48	1988	6,88	23,65	1,47		19,31	32,00	2,71
38-48	1974	3,60	13,30	2,13		4,06	18,03	0,85
48-90	1988	4,34	18,58	2,22		7,34	25,14	1,82

Fuente: Quisbert ,1980 y Ledezma, 1995.

Tabla 3. Textura de los suelos salinos del Cantón Unupata (periodo 1974-1988)

PROFUNDIDAD cm	AÑO	ARENA %	LIMO %	ARCILLA %	CLASE TEXTURAL
00-23	1974	8	28	64	FA
00-24	1988	7	29	64	AL
23-38	1974	2	34	64	A
24-48	1988	2	39	59	A-AL
38-48	1974	3	56	41	AL-FAL
38-90	1988	2	56	42	AL-FAL

Fuente: Quisbert ,1980 y Ledezma, 1995.

Origen de las sales solubles en Unupata Centro

Acerca del origen de las sales en los suelos de Unupata, Quisbert (1980) señala que los mismos son diversos. Entre las principales causas se mencionan las debidas al origen geológico del suelo, del cual provienen los minerales primarios de la corteza terrestre. Además, de las bolsas de agua marina ocasionadas por la placa de Nazca.

Ledezma (1995) señala que los efectos climáticos e hidrológicos pueden contribuir a la salinización de los suelos, por ejemplo cuando la evaporación es mayor que la precipitación pluvial y/o por el aporte de las sales solubles del agua superficial y subterránea.

Efecto de las sales sobre los suelos y cultivos en Unupata Centro

Expresa Quisbert (1980) que el exceso de sales en los suelos de la zona de estudio provocan el desplazamiento de los cationes de calcio y magnesio intercambiable, que se precipitan como sulfatos y carbonatos de calcio y magnesio. Si la concentración de sales es menor y predomina el sodio en el complejo adsorbente del suelo, esto provoca deterioro de la estructura de aquellos suelos que tienen cantidades significativas de arcilla; a su vez, el sodio provoca la peptización de los coloides, con la destrucción de una parte del coloide a cuenta de la disolución de humatos de sodio; luego decrece la permeabilidad y la aireación.

Ledezma (1995) indica que la degradación de los suelos en la zona puede ser debido al exceso de sales, ocasionando el anormal crecimiento de las plantas por el incremento de la presión osmótica de la solución del suelo y la disminución de la permeabilidad del mismo.

Las altas concentraciones de sales en los suelos de Unupata Centro pueden disminuir el crecimiento de las plantas por el efecto osmótico, desbalance de iones nutrientes, efecto tóxico y excesiva acumulación, ya sean como iones positivos sodio y/o negativos cloro, sulfato, boro y otros (Ledezma, 1995).

Según Quisbert (1980) las plantas expuestas a sales disminuyen su rendimiento, cuali y cuantitativamente, excepto en aquellas plantas halófitas que, adaptadas a la presencia de sales, tienen un crecimiento normal de acuerdo a su proceso evolutivo, y características morfológicas y fisiológicas de las mismas.

Clasificación por su salinidad de los suelos y aguas de Unupata Centro

Los únicos antecedentes que se tienen acerca de estudios de la salinidad de los suelos de Unupata Centro son los realizados por Ledezma (1995) y Quisbert (1980). Las características físicas y químicas del área de estudio para los años 1974 y 1988, se describen en las Tablas 4, 5 y 6. En las mismas, la conductividad eléctrica de los suelos en el extracto de saturación corresponden a la capa arable para los años señalados, es decir, a una profundidad de 23 cm (perfil tipo del suelo en el Apéndice 2).

Tabla 4. Características químicas de los suelos salinos bajo riego de Unupata Centro

PROFUNDIDAD (cm)	EXTRACTO DE SUELO (cmol/L) PERIODO 1974-1988							
	AÑO	Na+	K+	Ca++	Mg++	SUMA DE CATIONES	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA dS/m	PSI %
00-23	1974	10,87	0,36	2,96	1,79	15,98	1,56	8,38
00-24	1988	11,15	1,11	15,19	5,91	33,36	4,77	3,66
23-38	1974	12,83	0,30	3,34	1,58	18,05	1,92	9,75
24-37	1988	43,01	1,33	22,50	9,81	76,65	9,37	12,68
38-48	1974	18,93	0,80	7,85	5,34	32,92	4,92	8,77
37-50	1988	45,46	1,20	15,00	8,82	70,48	8,02	15,38

Fuente: Ledezma, 1995.

Tabla 5. Aniones solubles y relación de adsorción de sodio correspondiente a los suelos salinos bajo riego - Unupata Centro

PROFUN DIDAD (cm)	AÑO	COMPORTAMIENTO DE ANIONES EN EL SUELO (cmol/L), PERIODO 1974-1988						
		Cl	SO ₄ ²⁻	HCO ₃	CO ₃ ²⁻	BORO mg/Kg	SUMA DE ANIONES	RAS
00-23	1974	4,34	8,09	2,09		2,93	16,09	7,05
00-24	1988	12,13	19,85	1,28		7,07	33,26	3,43
23-38	1974	7,59	8,97	1,40		2,64	17,96	8,18
24-37	1988	32,36	43,64	1,67		19,31	77,66	10,70
38-48	1974	9,30	22,39	1,40		4,06	33,09	7,37
37-50	1988	20,60	48,18	2,31		7,34	71,09	13,17

Fuente: Ledezma, 1995.

**Tabla 6. Aspectos texturales de los suelos salinos de Unupata Centro
(período 1974-1988)**

PROFUNDIDAD (cm)	AÑO	ARENA %	LIMO %	ARCILLA %	CLASE TEXTURAL
00-23	1974	2	31	67	A
00-24	1988	3	33	64	AL
23-38	1974	3	26	71	A
24-37	1988	1	27	72	A
38-48	1974	00	24	76	A
37-50	1988	00	27	73	A

Fuente: Ledezma, 1995

De acuerdo a las pautas del USDA (1954), citado por Ledezma (1995), los suelos de la zona en estudio se clasifican como salinos. Además Ledezma, basándose en USDA (1954), clasificó las aguas de riego de la toma de Unupata Centro como de tipo C3 - S2 (agua altamente salina y de contenido medio en sodio).

Si el agua es altamente salina (C3) no puede usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aun con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales de control de la salinidad, debiendo, por lo tanto, seleccionarse únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a las sales (USDA, 1954).

Cuando el agua es media en sodio (S2) en suelos de textura fina el sodio representa un peligro considerable, más aún si poseen una alta capacidad de intercambio de cationes, en especial bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso. Estas aguas sólo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad (USDA, 1954).

Características físicas y químicas de los suelos en Unupata Centro

Los suelos de la zona en estudio presentan las siguientes características físicas: suelos profundos, imperfectamente drenados, con textura superficial de arcilloso a arcilloso-limoso, estructura blocosa, prismática, fuerte gruesa, coloración pardo rojizo en todo el perfil (Quisbert, 1980).

Características físicas de los suelos

La textura en la capa arable de 0 - 23 cm de espesor, varía de arcillosa a limo-arcillosa. El grado de variación en la textura se considera no significativo, donde la arcilla es aproximadamente de 64 a 67%, el limo de 31 a 33 % y el contenido de arena menos de 3 % (Quisbert, 1980).

La densidad aparente del área en el estrato de 0 a 23 cm fue de 1,30 Mg/m³, donde el suelo fue sometido a las mismas labores mecanizadas (Quisbert, 1980).

La humedad retenida en la capa arable de Unupata Centro a capacidad de campo CC, y el punto de marchitamiento permanente PMP se determinó en ollas de presión a tensiones de 1/3 bares y 15 bares respectivamente. Los valores medios del área de estudio expresados en porcentaje volumétrico son los siguientes (Quisbert, 1980 y Ledezma, 1995):

- Capacidad de campo, CC: 21%
- Punto de marchitez permanente, PMP: 8.2%
- Punto de saturación del suelo: 50%

Características químicas de los suelos

Quisbert (1980) señala que los suelos de Unupata Centro hasta una profundidad de 23 cm presentan las siguientes características: pH alcalino, capacidad de intercambio catiónico (CIC) mediana a alta, saturación de bases alta, con predominio de calcio, conductividad eléctrica mayor a 4 dS/m, porcentaje de sodio Intercambiable (PSI) menos de 15%. Algunas de las características químicas más relevantes son las siguientes:

- Los suelos para el año 1974 se clasificaron como no salinos con una conductividad eléctrica de 1,56 dS/m, mientras que para el año 1988, se clasificaron como suelos salinos (4,77dS/m).
- El contenido de la materia orgánica fue de moderado a bajo, debido a las condiciones semiáridas del lugar; el fósforo disponible alto; los cationes intercambiables de potasio, sodio, calcio y magnesio, desde moderados hasta muy altos; el contenido de nitrógeno presente en el

suelo en forma de nitratos y nitritos bajo; el pH del suelo desde moderadamente alcalino a fuertemente alcalino.

- El suelo se clasifica actualmente como salino, según la clasificación de USDA (1954) y SSSA (1977). Estos suelos son representados por el color rojo en imagen LANDSAT, 1987. Apéndice 9.

La variación de los cationes, aniones y las propiedades físicas de los suelos se detallan en las Tablas 4, 5 y 6; correspondiente a los años 1974 y 1988. El perfil tipo de Unupata Centro se presenta en el Apéndice 2.

Características socioeconómicas de la zona de estudio

Según INE (1992) la problemática de la zona de estudio se pueden dividir en los siguientes aspectos: económica, social, cultural, política, físico-natural y ambiental; de hecho los problemas de mayor peso son los relativos a los temas económicos y sociales, que se presentan brevemente a continuación.

Problemática económica

La situación actual de Unupata Centro, después del Ayllu y Reforma Agraria, confronta problemas de índole geográfico y ambiental, ocasionando un desarrollo muy lento del Cantón. Los aspectos económicos identificados en la zona de estudio, se caracterizan así:

Baja productividad agrícola, ausencia de forrajeras y praderas mejoradas, falta de semillas mejoradas adaptables a la zona, ausencia de forestación, incidencia de plagas y enfermedades en plantas y animales, falta de tierras aptas para uso agrícola, tierras salinas, altos costos de producción, preparación de tierras no adecuadas, rotación de cultivos, ausencia de prácticas de conservación de suelos, deficiente organización productiva, falta de comunicación, ausencia de liderazgo comunal.

Uno de los factores importantes de la producción son las tierras, que resultan insuficientes para la actividad agrícola debido a la reducida superficie disponible para estos fines y a la salinidad de los suelos.

Entre otros problemas sociales, culturales y político organizacionales más relevantes se encuentra la salud y el saneamiento básico, la alimentación, la ausencia de letrinas, la ausencia completa de agua potable, la insuficiente infraestructura escolar; la pérdida de costumbres, migraciones y falta de organización, ONGs no delineadas, ausencia de autoridades, injerencia de partidos políticos, etc.

Los problemas físico - naturales datan de siglos atrás, limitando especialmente la producción agrícola. Entre los factores ambientales más importantes se destacan los siguientes: heladas, sequías, vientos, granizadas, rayos, tormentas, fríos y otros no controlables, como son las aguas saladas, los terrenos salitrosos y terrenos degradados.

Aspectos demográficos

La información obtenida del Instituto Nacional de Estadística (INE) señala que la población total de la provincia Gualberto Villarroel es de 11.685 habitantes, de los cuales 5.952 (50,94%) son mujeres y 5.733 (49,06%) son hombres. El Cantón Unupata, cuenta con 850 habitantes, de ellos 434 (51%) son mujeres y 416 (49%) hombres.

Migración. Es uno de los problemas de gravedad, pues, al no satisfacer las necesidades básicas, los habitantes locales emigran a centros de mayor actividad económica; situación que repercute en la oferta reducida de mano de obra local. Esto que viene acrecentándose por la sequía, salinidad de los suelos y otros factores ambientales. La migración principalmente se dirige a las ciudades de Cochabamba, Santa Cruz y, por la cercanía, a la República de Chile.

Aspectos de las actividades técnico-económicas

Estructura y producción agrícola. A continuación se muestran la tenencia de la tierra, el uso de la tierra y la propiedad familiar.

Tenencia de tierra. En los años setenta, en la provincia Gualberto Villarroel, se procedió a beneficiar a 1.378 familias por medio de la adjudicación de tierras constituyendo aproximadamente el 43% del altiplano boliviano; la superficie promedio de tierra adjudicada fue de 29 ha por familia, lo que es inferior al promedio del Altiplano Central de 41 ha.

En la actualidad, se advierten problemas en cuanto a la propiedad de tierras en la provincia; se suma a esto la disminución de la superficie de las parcelas familiares, debido al efecto hereditario. Actualmente la posesión de las tierras en un 85% es de carácter hereditario y sólo el 12,4 % se adjudicó a través de la Reforma Agraria. Se estima que sólo el 17,2% de los agricultores posee título legal y el resto no menciona o desconoce poseerlo.

Uso de la tierra. Según el Taller Comunal realizado en el Cantón Unupata, el 40% de los suelos son aptos para la agricultura, el 25% para pastoreo y el restante 35% no son aptos para el uso agropecuario. Se advierte la ausencia de áreas bajo riego, pues sólo de 4 a 5 ha por familia tienen derecho a riego. Existen muy pocas áreas en barbecho, y extensas áreas no aptas para el cultivo.

Propiedad familiar. Durante la Reforma Agraria, no se hizo una distribución equitativa y planificada, en el transcurso del tiempo se fue llegando a un minifundio cada vez más preocupante. Si anteriormente la tenencia de la tierra fue alrededor de 30 ha por familia, en la actualidad esta superficie se ha reducido por el proceso hereditario y de sucesión, Tabla 7.

Tabla 7. Posesión de tierras por familia del Cantón Unupata

POSESION DE TIERRAS (ha/flia)	INDIVIDUOS	PORCENTAJE (%)
< a 5.99	172	22.3
6 a 11.99	225	29.2
12 a 17.99	136	17.7
19 adelante	237	30.8
Total	770	100

Fuente: Yunta (1996)

La Tabla 7 señala que el 30,8% de las familias poseen terrenos con superficies mayores de 19 ha; no obstante, se observa un porcentaje importante de agricultores que poseen superficies menores a 6 ha. Lo expuesto demuestra la heterogeneidad en la distribución de la tierra en la población estudiada, de acuerdo con la superficie en propiedad. La tenencia de tierra es mayor a 15 ha por familia, pero la mayoría está afectada por la salinidad.

Características de la producción agrícola. La producción agrícola en el Cantón y el área de estudio es de autoconsumo, aunque parte de la producción se destina a la comercialización, realizada en ferias y mercados. Entre los productos que generalmente se comercializan está la papa, quinua, cebada, chuño (derivado de la papa) y otros cultivos secundarios (haba *Vicia faba*, oca *Oxalis tuberosum* y papaliza *Ullucus tuberosum*), que generalmente suelen ser para el sustento familiar.

El ciclo de los cultivos generalmente se inicia en el mes de septiembre y finaliza en febrero y/o marzo, ello para aprovechar las precipitaciones estacionarios.

Rendimiento de los cultivos. En la Tabla 8 se puede observar los rendimientos de los cultivos papa, quinua, cebada y alfalfa en condiciones de riego y en seco. Los rendimientos en condiciones de riego como era de esperar son superiores a los obtenidos en condiciones de seco para el período histórico en cuestión 15 años.

Tabla 8. Rendimiento promedio de cultivos papa, cebada, quinua y alfalfa en suelos ensalitrados en condiciones de secano y riego (15 años)

RENDIMIENTO DE CULTIVOS ANDINOS (Mg/ha)								
SUELOS SALINOS CON RIEGO PERIODO 1974 - 1988					SUELOS SALINOS EN SECANO PERIODO 1974 - 1988			
AÑO	PAPA	CEBADA	QUINUA	ALFALFA	PAPA	CEBADA	QUINUA	ALFALFA
1974	4.80	1.98	1.15	6.00	3.28	1.60	1.05	4.75
1975	4.95	1.85	1.35		4.17	1.40	1.15	
1976	5.25	2.00	1.00		3.48	1.58	1.02	
1977	4.90	2.40	1.40		3.84	1.46	0.93	
1978	5.20	2.00	1.07	5.8	3.66	1.48	0.87	4.55
1979	5.10	1.95	1.13		3.95	1.37	0.93	
1980	5.10	1.96	0.86		4.01	1.58	0.97	
1981	4.90	2.10	0.90	6.56	4.05	1.72	0.89	5.31
1982	5.00	2.09	0.55		3.01	1.51	0.45	
1983	5.32	2.59	0.64		4.57	2.21	1.30	
1984	5.16	2.52	0.63	6.70	4.31	2.14	1.28	5.45
1985	4.64	2.16	0.58		3.18	1.78	0.48	
1986	4.91	2.47	0.60	5.75	3.49	2.09	0.91	4.50
1987	4.87	2.54	0.67		3.65	1.90	0.57	
1988	3.86	2.74	0.72	6.2	2.94	2.16	0.62	4.95

Fuente: SNAG, 1993 y Ledezma, 1995.

El rendimiento promedio actual de los cultivos papa, cebada, quinua y alfalfa en suelos salinos y bajo riego son de 4,95; 2,22; 0,90 y 6,20 Mg/ha, respectivamente; mientras que los rendimientos obtenidos de la siembra en secano son mucho menores a los anteriores, es decir, 3,71 ; 1,73 ; 0,90 y 4,92, respectivamente.

Costos de producción de los cultivos. Los datos fueron recabados del Taller Comunal realizado en julio de 1996, consultas hechas en las ferias próximas al área de estudio y SNAG (1996), Tabla 9.

Tabla 9. Costos de producción bajo riego de los cultivos: papa, cebada, quinua y alfalfa (periodo 1995-1996)

ITEM	COSTOS DE PRODUCCION (US\$/ha)			
	PAPA	CEBADA	QUINUA	ALFALFA
COSTO TOTAL	930	270	290	330

Cabe destacar que en el proceso de producción agrícola, es decir en la siembra, labores culturales y cosecha el agricultor de Unupata Centro no considera los costos de producción; por lo tanto, los gastos en que incurre para la tales fines no son estimados con antelación para el siguiente período agrícola.

La escasez de información disponible, limita el tener una visión más clara respecto a los cultivos introducidos en esta región. Sólo ha cobrado importancia la

introducción de la especie nativa, cauchi (*Suadea foliosa*), por la ausencia de pastos nativos palatables.

Origen del recurso económico para el productor agropecuario de Unupata. El ingreso económico familiar en el cantón se debe a la ganadería y la producción agrícola, Tabla 10.

Tabla 10. Fuente de ingreso familiar

ORIGEN DE INGRESOS	PORCENTAJE (%)	RUBROS IMPORTANTES
Agricultura	38,67	Papa, quinua, habas, cebada, alfalfa
Ganadería	55,00	Ovino y vacuno
Comercio	5,17	Venta de comida en ferias
Artesanía	1,16	Tejidos y cerámica

Otro ingreso adicional ocurre por efecto de emigraciones fugaces del agricultor durante los meses de mayo a septiembre, a los centros de mayor actividad económica; éstos ingresos le permiten al agricultor encarar las actividades agropecuarias.

Comercialización de productos agrícolas. La comercialización es un obstáculo de urgente solución, por la falta de viabilidad y otras, que tienen incidencia en la mejora de bienes y servicios, señalados a continuación: bajos precios de la producción, presencia de muchos intermediarios, comercialización desventajosa para el productor, mercado inaccesible para el agricultor y caminos no transitables.

CAPITULO IV

MATERIALES Y METODOS

Técnica de valoración económica y el modelo de producción salinidad

Técnica del cambio de productividad

El método se fundamenta en la economía del bienestar, empleando la función de utilidad social, el criterio y la mejora del óptimo de Pareto, la teoría del valor, y para el cálculo de los costos o beneficios de los bienes privados, el concepto de excedente compensatorio y excedente del consumidor (Gómez, 1994).

Diversos autores afirman que la técnica de cambio de productividad valora a precios de mercado, o a precios ajustados cuando existan distorsiones, aquellos cambios en las cantidades físicas de producción en actividades económicas relacionadas con la agricultura, con los bosques y otros, ocasionados por la salinización de los suelos y destrucción de los bosques, etc. Por tanto esta técnica permite estimar los beneficios y costos, dando lugar a la aplicación de la economía moderna del bienestar que permite asignar valores monetarios a los cambios en los niveles de designación de los bienes privados: agrícola, piscícola, forestal, y otros.

La base de la idea es la utilidad del bien, donde los beneficios del plan o programa deben proceder del cambio en el nivel de bienestar de los individuos que constituyen la sociedad (Anderson, 1989).

Características de la técnica de valoración

El Cambio de Productividad tiene dependencia de la información del mercado. Esta técnica de valoración directa considera las ganancias y/o degradaciones ambientales, por ejemplo, un suelo salino mejorado, mejores niveles de calidad del agua, etc., o inversamente, tratando de medir directamente su valor monetario. Esto se puede hacer basado en el mercado real o por medio de técnicas experimentales (Azqueta, 1995).

Significa que los cambios físicos en la producción son analizados y evaluados empleando precios de mercado para los insumos y bienes finales. La presencia de alteraciones en el mercado amerita emplear precios relacionados.

El propósito fundamental de la estimación, es la identificación clara y precisa de los costos y beneficios asociados a los recursos ambientales que se pretenden valorar. Por tanto, el método permite la valoración monetaria de los recursos naturales o considerados como insumos de la función de producción ya

sea agrícola, forestal, etc., asignando un precio que se refleja en las externalidades positivas o negativas por el cambio en el recurso agua, suelo y bosques; siendo apropiado para medir los valores de uso activo y de uso pasivo (Gómez, 1994).

En el caso de los beneficios, éstos incluyen aquellos derivados del uso del recurso, de los servicios que provee, de las funciones ecológicas. En cambio, los costos asociados a la conservación o recuperación de un área afectada por un problema ambiental, originan los costos directos, indirectos y de oportunidad (Banco Mundial, 1991).

El caso más común en la agricultura, es la contaminación del agua que puede afectar a la producción de agua potable y para riego, aumentando la degradación de los suelos con efectos directos en la disminución de la producción de los cultivos, por tanto, reduce el valor de los cultivos sembrados (Pearce, 1995).

Los cambios de productividad también pueden ser internos del proyecto, pero en tal caso, no es necesario obtener una valoración separada de los efectos ambientales externos. Indudablemente, la implementación de un proyecto de riego como efecto ambiental interno implica el constante aumento de la salinidad del suelo y, como consecuencia de ello, la constante reducción del valor de los cultivos. Ahora bien, cuando el efecto ambiental es interno, las pérdidas de bienestar debidas a la mayor salinidad pueden reflejarse en la trayectoria decreciente de los ingresos obtenidos al cosechar, según Banco Mundial (1991), citado por Pérez (1996).

Las ventajas de la técnica del Cambio de Productividad son:

- Se pueden valorar efectos ambientales de proyectos de riego y drenaje, basados en los precios de mercado, por ejemplo: erosión, salinización, toxicidad, reducción de la infiltración, variación del crecimiento de los cultivos por efecto de fertilizantes, alteración de propiedades físicas del suelo, variación de fertilización del suelo y anegamiento, todos ellos directamente. Mientras que los indirectos a evaluarse serían la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, disminución de la eficiencia de riego del proyecto y salud pública.
- Valora bienes que sufran cambios en la producción de algún producto, y estén disponibles para el uso directo,
- La calidad ambiental puede ser evaluada como un factor de producción, es decir, todo cambio ambiental que conduce a cambios en la productividad, en los costos y precios de producción, lo cual es medido y observado.

- Estima los costos y beneficios de efectos ambientales dosis-respuesta, es decir, cómo se ve afectado un determinado receptor (un cultivo, unos materiales, en el suelo, etc.). Estas funciones de dosis-respuesta, están basados en datos analíticos de la ciencia básica con ayuda de la inferencia estadística que tienen una trayectoria en el campo de la problemática ambiental.
- Basados en datos analíticos, provee la información necesaria para calcular los beneficios sociales e impactos por los efectos producidos en el ambiente.

Descripción del modelo PROSAL

El modelo PROSAL, tal como es aplicado en el presente estudio, se utiliza para determinar la evolución de la salinidad de los suelos y la estimación de rendimientos de los cultivos en el tiempo, en una determinada localidad, específicamente en Unupata Centro, donde ocurre afectación de suelos y aguas por exceso de sales.

Según Pérez (1993), los modelos de Producción - Salinidad son expresiones matemáticas que relacionan los rendimientos de los cultivos con la salinidad del agua de riego, las condiciones de clima, y las características físicas y químicas de los suelos.

Los modelos pueden ser dinámicos o estacionales. Los modelos estacionales calculan la producción de los cultivos con base en la cantidad y calidad del agua total aplicada en el ciclo del cultivo, realizando dichos análisis en condiciones de equilibrio. Los modelos dinámicos estudian las variaciones de humedad y salinidad del suelo durante y después de las aplicaciones del riego, y de acuerdo a tales resultados determinan los rendimientos del cultivo. Entre los modelos dinámicos cabe mencionar los producidos por los siguientes autores: Bresler y Hanks (1969), Hanks *et al.* (1969), Nimah y Hanks (1973), Childs y Hanks (1975), Bresler *et al.* (1982), Bresler (1987), Van Genuchten (1987). Como ejemplo de los modelos estacionales se pueden mencionar el de Solomon (1985) y el de Letey *et al.* (1985), citados por Pérez (1995).

Pérez *et al.* (1993) mencionan que el PROSAL es un modelo estacional basado en el balance de sales y agua en el suelo durante un período de tiempo determinado, cuyo objetivo es estimar el nivel de productividad a obtener de un cultivo considerando el efecto de las sales en el agua y en el suelo, las características físicas del suelo, las características del cultivo, los datos climatológicos y la relación salinidad - productividad. El modelo ayuda a seleccionar los cultivos que potencialmente se pueden sembrar en áreas bajo condiciones de riego y de cierto grado de salinidad, con requerimientos climáticos específicos y de características químicas y físicas de suelo dadas.

El referido modelo está compuesto por un programa principal alimentado por varias subrutinas. El primero contiene las expresiones matemáticas para determinar la conductividad eléctrica final del suelo y el rendimiento esperado de un cultivo seleccionado; mientras que las subrutinas calculan la evapotranspiración y precipitación efectiva de la base de datos, los cuales pueden ser reales o bien de trazas cuando se trabaja a nivel de planificación.

Las expresiones matemáticas del programa principal constan de la ecuación de balance de agua, la ecuación de balance de sales, la determinación de la salinidad del suelo en extracto de saturación a partir de la evapotranspiración media y la determinación de los rendimientos relativos del cultivo a partir de la salinidad media del ciclo de cultivo. Tales expresiones propuestas por Mass y Hoffman (1977) se presentan seguidamente.

1. Ecuación de balance de agua

$$R + Pe + GW = ET + P + \Delta H \quad (4.1)$$

Donde:

R = lámina efectiva de riego aplicada

Pe = precipitación efectiva

GW = aporte capilar del agua

ET = evapotranspiración del cultivo estudiado

ΔH = incremento o disminución de la lámina de agua en el suelo de acuerdo al balance

P = agua percolada por debajo de la zona radical

2. Ecuación de balance de sales

$$R(CE_r) + Pe(CE_{Pe}) + GW(CE_{Gw}) = ET(CE_{\alpha}) + P(CE_p) + \Delta Z \quad (4.2)$$

Donde:

CE = conductividad eléctrica de cada parámetro, dS/m (R, Pe, Gw, Et y p)

ΔZ = incremento o disminución de la concentración salina multiplicada por la variación de la lámina de agua.

3. Suposiciones

La conductividad de la evapotranspiración del cultivo (CE_{et}) y la conductividad eléctrica de la precipitación efectiva (CE_{Pe}) son muy pequeñas y se asumen como cero.

No existe aporte capilar de agua, por tanto $G_w = 0$

$$-Z1 = CE_{cc} * H_{cc} \quad (4.3a)$$

Donde :

CE_{cc} = conductividad eléctrica a capacidad de campo (dS/m)

H_{cc} = lámina de agua del suelo a capacidad de campo.

$$-Z2 = CE_{cc} * h_{cc} \quad (4.3b)$$

Donde:

h_{cc} = % de humedad en volumen, a capacidad de campo

$$CE_p = f CE_{cc} + (1 - f) CE_r \quad (4.4)$$

CE_p = conductividad eléctrica del agua percolada por debajo de la zona radical

f = eficiencia de lavado, depende del tipo de suelo, especialmente de textura, en decimal (adimensional).

$$CE_{cc} * h_{cc} = CE_e * h_s \quad (4.5)$$

CE_e = conductividad eléctrica en extracto de saturación del suelo (dS/m)

h_s = % de humedad, en volumen, a saturación

De las ecuaciones 4.3a y 4.3b se tiene las siguientes relaciones:

$$\Delta Z = Z2 - Z1 \quad (4.6)$$

$$Z2 = CE_{cc} * H_{cc} \quad (4.7)$$

$$Z1 = CE_{1cc} * h_{cc} \quad (4.8)$$

La determinación de la conductividad eléctrica final en el extracto de saturación (CE_{ef} en dS/m) se muestra en la Ecuación 4.9.

$$CE_{ef} = \frac{h_{cc}}{h_s} \left[\frac{2 \left[CE_r \{ (ET - P_e) + (R + P_e - ET)f \} - (R + P_e - ET)f \left\{ \frac{h_s CE_{ei}}{h_{cc}} \right\} \right]}{2H_{cc} + (R + P_e - ET)f} \right] + \left(h_s \frac{CE_{ei}}{h_{cc}} \right) \dots \dots \dots (4.9)$$

Donde:

h_s = es el % de humedad en saturación, en volumen

CE_r = es la conductividad eléctrica del agua de riego, en dS/m

CE_{ei} = es la conductividad eléctrica inicial en el extracto de saturación, dS/m

CE_{ef} = es la conductividad eléctrica final en el extracto de saturación, en dS/m

R = es la lámina efectiva de riego aplicada, en mm.

f = es la eficiencia de lavado, depende del tipo de suelo, especialmente la textura expresadas en el coeficiente hidrodinámico en decimales.

H_{cc} = es la lámina de agua del suelo a capacidad de campo

h_{cc} = el % de humedad, en volumen, a capacidad de campo

P_e = es la precipitación efectiva, en mm.

ET = es la evapotranspiración máxima, Norero (1976), en mm.

4. Determinación del rendimiento del cultivo en cuestión

$$Y = 100 - b (CE_{em} - S_u) \text{ (Mass y Hoffman, 1977)} \quad (4.10)$$

$$CE_{em} = \frac{(CE_{ef} + CE_{ei})}{2} \quad (4.11)$$

Y = Disminución de la productividad

CE_{em} = conductividad eléctrica media en extracto de saturación (dS/m)

CEei = conductividad eléctrica inicial del suelo en extracto de saturación (dS/m)

Su = salinidad umbral del cultivo (dS/m)

b = disminución del rendimiento del cultivo por aumento unitario de salinidad

Datos de entrada

La información del cultivo, suelo, agua, riego y clima, requerida por el modelo para realizar la simulación es la siguiente:

Cultivo. Para la activación del modelo se requiere de información sobre la duración del ciclo del cultivo, en meses; los valores de densidad de enraizamiento, el índice de área foliar, la profundidad radical típica, la salinidad umbral del cultivo y la disminución del rendimiento del cultivo por aumento unitario de la salinidad. Para aquellos de ciclo corto no se considera el coeficiente de cultivo, Kc, mientras en los cultivos perennes los valores de éste coeficiente deben ser proporcionados.

Suelo. Otro de los datos que se requiere es la humedad retenida a capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), el punto de saturación, la conductividad eléctrica en el extracto de saturación inicial (CEei en dS/m), la densidad aparente (Da) y el coeficiente hidrodinámico.

Agua. Es necesario suministrar la conductividad eléctrica inicial en el extracto de saturación del suelo. En la calibración del modelo, y para efectos del estudio, se consideró el año 1974, y para la simulación se utilizaron datos posteriores al señalado, es decir, se usó el año 1988, ambos en promedio.

Riego. Requiere la información de la eficiencia de riego global del sistema, obtenidos de trabajos anteriores.

Clima. Es necesario contar con datos de precipitación y de evaporación del área bajo estudio, es decir históricos, ambos en registros mensuales. Inicialmente son usados para la calibración, luego, para la simulación, se utilizan trazas de precipitación y evaporación.

Para el efecto del estudio, conociendo los datos anteriormente señalados se prosiguió con la introducción de ellos en la secuencia siguiente:

Datos iniciales de la zona de estudio

Número de años a estudiar
Número de sectores de riego a procesar
Nombre del sector de riego
Densidad aparente del sector (Mg/m^3)
Humedad a capacidad de campo - gravimétrico (%)
Humedad a punto de marchitez permanente - gravimétrico (%)
Coeficiente hidrodinámico
Eficiencia de riego global para el sector
Número de cultivos considerados en el sector de riego

Datos característicos del cultivo

Nombre del cultivo
Coeficiente de desarrollo foliar del cultivo
Coeficiente de densidad de enraizamiento
Profundidad radicular típica (cm)
Periodo vegetativo del cultivo (meses)
Código para salida de demanda del cultivo
Código para leer los datos de precipitación
Código para leer los datos de evaporación en mm
Código para especificar la duración del cultivo

Valores para salinidad

Porcentaje de humedad del suelo a saturación en volumen (%)
Conductividad eléctrica del agua de riego (dS/m)
Conductividad eléctrica inicial en extracto de saturación (dS/m)
Eficiencia del lavado (%)
Factor para afectar la lamina de riego que se infiltra realmente
Pérdida de rendimiento por aumento unitario de salinidad (b) ($\%/ \text{dS/m}$)
Salinidad umbral para el cultivo (S_u) (dS/m)
Línea que define los años de cambio de patrón de cultivo
Número de hectáreas a regar para el año 1
% del área a sembrar para el sector 1
Mes de siembra para este cultivo en el sector 1
Conjuntamente, las trazas de precipitación y evaporación históricos o generados por el modelo

Análisis de la salida

Pérez (1993) señala que el archivo de salida del modelo PROSAL ofrece información, para períodos mensuales, donde los valores de lámina de agua a aplicar y evapotranspiración máxima (ETm) son expresados en mm, conductividad eléctrica en dS/m y el rendimiento en porcentaje.

Clima. El modelo estima la precipitación efectiva usando el método del USDA (1954).

Cultivo. La evapotranspiración máxima (ETm) la estima utilizando la ecuación propuesta por Norero (1976), con base en la evaporación de la tina y al coeficiente Kc, propuesto por el mismo autor.

Riego. La comparación de la ETm con la precipitación efectiva permite determinar la lámina de riego que debe ser repuesta. Del mismo modo, estima el umbral de agotamiento para cada mes del cultivo, por lo que se obtiene el número de riegos en los meses en los cuales debe aplicarse la lámina de riego. Al considerar la eficiencia de riego y la fracción de la lámina que realmente infiltra, estima las demandas brutas de riego en m³ y en L/ha. para cada mes, así como la lámina de riego total necesaria durante todo el ciclo, para cada mes del cultivo. Igualmente, calcula las demandas del cultivo afectadas por el factor de lavado de sales y por la eficiencia de riego, en mm y en miles de m³ / ha (Pérez, 1993).

Salinidad. Otra característica del modelo es la estimación, a partir de los valores ya calculados de ETm y de la información suministrada, la conductividad eléctrica final del suelo, en dS/m., por medio de la ecuación 4.9 (Pérez *et al.*, 1993).

Rendimientos. Los rendimientos del cultivo son estimados a partir de la salinidad media del ciclo, para la cual utiliza la fórmula de Hoffman *et al.* (1981), citado por Pérez (1993).

La disposición de los datos históricos y su procesamiento por medio el modelo permite generar datos de concentración salina final que se contrastan con el medido "*in situ*".

Descripción del generador de trazas

El generador de trazas es un modelo estocástico multivariado, auto regresivo, de memoria uno denominado HEESMM (Henaó, 1987). El modelo, para propósitos de este estudio, sirvió para obtener trazas de precipitación y evaporación a partir de datos históricos de los mismos. Estos a su vez fueron la base para el proceso de simulación.

El propósito del modelo auto regresivo multivariado, es seleccionar un conjunto de características climáticas, las mismas que fueron utilizadas para la generación de trazas en el tiempo y en el espacio. Este modelo preserva la media, desviación estándar, correlación, y la auto correlación que no cambian en el tiempo.

Para la generación de series sintéticas de carácter multivariado del modelo se tiene la siguiente ecuación:

$$X_t = A X_{t-1} + B \varepsilon_t \quad (4.12)$$

Es necesario determinar las matrices A y B las mismas que son calculadas a partir de las ecuaciones 4.13, 4.14 y 4.15:

$$X_n = K_n Z_n + V_n Y_{n-1} \quad (4.13)$$

$$Y_n = U_n Y_{n-1} + Z_n \quad (4.14)$$

Donde:

Z_n = es una variable aleatoria exponencial con parámetro $\lambda > 0$,

K_n = es una variable aleatoria con distribución Bernoulli, donde:

$$K_n = \{0 \text{ con probabilidad } \theta; \text{ con probabilidad } (1-\theta)\}$$

U_n y V_n son iid $U(0,1)$ con distribuciones de probabilidad

y Z_n , K_n , U_n y Y_n son mutuamente independientes y Y tiene el correlograma característico de un modelo Markoviano.

Se puede comenzar a generar datos de X con la ecuación 4.15 y añadiéndole la constante c :

$$X_t = c + K_t Z_t + V_t Y_{t-1} \quad (4.15)$$

La descripción por pasos es detallada en el "Manual de Simulación Estocástica de Recursos Hidráulicos", CIDIAT (1987).

Los datos de salida son las correspondientes trazas generadas dentro de un 95% de confiabilidad de la media y desviación estándar, las mismas que preserva el modelo, expresada de la siguiente manera:

Los intervalo de confianza para la media son:

$$(X - t_{1-\alpha/2} \sigma / (n)^{1/2}, X + t_{\alpha/2} \sigma / (n)^{1/2}) \quad (4.16)$$

α = nivel de confiabilidad

N = Número de años

$t_{1-\alpha/2}$ = cuantil de la distribución para $N-1$ y $(1-\alpha/2)$

Donde :

X = media de los datos históricos del mes en estudio

σ = desviación de los datos históricos del mes en estudio

α = nivel de confiabilidad.

N = número de años históricos

$t_{1-\alpha/2}$ = cuantil de la distribución para $N-1$ y $(1-\alpha/2)$

Se tiene un intervalo:

$$(\bar{X} - x_i \sigma, \bar{X} + x_{ii} \sigma) \quad (4.17)$$

Donde:

x_i y x_{ii} valores obtenidos por el modelo ANALHESS

El intervalo de confianza para la varianza es:

$$[(n-1) \sigma^2 / (X^2_{\alpha/2}, N-1), (n-1) \sigma^2 / (X^2_{1-\alpha/2}, n-1)] \quad (4.18)$$

Donde:

N = número de años históricos

$(X^2_{\alpha/2}, N-1)$ = cuantil de la distribución chi-cuadrado para $\alpha/2$ y $n-1$.

$(X^2_{1-\alpha/2}, n-1)$ = cuantil de la distribución chi cuadrado para $1-\alpha/2$ y $N-1$

En consecuencia para la varianza encontrada será:

$$[(N-1/ x_i) * \sigma^2, (N-1/ x_{ii}) * \sigma^2] \quad (4.19)$$

Donde:

x_i y x_{ij} fueron obtenidos con el modelo ANALHESS.

En cuanto a la validación de las trazas, Henao (1987) señala que *"para la selección definitiva de trazas de precipitación y evaporación, existe otra alternativa que es la de generar una sola traza y los análisis estadísticos de esta traza reproducirá la serie original o también se pueden generar trazas de longitud deseada de acuerdo al uso específico que se le dará a las trazas"*. Además, indica que la escogencia de una traza adolece de ciertos sesgos por ser ésta una proyección en el tiempo.

La aplicación del modelo HEESMM fue hecha para generar trazas por veinte años de precipitación y evaporación para los tipos de cultivos que actualmente se vienen desarrollando en el cantón Unupata y los correspondientes valores agroclimáticos que servirán para determinar el rendimiento potencial de los cultivos papa y alfalfa.

Secuencia metodológica

El trabajo se dividió en tres fases: recabación de la información referente al área de estudio y la información bibliográfica necesaria; calibración y simulación del modelo PROSAL y; determinación del efecto de la salinidad sobre el rendimiento de los cultivos estudiados, sus efectos sobre los beneficios netos y las consecuencias sobre el ingreso de los agricultores, todo ello para determinar una aproximación del cambio de productividad por efecto de las sales. La Figura 3 muestra el flujograma metodológico seguido en el trabajo.

Los diferentes aspectos considerados para la selección del área de estudio fueron: antigüedad del sistema de riego, grado de salinidad, homogeneidad del suelo, calidad del agua y cultura de riego de los agricultores. Escogida el área de Unupata Centro se recopiló información climatológica precipitación y evaporación, de suelos, cultivos, calidad de agua y socioeconomía de la misma.

Después se procedió a evaluar la evolución del problema de salinidad en los suelos, en el agua para el riego y su efecto sobre el rendimiento local, con base en estudios realizados anteriormente por las instituciones y personas que se nombran a continuación: Secretaría Nacional de Agricultura y Ganadería (SNAG, 1971, 1978 y 1993); Quisbert (1980); Sejas (1993), Centro de Promoción y Cooperación Campesina, "Yunta" (1996), Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI, 1995) y Ledezma (1995).

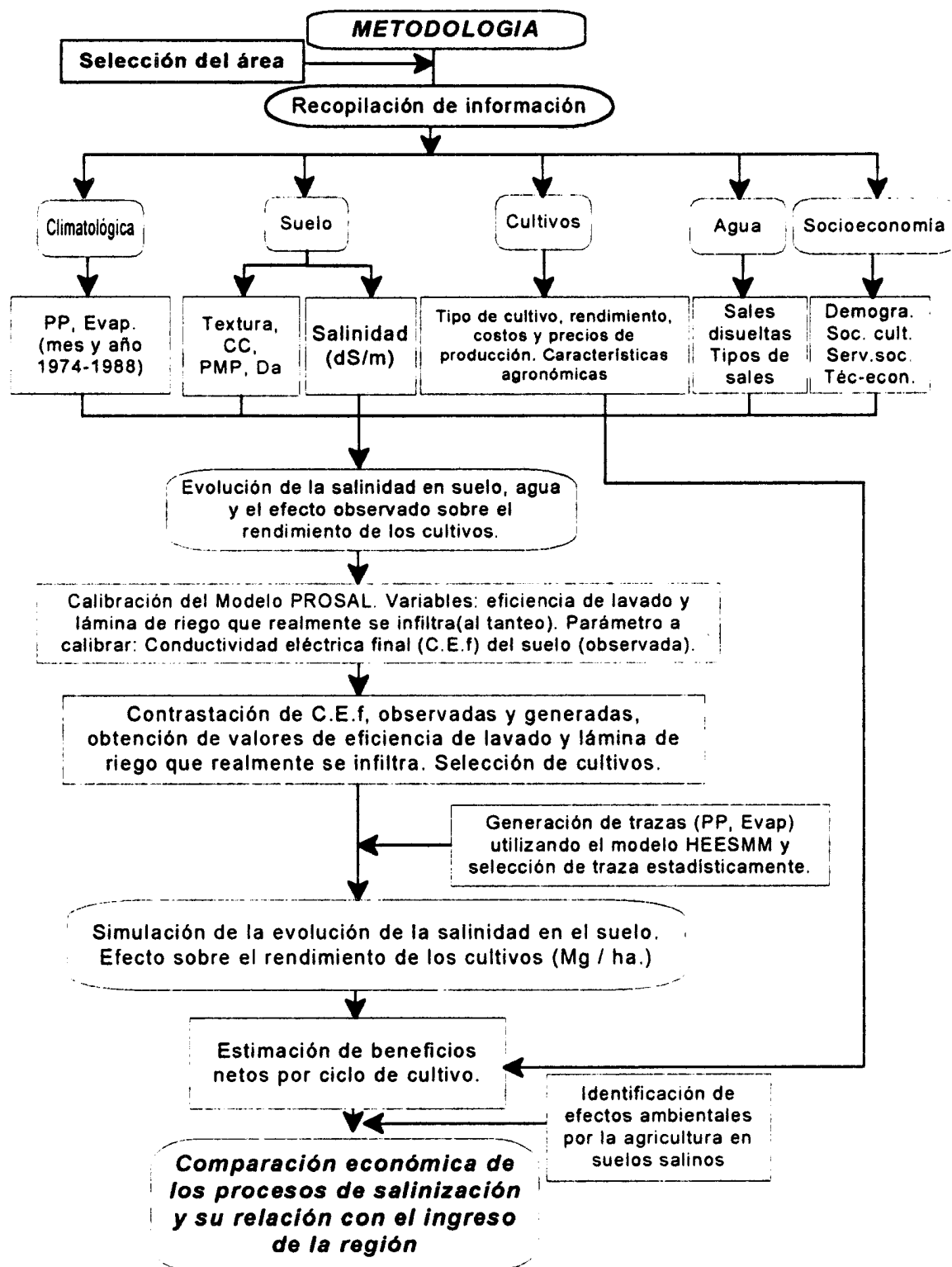


Figura 3: Flujograma metodológico seguido en el trabajo

La información de precipitación y evaporación para la zona de estudio fue tomada de la Estación Climatológica San José Alto, provincia Gualberto Villarroel. Dichos valores se utilizaron para la calibración y para la obtención de trazas de las mismas para aplicar el modelo de simulación. Los datos se presentan en el Apéndice 3.

Las características físicas, químicas y especialmente la concentración salina en el extracto de saturación en los suelos bajo condiciones de riego, fueron tomadas de las siguientes fuentes: SNAG, (1971 y 1993), Quisbert (1980), Sejas (1993) y Ledezma, (1995).

Se utilizaron valores promedios de los parámetros físicos, químicos e hidrofísicos de los tipos de suelo del área. Los datos respectivos se indican a continuación:

- Contenido de humedad a capacidad de campo (CC)
- Contenido de humedad a punto de marchitez permanente (PMP)
- Contenido de humedad a saturación (%)
- Densidad aparente (Da)
- Coeficiente hidrodinámico (s)
- Conductividad eléctrica en el extracto de saturación del suelo (CEe)

La información de cultivos se tomó de la Secretaría Nacional de Agricultura y Ganadería (SNAG, 1993), YUNTA (1996) y de Ledezma (1995). Los cultivos tradicionales considerados para los efectos del estudio fueron papa, cebada, quinua y alfalfa; de los cuales se consideraron las siguientes características:

Tipo de cultivo
Desarrollo foliar
Densidad de enraizamiento
Profundidad radical
Salinidad umbral
Pérdida de rendimiento por aumento unitario de salinidad
Período vegetativo

Los rendimientos, costos y el valor de la producción, se tomaron de diferentes fuentes; que se mencionan a continuación:

- Papa, cebada, y quinua: los costos de producción, incluyendo el valor del agua de riego, valor de la producción y los rendimientos por hectárea, se tomaron de datos proporcionados por la Secretaría Nacional de Agricultura y Ganadería (1993), y fueron complementados con la información proporcionada por los agricultores.

- **Alfalfa:** los rendimientos, los costos y el valor de producción se tomaron de los archivos de datos de Yunta (1996) y complementados con los informes de los agricultores (Taller comunal, 1996). El valor de producción de los otros cultivos fueron suministrados por los agricultores y corroborados en la feria de Lahuachaca en el mes de julio de 1996.

La información de la evolución de la salinidad de las aguas de riego, se obtuvo de trabajos realizados por Sejas (1993) y Ledezma (1995), en los meses de octubre y noviembre del ciclo vegetativo. Los parámetros considerados para tal propósito fueron:

La concentración de cationes y aniones
La conductividad eléctrica (dS/m)

Las aguas para riego se clasificaron por medio de los siguientes procedimientos: 1) USDA (1954) y 2) FAO (1987). La clasificación de USDA toma como datos fundamentales la conductividad eléctrica y la Relación Adsorción de Sodio (RAS) del agua de riego; mientras que la de FAO (1987) utiliza una serie de directrices técnicas para evaluar la calidad del agua, de modo de tratar de predecir las condiciones de suelo que puedan restringir su uso y evaluar la necesidad de emplear determinadas técnicas de manejo. Los factores a evaluar en las directrices son: tipo y concentración de sales, interacción agua-suelo-planta que puede ser causa del problema, efectos del agua por su uso a largo plazo y opciones de manejo disponibles.

Los datos socioeconómicos fueron tomados del Instituto Nacional de Estadística (1996), Yunta (1996) y Ledezma (1995) y consultas propias en el Cantón de Unupata haciendo énfasis en los siguientes aspectos:

- Demográficos y poblacionales (número de familias y migraciones).
- Socioculturales (educación, raza e idioma, ocupación de la población).
- Infraestructura y servicios sociales (servicios de salud, alimentación de las familias y vivienda).
- Actividad técnico-económica (tenencia de la tierra, uso de la tierra, propiedad familiar, actividades productivas y el ingreso del agricultor).

La evolución de la salinidad se estudió con base en el comportamiento de la conductividad eléctrica de la capa arable entre los años 1974 y 1988. Las mediciones respectivas se realizaron en el extracto de saturación del suelo, los resultados obtenidos permitieron determinar la evolución de la salinidad en los suelos y su efecto directo en el rendimiento de los cultivos.

Para los efectos de la evolución de la salinidad en los suelos se consideraron los siguientes aspectos:

- Concentración de sodio, potasio, magnesio y calcio
- Concentración de carbonatos, bicarbonatos, sulfatos y cloruros
- Conductividad eléctrica en el extracto de saturación del suelo
- Textura del suelo.

La información relacionada con los parámetros citados se obtuvo para los suelos afectados por la salinidad.

La evolución de la salinidad en el agua de riego se analizó utilizando los datos de conductividad eléctrica, medida en campo a nivel de la toma de Unupata Centro, según Ledezma (1995).

Para la calibración del modelo PROSAL, se contrastó la conductividad eléctrica del suelo, medida "in situ", con la información generada por el modelo para cada período, con base en la variación de las variables de eficiencia de lavado y de lámina de riego que realmente se infiltra. Este proceso realizado por tanteo; sirvió de información base para la selección de los cultivos a estudiarse; lo cual se realizó por apreciación visual de las curvas de la salinidad final observadas en campo y las generadas por el modelo.

Los datos utilizados para la calibración del modelo PROSAL fueron de los siguientes tipos: climatológicas, propiedades físicas y químicas de los suelos, agronómicos de los cultivos (papa, cebada, quinua y alfalfa) e hidrológicos (calidad de agua para riego). La conductividad eléctrica inicial para el año 1974, del agua de riego, se consideró constante durante el proceso de la calibración.

El procedimiento para la calibración del modelo PROSAL se resume en los siguientes pasos:

- Los cultivos considerados para este propósito: alfalfa, cebada, papa y quinua, sólo se tomaron como cultivos referencia, no importando el tipo y/o importancia de los mismos.
- El parámetro a calibrar fue la conductividad eléctrica del suelo observada "in situ".
- Las variables de calibración fueron:
 - Eficiencia de lavado
 - Lámina de riego que realmente se infiltra.
- Se procedió al tanteo hasta la consecución de valores por apreciación visual, donde la conductividad eléctrica final simulada por el modelo representara a la curva observada en campo.
- Luego se procedió a identificar, contrastar y seleccionar los correspondientes valores de eficiencia de lavado, lámina de riego que

realmente se infiltra, los cuales sirvieron de base para la selección de los cultivos.

- La selección de los cultivos se hizo con base en la mayor similitud de la conductividad eléctrica (C.E. f) medida en campo con la simulada por el modelo Producción-Salinidad, comparación realizada para los cuatro cultivos, individualmente; por consiguiente, este proceso dio como resultado los cultivos de papa y alfalfa.

El proceso de simulación se inició con la aplicación del modelo estocástico multivariado autorregresivo denominado HEESMM, disponible en el banco de programas del CIDIAT, el cual tuvo por finalidad generar trazas de precipitación y evaporación en el tiempo, con base en datos históricos de 15 años de la estación climatológica de San José Alto (SENAMHI, 1995), localizada en la provincia Gualberto Villarroel del departamento de La Paz.

Se obtuvo tres bloques de trazas y luego se procedió a la selección con el modelo ANALHEES (1987). La validez o rechazo de las trazas se determinó con base en un intervalo de confianza de 95%.

El proceso para la generación y selección de trazas comprendió lo siguiente:

- Base de datos históricos de precipitación y evaporación (15 años), para conocer la variación de los mismos en el tiempo.
- Proceso o activación con el modelo HEESMM,
- Generación de tres trazas de precipitación y evaporación para un período de 20 años, como su correspondiente selección con el ANALHEES (1987), con base en el análisis estadístico de la media y de la menor desviación estándar con los siguientes intervalos de confianza:

- Intervalo de confianza para la media con el programa ANALHEES (1987) ($\bar{X} - 0.4283 \sigma$, $\bar{X} + 0.4283 \sigma$)

- Intervalo de confianza para la varianza con el programa ANALHEES (1987), donde el valor fue $(14/24,889) * \sigma^2$, $(14/6,498) * \sigma^2$].

Donde :

$\bar{X}$ = es la media de los datos históricos del mes en estudio y

σ = es la desviación estándar de los datos históricos del mes en estudio.

Los datos de los cultivos de papa y alfalfa seleccionados para la calibración, las características físico-químicas de los suelos, salinidad del agua y las trazas de precipitación y evaporación generados con el modelo HEESMM, se introdujeron en el modelo PROSAL para simular la evolución de la salinidad en el suelo del área bajo estudio y los rendimientos. A su vez se consideró el factor de 1,20 de lámina de riego que realmente se infiltra considerando que el agua de riego es insuficiente en la zona de estudio y a efectos de contrastar con el obtenido en la calibración de 1,56 y 1,58 para los cultivos de papa y alfalfa, respectivamente. Con este propósito se consideró un periodo de 20 años, cuyas características de suelo, cultivo y agua se señalan en el siguiente capítulo.

Los pasos identificados a continuación resumen el resultado de la simulación de la conductividad eléctrica final del suelo y el rendimiento de los cultivos papa y alfalfa, a saber:

- Base de datos generales de suelos, clima (trazas de precipitación y evaporación), agua y características agronómicas de los cultivos de papa y alfalfa.
 - Las características del suelo fueron las siguientes: C.E.e inicial del suelo para el año 1988 (dS/m), contenido de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente (%), densidad aparente (g/cm^3), eficiencia de lavado (%) y coeficiente hidrodinámico del suelo en decimales, adimensional.
 - Las características del clima, precipitación y evaporación, generadas por el modelo HEESMM expresadas en mm/mes.
 - Las características de los cultivos de papa y alfalfa considerados fueron: coeficiente de desarrollo foliar (a), Coeficiente de densidad de enraizamiento (r), profundidad radical típica, Salinidad umbral (S_u), pérdida de rendimiento por aumento unitario de salinidad (b) y el periodo vegetativo (meses). Los parámetros a , b , r , y su se obtienen en el Apéndice 5.
 - La característica del agua de riego utilizada para la activación del modelo fue la conductividad eléctrica inicial de 1,52 dS/m del año 1988, que se supuso constante durante el proceso de simulación. El valor de la conductividad eléctrica es el promedio de muestras obtenidas de diferentes sitios.
- Los parámetros de riego empleados para la simulación fueron: la eficiencia de lavado y la lámina de riego que realmente se infiltra, ambos obtenidos en la calibración.

- La activación del modelo dio como resultado la evolución de la salinidad final de los suelos en dS/m y el rendimiento de papa y alfalfa expresados en porcentaje.

Para transformar los rendimientos obtenidos expresados en porcentaje con el modelo PROSAL, en rendimientos relativos (Mg/ha) se utilizó como rendimiento potencial de la papa 5,18 Mg/ha y alfalfa 8,50 Mg/ha. Dichos rendimientos se obtuvieron bajo condiciones normales, es decir, que estos serían los rendimientos del área si no hubiese efectos de las sales; estos valores se obtuvieron de consultas a técnicos y a ONG (Yunta, 1996).

Consecuentemente, para la evaluación económica de lo que significa el proceso de salinización de los suelos, se calcularon los beneficios netos por ciclo de cultivo y el cambio de la productividad que experimentan en el tiempo con base en los rendimientos, costos y valores de producción en condiciones normales de producción y simulación. Los beneficios calculados permitieron realizar el análisis económico y conocer así su incidencia social, positiva y negativa, en el agricultor. Esto es, el impacto social que puede tener la salinidad como efecto ambiental en el agricultor y en el proceso productivo actual.

Luego de obtenidos los beneficios netos de los agricultores de la zona en estudio, se analizó, en el Taller Comunal realizado en julio de 1996 que se llevó a cabo en el Cantón de Unupata, el ingreso familiar o cesta básica que necesitan los agricultores para el sustento de sus familias. Esto con el objeto de comparar y observar su comportamiento en el tiempo. Los resultados sirvieron de base para realizar un análisis del impacto social del problema.

Se procedió a la identificación de los efectos ambientales causados por la agricultura con y sin riego. Ello debido a que la salinidad contribuye al deterioro de la calidad ambiental por la realización de la actividad agrícola en las condiciones de insuficiencia de agua para el riego ya señaladas.

El contrastar los beneficios netos de la actividad agrícola con el ingreso familiar que debería tener un agricultor, permitió conocer el impacto social que acarrea la salinidad de los suelos en el sistema productivo existente y, por lo tanto, en la población que depende de esta actividad. Comparación, hecha a una tasa de descuento de 10%.

