

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**ANÁLISIS Y PROPUESTA DE MEJORA DE UN SISTEMA DE  
RIEGO EN LA COMUNIDAD DE SAN GERONIMO DE PUNAN,  
LIMA**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Industrial**, que presentan los bachilleres:

Luis Antony Gonzales Espinoza

Gabriel Rafael Hurtado Rojas

**ASESOR:** Dr. Jorge Vargas Florez

Lima, Noviembre del 2016

## Resumen

El objetivo de la investigación es analizar la prefactibilidad de la implementación de un sistema de riego por goteo abarcando la totalidad del área disponible para cultivos, localizada en la comunidad de San Gerónimo de Punan, distrito de Santa Eulalia en Lima Provincias. Se seleccionó el sector de agricultura debido a su relevancia en el país. Este representa el 8,3 % del Producto Bruto Interno y el 31,6 % de la población nacional está vinculada a esta actividad primaria (INEI, 2012). Sin embargo, el sistema de planificación agraria del gobierno (nacional, regional y local) aun no permite establecer políticas de consenso para el desarrollo en el largo plazo (PERU OPPORTUNITY FUND, 2011). Con estas dos premisas se puede concluir que este sector tiene un alto potencial de crecimiento e importancia, pese a esto, la infraestructura actual no es la más idónea. Esto, sumado al bajo nivel de competitividad y rentabilidad agraria, hace que las personas dedicadas a esta actividad no la perciban como una oportunidad de crecimiento.

La propuesta de mejora que se plantea en esta tesis es cambiar el sistema de riego por gravedad por un sistema de riego tecnificado por goteo, considerando información técnica y con el apoyo de herramientas de Investigación de Operaciones. El trabajo de campo se realizó en un área aproximada de 28.3 hectáreas de frutales, cuyos cultivos predominantes son la palta fuerte y la chirimoya cumbe. Se tomó en cuenta las necesidades hídricas específicas de ambos cultivos en su situación climática actual, así como, la geografía del lugar para elaborar la propuesta de mejora. La problemática se evaluó como un problema de cobertura total y un problema de máxima cobertura. Del primero se obtuvo como resultado la localización de 37 microreservorios para el abastecimiento de agua a toda el área de estudio. El segundo caso resultó en la localización de 25 microreservorios para cubrir el 88% del área cultivable.

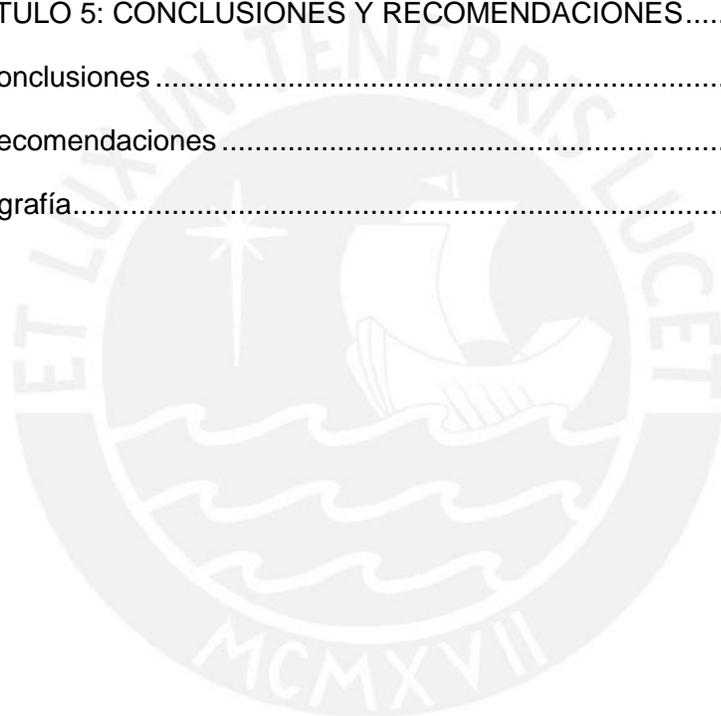
Finalmente, tras evaluar la prefactibilidad de ambas opciones se obtuvo que la más eficiente económicamente era la segunda opción, referente a la implementación de 25 microreservorios. El VAN obtenido asciende a S/. 74 576 y el TIR resultante fue de 34.1%, ambos valores confirmaron la factibilidad económica de la propuesta evaluada.

<b>Índice</b>	<b>pág.</b>
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO .....	1
1.1 Estado del Arte .....	1
1.1.1 Investigación de operaciones.....	1
1.1.2 Programación Lineal.....	5
1.1.3 Programación Entera.....	7
1.1.4 Análisis de la gestión del riego como problemática a ser resuelta por la programación lineal .....	8
1.1.5 La Programación Lineal aplicada a la Agricultura.....	10
1.1.5.1 El Problema de Cobertura.....	11
1.1.5.2 El Problema de Localización de Cobertura Máxima .....	12
1.1.5.3 El Problema de Capacidad y Dimensionamiento de reservorio .....	15
1.1.5.4 El Problema del Planeamiento de la Producción.....	15
1.2 Marco Teórico de Gestión del Riego.....	17
1.2.1 Cálculo del volumen de agua para cultivos .....	17
1.2.1.1 Cálculo de la Evotranspiración.....	18
1.2.1.2 Cálculo de las necesidades de riego.....	19
1.2.2 Métodos de Riego.....	20
1.2.2.1 Riego Gravitacional.....	20
1.2.2.2 Riego por Goteo.....	21
1.2.2.3 Riego por Aspersión .....	22
1.2.3 Análisis y Comparación de los Métodos de Riego.....	23
1.2.4 Sistema de Riego por Goteo.....	24
1.2.4.1 Fuente de Energía .....	24

1.2.4.2 Cabezal de Control .....	26
1.2.4.3 Sistema de fertirrigación .....	29
1.2.4.4 Red de Tuberías .....	30
1.2.4.5 Goteros o emisores.....	30
1.2.4.6 Dispositivos de control .....	32
1.3 Casos de Estudio.....	33
1.3.1 Modelo de localización - asignación aplicada a servicios públicos urbanos: análisis espacial de Centros de Atención Primaria de Salud (caps) en la ciudad de Luján, Argentina .....	33
1.3.2 Modelo de Optimización del área optima de cultivo en un sistema con reservorio .....	35
1.3.3 Riego por Goteo: Fortalecimiento de la Cadena productiva del Palto en el Distrito de Torata .....	38
CAPITULO 2. DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO .....	41
2.1 Situación actual de la Agricultura en el Perú .....	41
2.2 La agricultura en el Valle de Santa Eulalia.....	45
2.2.1 Descripción general del distrito de Santa Eulalia .....	45
2.2.2 Costumbres y Festivales del distrito de Santa Eulalia .....	48
2.2.3 Descripción de la comunidad en estudio.....	49
2.2.4 La palta y chirimoya .....	54
2.3 La Palta Fuerte .....	55
2.3.1 Características del Producto .....	55
2.3.2 Requerimientos edafoclimáticos .....	56
2.3.3 Contenido Nutricional.....	56
2.3.4 Demanda nacional de palta .....	56
2.3.5 Demanda interna en Lima Metropolitana .....	58
2.3.6. Análisis de Precios.....	59
2.3.7 Proyección de la Demanda de la Palta Fuerte .....	62

2.3.7.1 Método de Comportamiento Lineal: .....	62
2.3.7.2 Método Estacional Multiplicativo: .....	62
2.4 La Chirimoya Cumbe .....	64
2.4.1 Características del Producto .....	64
2.4.2 Requerimientos edafoclimáticos .....	64
2.4.3 Contenido Nutricional.....	65
2.4.4 Demanda interna de Chirimoya Cumbe en Lima Metropolitana .....	65
2.4.5 Análisis de Precios.....	67
2.4.6 Proyección de la Demanda de Chirimoya Cumbe .....	69
2.4.6.1 Método de Comportamiento Lineal: .....	69
2.4.6.2. Método Estacional Multiplicativo .....	69
2.5 Conclusión del panorama del mercado potencial de la Palta Fuerte y Chirimoya Cumbe.....	71
CAPITULO 3. PROPUESTA DE MEJORA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	73
3.1 Localización de los microreservorios en el Valle .....	73
3.2 Dimensionamiento de cada microreservorio .....	81
3.2.1 Formulación del Modelo de capacidad.....	81
3.3 Resumen de resultados .....	83
CAPITULO 4: EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA .....	84
4.1 Evaluación técnica de la propuesta de mejora en 1 ha patrón .....	85
4.1.1 Costos de los implementos del riego por goteo para 1 ha.....	85
4.1.2 Costos de materiales y construcción del microreservorio para 1 ha patrón.....	86
4.1.3 Costos adicionales.....	87
4.2 Evaluación técnica de la propuesta de mejora en todo el Valle.....	87
4.2.1 Costos de los implementos del riego por goteo para todo el Valle .....	88
4.2.2 Costos de materiales y construcción del microreservorio para todo el Valle .....	88
4.2.3 Costos adicionales.....	89

4.3 Financiamiento del Proyecto.....	90
4.4 Evaluación Económica del Sistema de Riego por Goteo .....	90
4.4.1 Evaluación Económica de la implementación individual de un microreservorio...91	
4.4.2 Evaluación Económica de la implementación de la red completa de microreservorios (Caso I).....	92
4.4.3 Evaluación Económica en función al número de microreservorios instalados (Caso II) .....	93
4.4.4 Análisis de Sensibilidad .....	95
CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
5.1 Conclusiones .....	96
5.2 Recomendaciones .....	98
Bibliografía.....	99



## ÍNDICE DE FIGURAS

pág.

Figura 1: Esquema propuesto del procedimiento de formulación del modelo en Programación Lineal para la implementación de un sistema de Riego por Goteo.....	3
Figura 2: Procedimiento Propuesto para la Gestión del Riego .....	9
Figura 3: Metodología para el cálculo del volumen de agua para cultivos.....	17
Figura 4: Sistema de Riego por Gravedad usando Canales .....	20
Figura 5: Distribución del agua por Riego por Goteo .....	21
Figura 6: Sistema de Riego por Goteo convencional .....	22
Figura 7: Esquema general de una instalación de riego por aspersión .....	23
Figura 8: Variaciones de humedad de los métodos de riego.....	23
Figura 9: Modelo de una bomba horizontal .....	25
Figura 10: Bomba Turbina Vertical para Pozo Profundo .....	26
Figura 11: Bomba pozo profundo .....	26
Figura 12: Modelos de válvulas de compuerta .....	27
Figura 13: Modelos de válvulas de aire .....	28
Figura 14: Modelos de filtro de anillos .....	28
Figura 15: Válvula de bola .....	29
Figura 16: Esquema de funcionamiento del sistema de fertirrigación .....	29
Figura 17: Tuberías PVC .....	30
Figura 18: Tuberías de Polietileno .....	30
Figura 19: Goteros según su instalación en la tubería .....	31
Figura 20: Medidor de caudal .....	32
Figura 21: Medidor de presión .....	32
Figura 22: Los 12 CAPS localizados originalmente .....	33
Figura 23: Área de influencia .....	34
Figura 24: Asignación de demanda potencial con cada alcance .....	35
Figura 25: Diagrama esquemático del sistema .....	36
Figura 26: Plaza de armas del distrito de Torata .....	39
Figura 27: Estudio de campo en Torata .....	39
Figura 28: Crecimiento del sector agropecuario en puntos porcentuales .....	41
Figura 29: Principales productos en febrero del 2015 .....	43
Figura 30: Producción agropecuaria (en %).....	44
Figura 31: Agroexportaciones Anuales (Millones US\$) .....	45
Figura 32: Mapa del distrito de Santa Eulalia.....	46

Figura 33: Festival de la Pachamanca .....	48
Figura 34: Festival de la Palta .....	48
Figura 35: Ubicación de la comunidad San Gerónimo de Punan .....	49
Figura 36: Plaza de San Gerónimo de Punan .....	50
Figura 37: Tramo del canal de riego de San Gerónimo de Punan.....	53
Figura 38: Programación de riego de los pobladores de San Gerónimo de Punan .....	54
Figura 39: Terreno abandonado en el valle.....	54
Figura 40: Palta y Chirimoya.....	55
Figura 41: Oferta de la palta en el mercado peruano .....	57
Figura 42: Consumo Per Cápita de la palta en el Perú .....	58
Figura 43: Precio Promedio de la Palta Fuerte .....	60
Figura 44: Estacionalidad de precios de la Palta Fuerte .....	61
Figura 45: Regresión Lineal de la Demanda de Palta Fuerte en el Mercado Mayorista de Lima .....	62
Figura 46: Grafico de la Demanda de Palta Fuerte por Trimestre .....	63
Figura 47: Precio Promedio de la Chirimoya Cumbe .....	67
Figura 48: Estacionalidad de la Chirimoya Cumbe .....	68
Figura 49: Grafico de la Demanda de la Chirimoya Cumbe por Trimestre .....	70
Figura 50: Mecanismo del Mercado .....	72
Figura 51: División por cuadrículas del valle San Gerónimo de Punan .....	75
Figura 52: Puntos donde se ubicarán los microreservorios.....	77
Figura 53: Curva de la efectividad lograda por el número de microreservorios utilizados .....	79
Figura 54: Ubicación de los 29 microreservorios mediante Cobertura Máxima .....	80
Figura 55: Área patrón de 1 ha propuesta para el modelo .....	81
Figura 56: Layout de posición cultivos en 1 hectárea.....	85
Figura 56: Grafico de TIR vs Área Regada .....	91

<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>pág.</b>
Tabla 1: Explicación de los procedimientos de la formulación del modelo en Programación Lineal.....	4
Tabla 2: Ejemplo de Programación Lineal.....	6
Tabla 3: Diferentes problemas de Programación Entera.....	7
Tabla 4: Problemas de Investigación de Operaciones aplicados a la agricultura .....	11
Tabla 5: Presupuesto de inversión para el proyecto .....	40
Tabla 6: Producción Agropecuaria según subsector y principales productos en miles de toneladas (Enero – Noviembre 2013/2012).....	42
Tabla 7: Valor Bruto de la producción agropecuaria Enero – Octubre (en US\$ millones) .....	43
Tabla 8: Valor de la producción agropecuaria.....	44
Tabla 9: Tiempo en Santa Eulalia .....	46
Tabla 10: Población Censada por Año calendario y Sexo en la Provincia de Huarochirí .....	47
Tabla 11: Número de árboles y producción de palta por familia.....	51
Tabla 12: Número de árboles y producción de chirimoya por familia .....	52
Tabla 13: Contenido Nutricional de la Palta (100gr).....	56
Tabla 14: Volúmenes totales de la palta fuerte en Lima Metropolitana .....	58
Tabla 15: Volumen según procedencia en Lima Metropolitana.....	59
Tabla 16: Precio Promedio por kg de la palta fuerte en Lima.....	60
Tabla 17: Comportamiento de Precios de la Palta Fuerte en Lima Metropolitana (En nuevos Soles).....	61
Tabla 18: Demanda de Palta Fuerte (Tn) ordenado por Trimestres Elaboración Propia .....	63
Tabla 19: Proyección de la Demanda de Palta Fuerte por el Método Estacional Multiplicativo .....	64
Tabla 20: Contenido Nutricional de la Chirimoya (100gr).....	65
Tabla 21: Demanda de Chirimoya Cumbe en los Mercados Mayoristas de Lima.....	66
Tabla 22: Demanda de los Mercados Mayoristas Disgregado por Proveedores Provinciales .....	66
Tabla 23: Precio Promedio de la Chirimoya Cumbe en Lima Metropolitana.....	67
Tabla 24: Comportamiento de Precios de la Chirimoya Cumbe en Lima Metropolitana.....	68

Tabla 25: Regresión Lineal de la Demanda de la Chirimoya Cumbe en el Mercado Mayorista de Lima Elaboración Propia.....	69
Tabla 26: Demanda de Chirimoya Cumbe (Tn) ordenado por Trimestres .....	70
Tabla 27: Proyección de la Demanda de la Chirimoya Cumbe por el Método Estacional Multiplicativo .....	70
Tabla 28: Alcance de cada punto ubicando el reservorio .....	74
Tabla 29: Cobertura alcanzada para cada P “Microreservorios” .....	79
Tabla 30: Resumen de resultados obtenidos para hallar el número de microreservorios .....	83
Tabla 31: Cuadro Resumen sobre la utilización de una hectárea patrón .....	84
Tabla 32: Lista de costos de implementos en un sistema de riego por goteo.....	86
Tabla 33: Lista de costos de materiales de construcción para un microreservorio .....	87
Tabla 34: Costos de transporte.....	87
Tabla 35: Lista de costos de implementos para los 37 microreservorios.....	88
Tabla 36: Lista de costos de materiales de construcción de los microreservorios.....	89
Tabla 37: Costo de transporte.....	89
Tabla 38: Tabla de Inversión según Cubierta el Área .....	92
Tabla 39: Flujo de Caja Proyectado .....	93
Tabla 40: Flujo de caja proyectado para P=25.....	93
Tabla 41: TIR y VAN según el numero instalados de microreservorios.....	94
Tabla 42: Flujo de caja proyectado para P=37.....	95
Tabla 43: Flujo de caja proyectado para P=25.....	95

## **CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO**

El Marco teórico presentara tres secciones. La primera referente al estado del arte, que involucra una revisión de conceptos de la investigación de operaciones y su aplicación a la agricultura. El segundo se refiere al marco teórico referente a la gestión del riego. Finalmente, el tercer punto presenta tres casos de estudio, donde se aplican los conceptos presentados en las secciones anteriores.

### **1.1 Estado del Arte**

El presente capítulo está enfocado a las diferentes herramientas que se manejan en el campo de la investigación de operaciones para la resolución de problemas en diferentes aspectos, utilizando diversos algoritmos que ayudan a resolver distintos problemas mediante ecuaciones lineales. Asimismo, se mencionan las diferentes aplicaciones de dichos algoritmos, aplicados a la agricultura.

#### **1.1.1 Investigación de operaciones**

Los primeros indicios del uso formal de la investigación de operaciones comenzaron en Inglaterra durante la Segunda Guerra Mundial, cuando un grupo de científicos empezó a tomar decisiones basándose en la mejor utilización del material bélico. Después de la guerra, todas las ideas formuladas en estas operaciones militares fueron adaptadas para mejorar la eficiencia y productividad en el sector civil (Taha, 2012). Desde ese entonces, se empezó a aplicar a diferentes áreas y a sistemas reales con la ayuda de modelos matemáticos, estadísticos, y algoritmos para optimizar un objetivo definido, ya sea la maximización o minimización de ello.

La investigación de operaciones, también conocida como investigación operativa, abarca los problemas que se refieren a la conducción y coordinación de operaciones o actividades dentro de una organización. Esta disciplina se ha aplicado en áreas tan diversas como la manufactura, el transporte, la construcción, las telecomunicaciones, la planeación financiera, el cuidado de la salud, la milicia y los servicios públicos, entre otras (Hillier & Lieberman, 2015).

La investigación de operaciones se utiliza mucho para la toma de decisiones ante un problema determinado, desarrollándose bajo situaciones deterministas, aleatorias, de incertidumbre, o de competencia, por ello se sigue una serie de pasos que son los siguientes (Taha, 2012):

Paso 1: definición del problema, esto implica definir el alcance del problema, para lo cual se identifican 3 elementos principales: la descripción de las alternativas de decisión, la determinación del objetivo de estudio y la especificación de las limitaciones bajo las cuales funciona el sistema modelado.

Paso 2: construcción del modelo, significa traducir el problema en relaciones matemáticas. El modelo se puede asemejar a modelos estándar como la programación

lineal, sin embargo, también pueden ser demasiado complejos como para ser evaluado analíticamente, por lo que hay diferentes métodos para resolver estos casos como los modelos heurísticos o las herramientas de simulación.

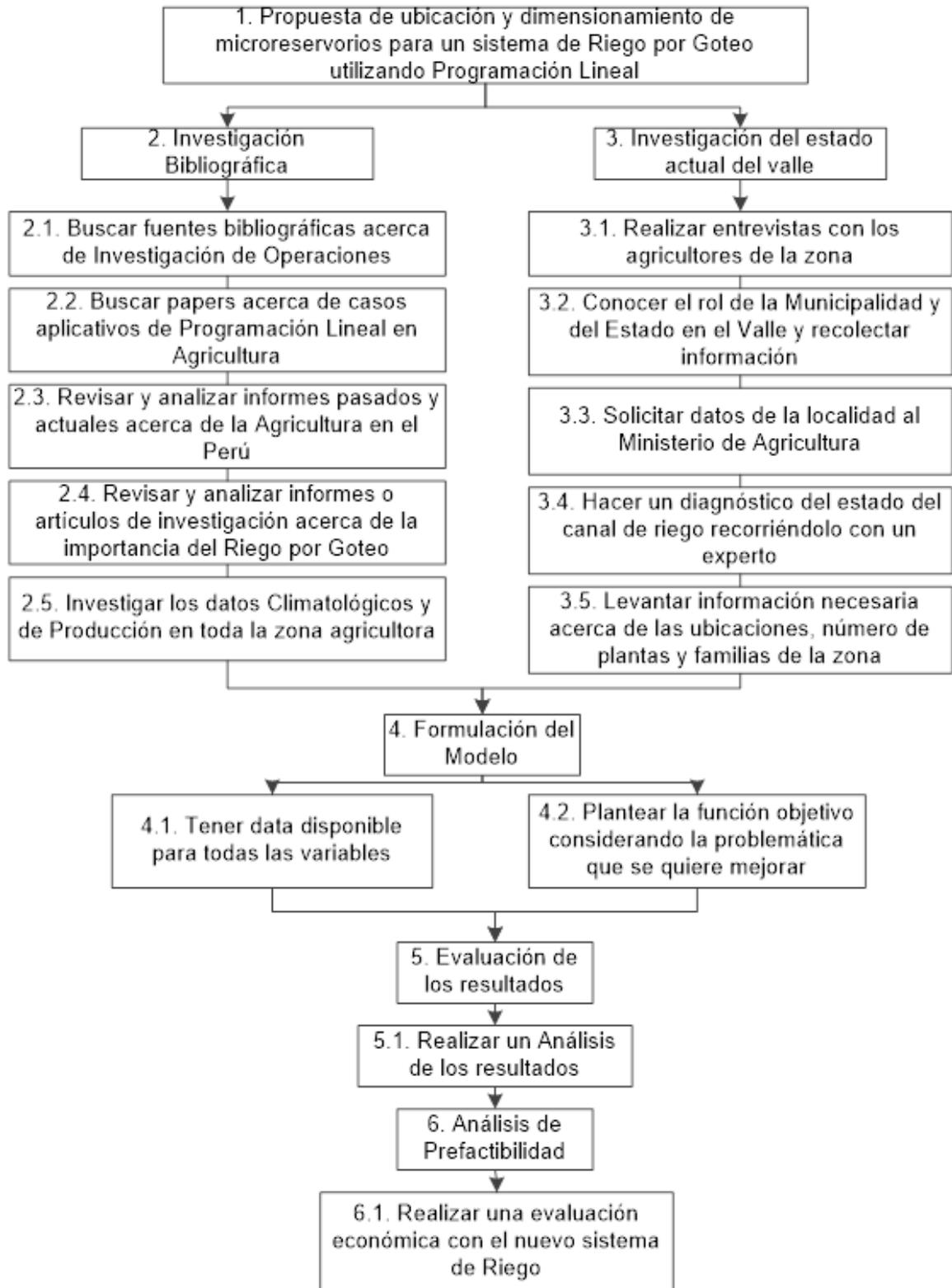
Paso 3: solución del modelo, consiste en un adecuado desarrollo del problema con la finalidad de obtener una solución a partir del modelo. También se puede dar énfasis al análisis de sensibilidad, el cual brinda información adicional en relación a los efectos que puede producir el cambio en el valor de los parámetros del modelo.

Paso 4: validación del modelo, consiste en la comprobación del modelo propuesto, y también en analizar si los resultados son coherentes y correctos, para ello se puede comparar la solución con datos históricos. El modelo es válido si en contextos similares reproduce el mismo funcionamiento en el pasado. Si el modelo propuesto es un sistema nuevo, el cual no cuenta con datos históricos, se puede recurrir a una simulación como una herramienta independiente para verificar estos resultados.

Paso 5: implementación de la solución, implica la traducción de los resultados llevados a la realidad, todo emitido en forma comprensible para las personas que administrarán el sistema en estudio.

La Figura 1 muestra el esquema propuesto del Proyecto. En este gráfico, se detallan los procesos implicados en el trabajo de investigación. Así mismo la numeración colocada corresponde al capítulo y subcapítulo donde el tema ha sido desarrollado.

Figura 1: Esquema propuesto del procedimiento de formulación del modelo en Programación Lineal para la implementación de un sistema de Riego por Goteo



Elaboración Propia

A continuación se presenta la Tabla 1 que nos muestra la explicación de cada procedimiento visto en la figura anterior:

Tabla 1: Explicación de los procedimientos de la formulación del modelo en Programación Lineal

1. Propuesta de ubicación y dimensionamiento de microreservorios para un sistema de Riego por Goteo utilizando Programación Lineal	
2. Investigación Bibliográfica	
2.1. Buscar fuentes bibliográficas acerca de la Investigación de Operaciones	Para la formulación del modelo se necesitará el fundamento teórico para la determinación de las alternativas de la formulación. Se tomarán en cuenta los libros que abarquen toda la teoría en Investigación de Operaciones.
2.2. Buscar papers acerca de casos aplicativos de Programación Lineal en Agricultura	Se empezará con la búsqueda en base de datos de papers que tengan como temática la Programación Lineal aplicada a la Agricultura. Con ello se tendrá un panorama de las herramientas existentes y su aplicación. Estas herramientas serán evaluadas con respecto a las condiciones del proyecto para su posterior formulación.
2.3. Revisar y analizar informes pasados y actuales acerca de la Agricultura en el Perú	Tener la información necesaria de la situación actual de la agricultura en el Perú y conocer el tema ayudará a identificar las áreas críticas que requieren mejora, estas definirán los objetivos del modelo.
2.4. Revisar y analizar informes o artículos de investigación acerca de la importancia del Riego por Goteo	Es importante también conocer la implicancia de la agricultura en la realidad actual, el porqué de la necesidad de optimizar recursos, las ventajas del riego por goteo y la relación que tiene con la sociedad.
2.5. Investigar los datos Climatológicos y de Producción en toda la zona agricultora	Conocer e investigar acerca del clima es importante, pues con ello se tendrá información acerca de los fenómenos naturales de la zona de estudio a ser considerados en el proyecto.
3. Investigación del estado actual del valle	
3.1. Realizar entrevistas con los agricultores de la zona	Se puede tener una adecuada descripción de la realidad a analizar a través de la información brindada por los mismos agricultores radicales de la zona de estudio.
3.2. Conocer el rol de la Municipalidad y del Estado en el Valle y recolectar información	Conocer el rol que tiene la municipalidad con los agricultores ayudará a establecer un primer contacto directo con ellos, y por ende, conseguir el apoyo para la recolección de datos y el facilitamiento de la información.

3.3. Solicitar datos de la localidad al Ministerio de Agricultura	El ministerio maneja información estadística en todo el valle sobre el desarrollo de la agricultura en la zona. Esto especifica los tipos de cultivos presentes, su distribución dentro del área sembrada, y los niveles de producción actuales. Esta información ayudará en la formulación del modelo y el análisis de prefactibilidad a realizar.
3.4. Hacer un diagnóstico del estado del canal de riego recorriéndolo con un experto	Recorrer todo el canal, desde inicio a fin, permitirá observar la infraestructura y el estado del sistema actual con el fin de identificar alternativas de mejora.
3.5. Levantar información necesaria acerca de las ubicaciones, número de plantas y familias de la zona	Tener información de la zona, las familias y el registro del número de plantas que tiene cada parcela ayudará a formular el modelo permitiendo la estimación de datos de oferta (producción) y recursos necesarios (recurso hídrico).
<b>4. Formulación del Modelo</b>	
4.1. Tener data disponible para todas las variables	Con toda la información recolectada se evaluarán los modelos a formular y con ello, todas las variables que se necesitarán.
4.2. Plantear la función objetivo considerando la problemática que se quiere mejorar	Teniendo el diagnóstico del sistema de riego en la zona, se empezará a plantear la función objetivo de acuerdo a los objetivos deseados. Pueden formularse varios modelos para cumplir con los objetivos.
<b>5. Evaluación de los resultados</b>	
5.1. Realizar un Análisis de los Resultados	Teniendo los resultados se analizará la coherencia de los mismos con la realidad.
<b>6. Análisis de Prefactibilidad</b>	
6.1. Realizar una evaluación económica con el nuevo sistema de Riego	En base a los resultados obtenidos, se hará una evaluación económica para analizar la rentabilidad del proyecto y su beneficio a la comunidad.

Elaboración Propia

### 1.1.2 Programación Lineal

La programación lineal es la abstracción de un problema a un modelo de optimización matemático, en el cual la función objetivo y las restricciones son lineales. Esta técnica también realiza algoritmos eficientes de cómputo para problemas con cantidades grandes de restricciones y variables. Es por ello que debido a su gran eficiencia de cálculo, la programación lineal conforma la columna vertebral de los algoritmos de solución para otros modelos de investigación de operaciones, como las programaciones entera, estocástica, y no lineal (Taha, 2012).

Un problema de programación lineal tiene la siguiente forma general (García & Ortega, 2012):

$$\begin{aligned} &(\text{Max o Min}) Z = Cx && \text{Función Objetivo} \\ &\text{s.a.} \\ &ax - b = 0 && \text{Restricción funcional} \\ &x \geq 0 && \text{Restricciones de no negatividad} \end{aligned}$$

Para entender mejor lo mostrado anteriormente, se detalla el siguiente modelo (Taha, 2012):

Datos básicos del problema:

Tabla 2: Ejemplo de Programación Lineal

	Ton de materia prima de		Disponibilidad diaria máxima (ton)
	Pinturas para exteriores	Pinturas para interiores	
Materia prima MP1	6	4	24
Materia prima MP2	1	2	6
Utilidad por ton (miles de \$)	5	4	

Fuente: (Taha, 2012)

Una encuesta de mercado indica que la demanda diaria de pintura para interiores no puede ser mayor que 1 tonelada más que la de pintura para exteriores. También que la demanda máxima diaria de la pintura para interiores es de 2 toneladas.

Lo que se desea es determinar la mezcla óptima (la mejor) de productos para exteriores y para interiores que maximice la utilidad diaria total.

Para ello se tiene tres componentes básicos:

1. Las variables de decisión que se trata de determinar.
2. El objetivo que se trata de optimizar.
3. Las restricciones que se deben satisfacer.

Para ello se define las variables:

$X_1$ : Toneladas producidas diariamente, de pintura para exteriores  
 $X_2$ : Toneladas producidas diariamente, de pintura para interiores

Una vez determinado las variables, el objetivo de la empresa se expresa:

$$\text{Max } z = 5X_1 + 4X_2$$

Y por último las restricciones serían:

$$\begin{array}{ll}
 6X_1 + 4X_2 \leq 24 & \text{Materia prima MP1} \\
 X_1 + 2X_2 \leq 6 & \text{Materia prima MP2} \\
 -X_1 + X_2 \leq 1 & \text{Diferencia entre pinturas} \\
 X_2 \leq 2 & \text{Demanda pintura para interiores}
 \end{array}$$

Cualquier valor de  $X_1$  y  $X_2$  que satisfaga todas las restricciones del modelo se considera una solución factible.

### 1.1.3 Programación Entera

De acuerdo a Winston (2005), un problema de programación entera (PE) es un problema de Programación Lineal (PL) en el cual al menos una de las variables del problema es un número entero no negativo.

Tabla 3: Diferentes problemas de Programación Entera

Problemas de Programación Entera	Condición
Problema Puro de Programación Entera	Todas las variables de decisión son enteros no negativos.
Problema Combinado de Programación Entera	Algunas de las variables de decisión son enteros no negativos
Problema de Programación Binaria	Todas las variables de decisión son enteros y tienen que ser iguales a 0 o 1.

Elaboración Propia

Se denomina problema puro de programación con enteros a aquel problema donde todas las variables de decisión son enteros no negativos. Por ejemplo:

$$\begin{array}{l}
 \text{Max } z = 2X_1 + 3X_2 \\
 \text{s.a } \quad X_1 + X_2 \leq 12 \\
 X_1, X_2 \geq 0, X_1, X_2 \text{ enteros}
 \end{array}$$

Por otro lado, se denomina problema combinado de programación con enteros a aquel problema donde algunas variables son enteros. Por ejemplo:

$$\begin{aligned} \text{Max } z &= 2X_1 + 3X_2 \\ \text{s.a } &X_1 + X_2 \leq 12 \\ &X_1, X_2 \geq 0, X_1 \text{ enteros} \end{aligned}$$

En este caso, solo  $X_1$  tiene la condición de ser un entero. Por lo cual, tiene un mayor rango de factibilidad que un problema puro pero menor que el de un problema de programación lineal.

Finalmente, un problema de programación entera donde todas las variables tienen que ser valores iguales a 0 o 1 recibe el nombre de programación entera binaria PE-Binaria. Se presenta un ejemplo a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Max } z &= X_1 - X_2 \\ \text{s.a } &X_1 + 2X_2 \leq 2 \\ &2X_1 - X_2 \leq 1 \\ &X_1, X_2 = 0 \text{ ó } 1 \end{aligned}$$

Una manera de resolver los problemas de programación entera es resolverlos como problemas de programación lineal y redondear la solución al entero más cercano hacia arriba y abajo. Sin embargo, los valores redondeados podrían no estar contenidos en la región factible o no ser la solución óptima del problema. Para estos casos, se debe evaluar la función objetivo punto por punto.

#### 1.1.4 Análisis de la gestión del riego como problemática a ser resuelta por la programación lineal

Para la adecuada gestión del riego con aguas superficiales es necesaria la realización de un análisis integral del problema actual. En la figura 2, se muestra el procedimiento propuesto para el tratamiento de esta problemática.

E1: Planteamiento del Problema: se identifica la problemática actual y especifican los objetivos del proyecto, basados en el aumento de la producción actual y la gestión óptima del uso del agua en zonas agrícolas.

E2: Delimitación del Alcance del Proyecto: se especifica el área de estudio para el diseño del proyecto, limitando la zona en base a la disponibilidad para la toma de datos y la colaboración de las personas de la localidad.

E3: Análisis y Diagnóstico de la Situación Actual: se realiza una investigación en la zona de estudio sobre los tipos de cultivos sembrados, el clima, el área cultivable, el mercado objetivo de los cultivos producidos, y el sistema de riego aplicado. Asimismo, se toman en cuenta las dificultades en la producción y el estado actual del canal de riego.

E4: Localización de los nodos del sistema: se identifican los puntos de recepción de agua para las distintas parcelas de cultivos en la zona delimitada. Para esto se realiza un modelo para minimizar el número de puntos de recepción buscando cubrir toda el área de estudio.

E5: Diseño de la capacidad del Sistema: se desarrolla el modelo de optimización con los inputs requeridos y las restricciones de capacidad establecidas. Para ello se debe contar con data suficiente para poder establecer dicho modelo.

E6: Estudio Técnico: se analizan todos los componentes necesarios de infraestructura que harán posible la implementación del proyecto.

E7: Estudio Económico: se realiza un estimado de los costos del proyecto y se analiza la inversión necesaria, el retorno de la misma, y un análisis de sensibilidad de los resultados esperados.

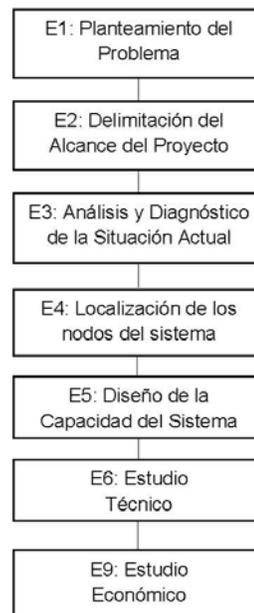


Figura 2: Procedimiento Propuesto para la Gestión del Riego

Elaboración Propia

La Programación Lineal permite incorporar muchos factores al modelo de optimización. Los factores como los requerimientos hídricos, la capacidad del área cultivable, el tipo de cultivos presente, entre otros, delimitan el sistema evaluado y son expresados a

través de las restricciones del modelo. En este contexto, la optimización del sistema de riego para las áreas existentes y la mejora en la asignación de recursos son la mejor respuesta para reducir la deficiencia que existe en la agricultura sobre el uso del agua.

### 1.1.5 La Programación Lineal aplicada a la Agricultura

Los modelos de Programación Lineal (PL) han sido extensivamente utilizados para investigaciones en la gestión de cultivos y sistemas de riego debido a su sencilla formulación y aplicación. Entre las diversas investigaciones mencionadas por una revisión bibliográfica, realizada por Singh (2013), en relación al uso de la programación lineal aplicada en la Agricultura tenemos muchos trabajos en esta área. Boster y Martin (1979) usaron un modelo PL aplicado a las granjas irrigadas en Arizona. Peralta et al. (1995) desarrolló un modelo PL para obtener extracciones sostenibles de agua subterránea en un periodo de cinco décadas bajo un escenario establecido del uso del agua. Asimismo, Tyagi y Narayana (1981) propusieron un modelo para la asignación de agua superficial y agua subterránea en la irrigación de un área semiárida en la India. Kumar y Pathak (1989) presentaron un modelo para el óptimo planeamiento de cultivos en un sistema de canales acuíferos. Ibañez-Castillo et al. (1997) usaron una combinación de modelos de PL y simulación para el planeamiento operativo de un sistema de irrigación. Matanga y Mariño (1979) desarrollaron un modelo estocástico para determinar una política de irrigación. Ponnambalam et al. (1989) uso la programación lineal para determinar el uso eficiente de un reservorio en un sistema de irrigación. Latif y James (1991) aplicaron un modelo PL en Pakistán para maximizar el ingreso neto de irrigaciones a través de ciclos húmedos y secos analizados en un largo periodo. Similarmente, Yamout y El-Fabel (2005) desarrollaron un modelo PL regional para ayudar a la toma de decisiones en el planeamiento y establecimiento de políticas para la correcta disposición de recursos hídricos. Teixeira y Mariño (2002) presentaron una metodología de optimización para las operaciones con reservorio junto a un modelo de programación de riego para la maximización del ingreso neto de un distrito agricultor. Sun et al. (2011) concluyó que la productividad del agua irrigada puede ser mejorada en un sistema de doble cultivo por medio de la optimización en la gestión del agua. Moradi-Jalal et al. (2007) desarrolló un modelo PL para la determinación óptima de un patrón multi cultivo en áreas irrigadas por un sistema reservorio-canal en Irán. Finalmente, Singh (2012) aplicó un modelo PL para la óptima asignación de recursos en una región semiárida en la India, la cual cuenta con escasas fuentes de agua.

Es evidente el valor que tiene la Programación Lineal como herramienta para una mejor gestión de recursos en la actividad agrícola. A continuación, se presenta una tabla con diversos problemas matemáticos que pueden ser de interés al buscar optimizar la planeación y gestión de recursos en faenas agrícolas.

Tabla 4: Problemas de Investigación de Operaciones aplicados a la agricultura

Problema	Objetivo	Aplicación en la Agricultura	Subtítulo
Problema de Cobertura	Determinar el número mínimo de instalaciones de abastecimiento para una zona	Se emplea en la localización de reservorios para cubrir un área específica.	1.5.1
Problema de Localización de Cobertura Máxima	Determinar la máxima área de cobertura dado un número finito de instalaciones de abastecimiento	Se emplea en la determinación del área efectiva a regar y del número de reservorios óptimo.	1.5.2
Problema de Capacidad y Dimensionamiento de Reservorio	Determinar la capacidad mínima del sistema a través de un balance de masas	Se emplea en el dimensionamiento de reservorios	1.5.3
Problema del Planeamiento de la Producción	Determinar la asignación óptima de elementos que maximicen la utilidad	Se emplea en la elección de un patrón de cultivo maximizando el retorno.	1.5.4

Fuente: Elaboración Propia

#### 1.1.5.1 El Problema de Cobertura

En esta sección se estructura el problema de cobertura máxima. Se menciona el objetivo, se describe el método, y se hacen algunas observaciones.

**Problema por resolver:** El Problema de cobertura busca abastecer a todos los puntos de un sistema. Para esto, se determina el número mínimo de puntos de oferta para abarcar la totalidad de los puntos de demanda. Adicionalmente, se podría buscar minimizar el costo de los conjuntos a seleccionar.

Universo  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  conformado por elementos  $u$ .

Subconjuntos:  $S_1, S_2, \dots, S_k \subseteq U$

Costos:  $c_1, c_2, \dots, c_k$

Se busca, encontrar un conjunto  $I \subseteq \{1, 2, \dots, m\}$  que minimice  $\sum_{i \in I} c_i$ , tal que  $\cup_{i \in I} S_i = U$   
Para el caso de cobertura sin ponderación  $c_i$  es igual a 1 para todo  $i$ .

**Método:** La formulación matemática de este problema se puede expresar por medio de la programación lineal:

$C_j$  = Costo fijo del centro de abastecimiento ubicado en el nodo  $j$

$S$  = Máxima distancia de servicio aceptable (o tiempo)

$N_i$  = Conjunto de centros de abastecimiento ubicados en  $j$  con distancias aceptables al nodo  $i$

Este problema se puede representar de la siguiente manera:

$$\text{Min } z = \sum_j C_j X_j \quad (1.1)$$

$$\text{s.a } \sum_{j \in N_i} X_j \geq 1 \quad \forall i, \quad (1.2)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j. \quad (1.3)$$

La función objetivo (1.1) minimiza el costo de ubicación de los centros de abastecimiento. En muchos casos, los costos  $C_j$  son asumidos iguales para todos los posibles sitios de instalaciones  $j$ , lo que implica un equivalente objetivo de reducir al mínimo el número de instalaciones ubicadas. Restricción (1.2) requiere que todas las demandas tengan al menos un centro de abastecimiento ubicado dentro de la distancia de servicio aceptable. La restricción restante (1.3) está referida a las variables de decisión.

**Observaciones:** Se debe tener en cuenta que la formulación del modelo no hace ninguna distinción entre los nodos basados en el tamaño de la demanda. Cada nodo, si contiene un único cliente o una gran parte de la demanda total, debe ser cubierto dentro de la distancia especificada, sin importar el costo. Si la distancia de cobertura  $S$  es pequeña en relación con el espaciamiento de los nodos de demanda, la restricción de cobertura puede conducir a requerir un gran número de instalaciones para lograr el objetivo del modelo. Adicionalmente, si un nodo periférico tiene una pequeña demanda, la relación costo/beneficio de cubrir esa demanda puede ser muy alta.

#### 1.1.5.2 El Problema de Localización de Cobertura Máxima

El Problema de localización de cobertura máxima, introducido por primera vez por (Church y ReVelle, 1974), busca abarcar la máxima población que puede ser atendida dentro de una distancia o tiempo establecido dado un número limitado de centros de abastecimiento. Este problema puede ser modelado mediante una red, en la cual los nodos representan los puntos demandantes con un peso asignado en función a la población que sería atendida, y arcos, los cuales nos indican la distancia entre los distintos nodos. La solución es alcanzada cuando se identifican los nodos de abastecimiento que cubren la máxima población dadas las condiciones establecidas, los cuales se mostraran en dos casos:

##### Caso 1. Problema de Localización de Cobertura Máxima General

En este caso se mostrará paso a paso la aplicación del algoritmo de cobertura máxima, el problema que busca resolver, el método a utilizar y algunas observaciones.

**Problema por resolver:** El problema de localización de máxima cobertura con programación lineal busca abarcar la mayor cantidad de área o puntos demandantes teniendo en cuenta un número fijo o finito de puntos ofertantes.

**Método:** El problema puede ser definido en una red de nodos y arcos, la formulación matemática del problema se presenta a continuación:

- $i$  = denota el set de nodos de demanda
- $j$  = denota el set de centros de abastecimiento
- $S$  = es la distancia más allá de la cual el punto de demanda es considerado "no cubierto"
- $d_{ij}$  = es la distancia más corta del nodo  $i$  al nodo  $j$
- $x_j$  = si un centro de abastecimiento es localizado en el nodo " $j$ ", toma el valor de 1. Caso contrario toma el valor de 0
- $N_i = \{ j \in J \mid d_{ij} \leq S \}$ . Conjunto de centros de abastecimiento con distancias aceptables al nodo  $i$
- $a_i$  = población a ser atendida perteneciente al nodo  $i$
- $P$  = número de centros de abastecimiento a ser localizados

La P.L es la siguiente,

$$\max z = \sum_{i \in I} a_i y_i \tag{1.4}$$

$$\text{s.a. } \sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i \quad (\forall i \in I) \tag{1.5}$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P \tag{1.6}$$

$$x_j = (0,1) \quad (\forall j \in J)$$

$$y_i = (0,1) \quad (\forall i \in I)$$

La función objetivo (1.4) establece la búsqueda del máximo número de personas que puede ser atendida o "cubierta" dentro de una distancia deseada de servicio. La restricción (1.5) permite a  $y_i$  tomar el valor de 1 solo cuando uno o más centros de abastecimiento son localizados en los sitios del set  $N_i$  (que es el conjunto de centros de abastecimiento que se encuentran dentro de  $S$  unidades de distancia del punto de demanda  $i$ ). Finalmente, la restricción (1.6) restringe el número de centros de abastecimiento localizados.

**Observaciones:** Para este método, se tienen tres herramientas que sirven para solucionar problemas de cobertura: Algoritmo Voraz de adición, Algoritmo Voraz de

adición con sustitución, y a través de la Programación Lineal (las dos primeras son heurísticas). Lo que se debe considerar antes de aplicar dichas herramientas es que solo a través de la programación lineal se puede asegurar la solución óptima del problema (Church y ReVelle, 1974).

**Caso 2. El Problema de Localización de Cobertura Máxima con restricción obligatoria de cercanía**

**Problema a resolver:** Este problema es una variación del problema de localización de cobertura máxima. En este caso el objetivo es el mismo: buscar la maximización de la cobertura dentro de una distancia de servicio establecida, sin embargo, existe una distancia indeseable, la cual no debe ser excedida por ningún nodo de demanda. Esta restricción se estableció como un mecanismo de compensación para todos aquellos nodos de demanda no cubiertos. Entonces el problema de cobertura se define: "Localizar "p" centros de abastecimiento en la red de nodos para maximizar la población que puede ser cubierta dentro de una distancia "S" establecida de servicio y a la vez asegurar que todos los nodos de demanda encontraran un centro de abastecimiento a una distancia no mayor a T (T>S).

**Método:** La formulación matemática es muy similar al del problema de localización de cobertura máxima. La función objetivo es idéntica, sin embargo, ahora existen dos restricciones de cobertura:

La P.L es la siguiente,

$$\max z = \sum_{i \in I} a_i y_i \tag{1.7}$$

$$\text{s.a. } \sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i \quad (\forall i \in I) \tag{1.8}$$

$$\text{s.a. } \sum_{j \in M_i} x_j \geq 1 \quad (\forall i \in I) \tag{1.9}$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P \tag{2.0}$$

$$x_j = (0,1) \quad (\forall j \in J)$$

$$y_i = (0,1) \quad (\forall i \in I)$$

La nueva restricción (1.9) asegura que al menos 1 centro de suministro estará localizado a una distancia máxima de T para cada nodo de demanda (Church y ReVelle, 1974).

### 1.1.5.3 El Problema de Capacidad y Dimensionamiento de reservorio

**Problema a resolver:** Este método busca hallar el dimensionamiento óptimo de un reservorio a través de una ecuación de balance de masas, con ello se obtiene el volumen necesario que necesita un determinado sistema. Dorfman (1965) formuló un modelo para encontrar la capacidad necesaria de un reservorio que asegure un flujo de agua deseado durante un periodo crítico, al mismo tiempo buscaba que la condición final del reservorio no sea peor que la condición de inicio en el periodo crítico.

**Método:** A continuación se presenta el modelo de programación lineal planteado:

- t, n = índice de meses y el número total de meses en el periodo crítico
- $s_t$  = reserva al final del mes t
- $s_0$  = reserva inicial
- q = flujo de salida de agua mes a mes, especificado en el primer modelo y luego una variable
- $w_t$  = pérdidas de agua por exceso de capacidad en el reservorio en el mes t
- c = capacidad del reservorio para almacenar agua
- $i_t$  = flujo de ingreso al reservorio en el mes t del periodo crítico

$$\min z = c \tag{2.1}$$

$$\text{s. a.} \quad s_t = s_{t-1} + i_t - q - w_t \quad (t = 1, \dots, n) \tag{2.2}$$

$$s_t \leq c \quad (t = 1, \dots, n) \tag{2.3}$$

$$s_t \geq s_0 \quad (t = n) \tag{2.4}$$

$$s_t, w_t \geq 0 \quad (t = 1, \dots, n)$$

$$c, q \geq 0$$

La función objetivo (2.1) busca minimizar la capacidad del reservorio. La restricción (2.2) establece el balance entre las entradas y las salidas del sistema del reservorio. La restricción (2.3) prohíbe cualquier almacenamiento que exceda la capacidad de almacenamiento seleccionada para el reservorio. Finalmente, la restricción (2.4) establece que el almacenamiento al final del periodo crítico debe ser al menos tan grande como el almacenamiento al inicio del periodo crítico.

**Observaciones:** Para hallar el requerimiento de agua de un determinado cultivo, es necesario consultar herramientas que ayuden a calcular la cantidad de agua necesaria por cultivo como el software CROPWAT 8.0.

### 1.1.5.4 El Problema del Planeamiento de la Producción

**Problema a resolver:** se busca identificar el patrón de cultivos que maximice la ganancia, ya sea considerando los cultivos aptos para la zona, requerimiento del recursos, rendimiento por hectárea, y el margen de ganancia de cada cultivo. En este

sentido, Hanssmann y Hess (1960) fueron los primeros en formular un plan de producción mediante programación lineal. Lo que busca el método es maximizar las ganancias y así identificar los productos a ser elaborados. (Moya, 2011).

**Método:** A manera genérica el problema puede de ser planteado de la siguiente manera:

$(p_i - c_i)$  = utilidad o ganancia percibida por el producto  $i$

$x_i$  = cantidad a producir del producto  $i$

$R_k$  = capacidad total del recurso  $R_k$

$r_{ki}$  = requerimiento del recurso  $R_k$  empleado para la elaboración del producto  $i$

$$\max \sum_{i \in I} (p_i - c_i) x_i \quad (2.5)$$

$$r_{jk} * x_i \leq R_k \quad (i = 1, \dots, n) \quad (2.6)$$

La función objetivo (2.5) busca maximizar el beneficio obtenido por la elaboración del producto  $x_i$ . La restricción genérica (2.6) establece un límite en la disponibilidad de un recurso conocido  $R_k$ . Asimismo, se podrían tener restricciones de producción mínima y límites de demanda.

**Observaciones:** Este problema puede ser aplicado a la agricultura en el planeamiento de la producción de cultivos con la finalidad de determinar el cultivo a plantar y el beneficio económico esperado de este escenario.

## 1.2 Marco Teórico de Gestión del Riego

En este subcapítulo se presenta un marco teórico en relación al Riego. Se incluyen puntos relacionados al volumen de agua requerida para cultivos, los métodos de riego, y se detallará con mayor profundidad la instrumentación empleada en un sistema de riego por goteo.

### 1.2.1 Cálculo del volumen de agua para cultivos

La cuantificación de las necesidades hídricas de los cultivos es necesaria para la planificación de un sistema de riego, pues a partir de estos valores se dimensiona la infraestructura de riego que permitirá la correcta distribución del agua en forma oportuna a cada cultivo. En este sentido, la evotranspiración es un concepto importante para el cálculo del volumen de agua necesario para los cultivos. Se conoce como evotranspiración (ET) a la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante la transpiración del cultivo. En base a su cálculo y la combinación de otros factores, se puede realizar un balance de masas para el cálculo de la necesidad neta de riego. Con este fin, la organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura FAO publicó un método para el cálculo de los requerimientos hídricos de las plantas (FAO, 1974). Se plantea una metodología práctica que corresponde a los siguientes pasos.

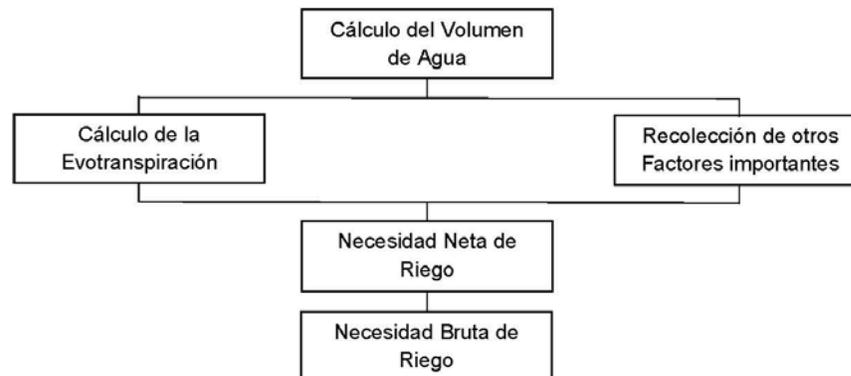


Figura 3: Metodología para el cálculo del volumen de agua para cultivos  
Elaboración propia

### 1.2.1.1 Cálculo de la Evotranspiración

**Cálculo de la evotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>):** La superficie de referencia es un cultivo hipotético de paso, con un altura asumida de 8 a 15 cm, de altura uniforme, con crecimiento activo, que sombree el suelo y en el que no escasee el agua.

La FAO recomienda el uso del método combinado de Penman-Monteith para el cálculo de la evotranspiración de referencia. A continuación, se presenta la fórmula matemática:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

Donde:

- ET<sub>o</sub> : evapotranspiración de referencia (mm día-1)
- R<sub>n</sub> : radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m-2 día-1)
- R<sub>a</sub> : radiación extraterrestre (mm día-1)
- G : flujo del calor de suelo (MJ m-2 día-1)
- T : temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
- u<sub>2</sub> : velocidad del viento a 2 m de altura (m s-1) es presión de vapor de saturación (kPa)
- e<sub>a</sub> : presión real de vapor (kPa)
- e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub> : déficit de presión de vapor (kPa)
- Δ : pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C-1)
- Γ : constante psicrométrica (kPa °C-1)

Para poder aplicar esta fórmula se requieren datos de la Localización, Temperatura, Humedad, Radiación, y Viento de la zona evaluada.

**Localización:** la altura sobre el nivel del mar y la latitud permiten calcular la radiación extraterrestre R<sub>a</sub>. El cálculo la latitud se expresa en radianes, positivo para el hemisferio norte y con valor negativo para el hemisferio sur.

**Temperatura:** se requiere información de la temperatura diaria mínima y máxima en grados centígrados.

**Humedad:** el valor de la presión real diaria de vapor e<sub>a</sub> en kilopascales (kPa) se requiere como dato de entrada. Este valor puede ser derivado a partir de la humedad relativa máxima y mínima (%), temperaturas de bulbo húmedo y seco en (°C), o de la temperatura del punto de rocío (°C).

**Radiación:** la radiación diaria neta se expresa en megajoules por metro cuadrado por día (MJ m-2 día-1) y puede ser calculada a partir de la radiación promedio diaria de

onda corta medida con un piranómetro o de la duración real del sol brillante (horas por día) medida con el heliógrafo.

Viento: se requiere la velocidad del viento en metros por segundo (m s-1) medida a 2 metros de altura sobre el nivel del suelo.

**Elección del coeficiente de cultivo (Kc):** es un valor que relaciona la ETo y la ETc. Este coeficiente se ve influenciado por diversos factores que influyen en diversos tipos de cultivo. Entre ellos encontramos al tipo de cubierta vegetal, las heladas, la humedad, el viento, la edad, la frecuencia de riego o lluvias, y la textura del suelo.

**Cálculo de la evotranspiración de cultivo (ETc):** se calcula mediante la fórmula  $ETc = ETo \cdot Kc$

**Factores locales que influyen en la ETc:** estos son divididos en 5 grupos: el clima, la humedad del suelo, el método de riego, las prácticas de cultivo, y el rendimiento de los cultivos.

#### 1.2.1.2 Cálculo de las necesidades de riego

La necesidad de riego de un cultivo se define como la cantidad de agua necesaria que resulta de considerar las entradas, salidas y la variación de agua en la reserva del suelo. La necesidad neta de riego se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$Nn = (ETc + F + R) - (Pe + Ge + N) + \Delta W$$

Nn	= Necesidad neta de riego	Pe	= Lluvia Efectiva (mm)
ETc	= Evotranspiración del cultivo (mm)	Ge	= Aportación Capilar (mm)
F	= perdidas por percolación (mm)	N	= Escorrentía de entrada (mm)
R	= Escorrentía de salida (mm)	$\Delta W$	= Variación de la reserva de agua (mm)

Normalmente se deprecia el valor de F, R, Ge y N por no ser significativo. La fórmula es simplificada a:

$$Nn = Pe - Etc + \Delta W$$

Posteriormente, se estima la necesidad bruta de riego en base a la eficiencia del método de riego:

$$Nb = Nn/Ea$$

Nb:	Necesidad bruta de riego (mm)	Ea:	Eficiencia en la aplicación
Nn:	Necesidad neta de riego (mm)		

## 1.2.2 Métodos de Riego

El agua es un factor importante en los cultivos, pues sin un uso adecuado de este recurso, los frutos no serían capaces de rendir a su máximo nivel. Para tener un buen cultivo se requiere de 450 a 550 mm de agua, dependiendo de las condiciones climáticas y del tipo de cultivo. Las formas de aplicar el agua al suelo para suplir los requerimientos hídricos del cultivo se denominan métodos de riego, los cuales pueden ser aplicados por gravedad, por goteo o por aspersión. Asimismo, es fundamental la eficiencia en la aplicación del agua, debido a que es un recurso escaso que generalmente es insuficiente para regar toda la superficie de la zona agricultora que se desea (Mendez & Inostroza, 2012).

### 1.2.2.1 Riego Gravitacional

Este método se aplica cuando se tiene agua en altura (mayormente obtenida de los ríos) y se hace uso de la altura para poder trasladarla a través de canales y surcos (estos pueden estar revestidos con concreto). El riego gravitacional consiste en inundar las parcelas del terreno mediante tomas de agua en los canales siendo este el método que utiliza el mayor volumen de agua.

Las ventajas de este sistema son:

- Bajo costo inicial.
- Se aprovecha la pendiente natural.
- No se necesitan grandes conocimientos técnicos para su uso e implementación.

Las desventajas de este sistema son:

- Alto consumo de agua.
- Favorece la proliferación de enfermedades.
- Erosión del terreno.
- Algunas partes reciben riego excesivo, otras no reciben suficiente.

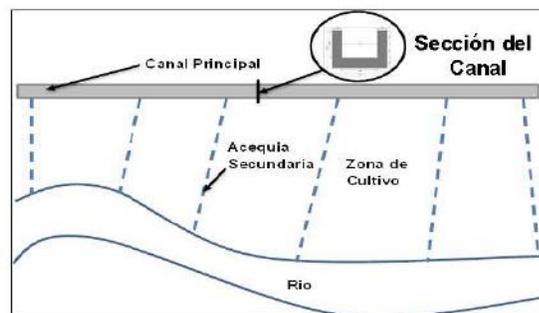


Figura 4: Sistema de Riego por Gravedad usando Canales  
Elaboración Propia

### 1.2.2.2 Riego por Goteo

En este método de riego, el agua se aplica directamente al suelo mediante mangueras, gota a gota, utilizando goteros, los cuales necesitan presión para su funcionamiento. Sin embargo, esta presión es menor en comparación a la presión requerida para aplicar riego por aspersión.

La presión se obtiene mediante un equipo de bombeo o por la diferencia de nivel entre la fuente de agua y los emisores, los cuales pueden ser tanques de agua o reservorios; esta diferencia puede ser de 3 a 10 m, de acuerdo al tipo de gotero que se utilizará.

Cuando el sistema comienza a funcionar, los goteros que están a lo largo de la manguera "gotearán" lentamente agua en la cercanía de las plantas generando un bulbo mojado (zona humedecida) que en zonas arenosas será más profundo y menos extenso en superficie (más angosto) y en arcilloso, de mayor superficie (más ancho), y de menor profundidad (Figura 5).



Figura 5: Distribución del agua por Riego por Goteo  
Fuente: (Mendoza, 2013)

Las ventajas de este sistema son:

- Se puede utilizar en todos los cultivos de hilera, es apropiado para hortalizas y frutales.
- Tiene una alta eficiencia en el uso de agua.
- Se puede utilizar en suelos con pendientes altos y en suelos delgados.
- Método de fácil manejo que no necesita de mano experimentada.
- No es afectado por el viento.
- Al reducirse la zona húmeda, se reduce la cantidad de maleza.
- No existe erosión de los suelos.

Las desventajas de este sistema son:

- Alto costo inicial.
- Se necesita de un buen diseño y de implementos necesarios.
- Facilidad de obstrucción en los orificios de los goteros.
- Se necesita de una buena supervisión de riego.

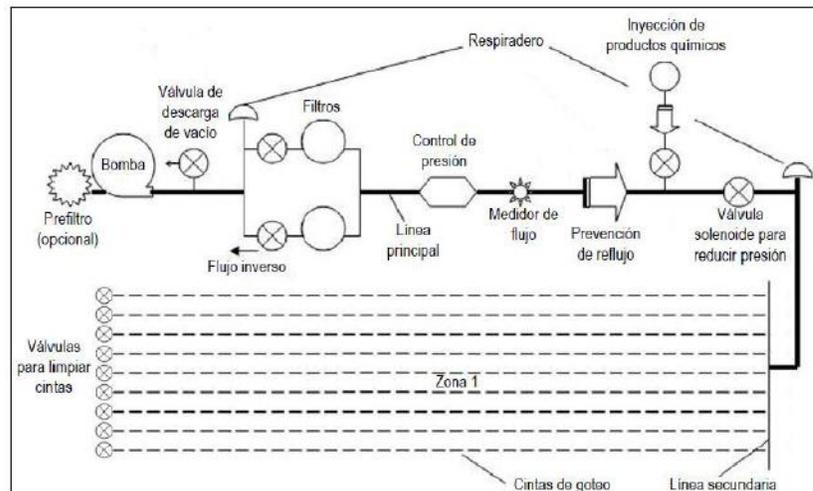


Figura 6: Sistema de Riego por Goteo convencional  
Fuente: (Shock & Welch, 2013)

### 1.2.2.3 Riego por Aspersión

Este método de riego utiliza dispositivos de emisión de agua (boquilla del aspersor) con los que riega, en forma de lluvia, todo el terreno de alcance. La característica fundamental de este sistema es la corriente de agua presurizada provista por una unidad de bombeo o motobomba. La distribución y cantidad de los aspersores se calcula de forma que cubran toda la superficie de una manera homogénea.

Las ventajas de este sistema son:

- Independiente de las características del suelo.
- No necesita nivelación o sistematización.
- Muy adaptable a rotaciones de cultivos.
- Permite automatización.
- Riego antihelada.
- Totalmente entubado.
- Moja toda la superficie del suelo.
- Permite distribuir fertilizantes y pesticidas con el agua de riego.

Las desventajas de este sistema son:

- Alto costo inicial.
- Altos requerimientos de energía.
- Dependencia de equipos mecánicos.
- Mala uniformidad del viento puede distribuir el agua de forma dispareja.
- Requiere de diseño y operación adecuados.

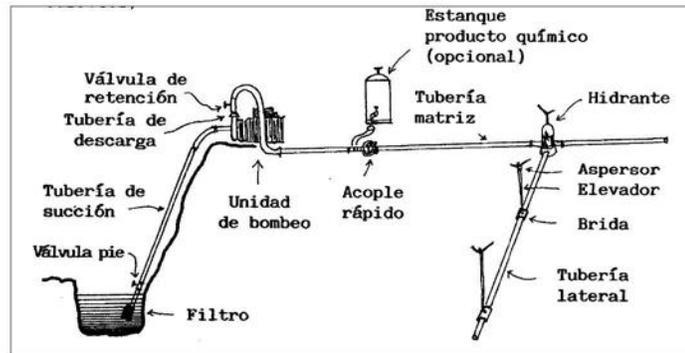


Figura 7: Esquema general de una instalación de riego por aspersión  
Fuente: (Varas & Sandoval, 1989)

### 1.2.3 Análisis y Comparación de los Métodos de Riego

Antes de analizar los diferentes métodos de riego, se debe destacar que no existe un método de riego ideal, ni tampoco se puede señalar que un método es mejor que otro si no se especifican otras variables como: cultivo a regar, características topográficas del suelo, abastecimiento de agua (cantidad y calidad), y finalmente, aspectos económicos, ya que cada método de riego tiene sus condiciones particulares de operación y manejo. Por tanto, el análisis comparativo se enfocará en el estrés hídrico que sufren los cultivos. En la figura 9, se muestran las variaciones de humedad producida por los tres métodos de riego mencionados anteriormente.

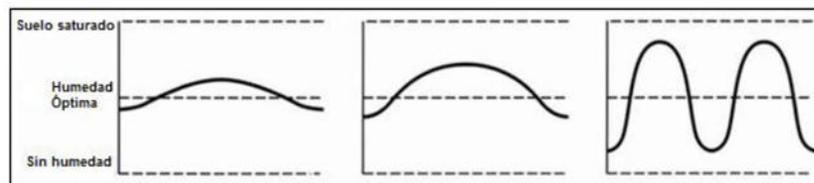


Figura 8: Variaciones de humedad de los métodos de riego  
Fuente: Técnica Internacional 2015

La figura de la izquierda corresponde a las variaciones de humedad producidas por el riego por goteo. Como se observa, los valores de humedad se mantienen cerca de la capacidad de campo (línea de humedad óptima). En la figura del centro, se muestran las variaciones de humedad producidas por un riego por aspersión, y en la figura de la derecha, aquellas variaciones producidas por el riego por gravedad, donde debido a ciclos o intervalos de riego más largos, se produce un mayor estrés hídrico (demanda de agua mucho mayor a lo que se requiere).

De este modo al controlar la frecuencia y la proporción en la que el agua es aplicada, la humedad del suelo es optimizada con la aplicación del riego por goteo. Las grandes variaciones en la humedad del suelo causan estrés a las plantas, como se puede ver en la gráfica de riego por gravedad, afectando el crecimiento y la producción del cultivo. El riego por goteo es una herramienta de manejo de cultivos, que cuando se opera correctamente, minimiza el estrés en las plantas. El desarrollo de la técnica de riego por goteo ha marcado un antes y después en la tecnología de producción de cultivos y ha permitido un avance sustancial en otros aspectos, tales como la optimización en el uso de pesticidas hasta posteriores desarrollos como el cultivo en invernaderos y los cultivos hidropónicos (División Manejo de Aguas, 2013).

#### 1.2.4 Sistema de Riego por Goteo

Para poder implementar este sistema, existe una gran variedad de componentes y opciones para su diseño. Por ejemplo, hay una gran variación en las especificaciones de la cinta, mangueras, y emisores por goteo. Asimismo, el sistema de distribución así como las válvulas y las bombas deben ser los adecuados para dichas cintas. También hay que tener en consideración el tipo de cultivo, propiedades del suelo, distancia entre cintas y emisores, la tasa de flujo, y el programa de riego. A continuación, se presentan los componentes que forman parte de un sistema de riego por goteo.

##### 1.2.4.1 Fuente de Energía

Para asegurar su funcionamiento, el sistema necesita de una fuente de energía que permita la circulación del agua. Se necesita recuperar las pérdidas de energía que se dan en el filtrado, tuberías y accesorios; y así, ofrecer a los emisores la presión necesaria para hacer efectivo el riego.

Esta energía puede ser obtenida mediante el uso de equipos de bombeo o mediante la energía potencial que se genera a partir de la diferencia de nivel entre el reservorio o tanque, donde se encuentra el agua, y el nivel de la parcela de riego. Los equipos de bombeo pueden funcionar con motores de combustión interna o motores eléctricos.

Un motor, directamente acoplado a la bomba o mediante algún tipo de transmisión, proporciona la energía suficiente para el giro que se da dentro de este. También se tienen los motores eléctricos, que ofrecen en la mayoría de los casos, grandes ventajas

con respecto a los motores de combustión, siempre y cuando se cuente con una fuente de energía eléctrica para su funcionamiento.

Las bombas que más se utilizan para este tipo de sistema son, según su eje de rotación, las bombas horizontales y las bombas verticales, las cuales se detallan a continuación:

#### a) Bombas Horizontales

Este tipo de bomba se puede identificar fácilmente, ya que tanto el motor como la bomba se diferencian a simple vista. Estos se conectan mediante una manguera flexible o unión directa especial en motores eléctricos y, con poleas y correas o eje cardán, en motores diesel.

Los modelos de bombas horizontales (Figura 9) más usados en riego, son del tipo unicelular (un solo impulsor), de aspiración axial (esta se produce por el centro del impulsor) e impulsión lateral. Su capacidad de elevación en altura manométrica, difícilmente supera los 60-70 metros.

En estos casos, la alineación correcta de los dos elementos es fundamental para prevenir posibles averías de los cojinetes de ambas máquinas. Cuando se pretende conseguir una mayor altura manométrica, se suele recurrir a utilizar bombas con varios impulsores montados en serie (bombas multietapas). Con esta disposición se consigue multiplicar, por el número de impulsores existentes, la altura manométrica proporcionada por uno de ellos para un mismo caudal (Mendoza, 2009).



Figura 9: Modelo de una bomba horizontal  
Fuente: bombas-ideales.com

#### b) Bombas Verticales

Estas bombas están diseñadas para uso en pozos profundos en donde el nivel dinámico del agua se encuentra superando los 5 m. La característica principal de esta bomba es que está sumergida (a la profundidad que requiera el nivel dinámico) y el motor está instalado en la superficie. La transmisión se realiza mediante un eje, a

veces de decenas de metros, que se instala en el interior de la tubería de impulsión, sujetado mediante cojinetes. En la Figura 10 se muestra este tipo de bomba.



Figura 10: Bomba Turbina Vertical para Pozo Profundo  
Fuente: SAGRISA

En algunos casos, cuando la profundidad empieza a ser considerable (no se recomienda su instalación a más de 80-90 m de profundidad), este tipo de bombas deja de ser rentable por diversos motivos, entre ellos se encuentran el desgaste y averías debido a una inexacta verticalidad del 100%, un elevado costo de instalación, las grandes pérdidas de rendimiento, y un elevado costo de manteniendo. Estas bombas pueden ser accionadas por motores diésel o por tractor, mostrado en la Figura 11.



Figura 11: Bomba pozo profundo  
Fuente: youtube

#### 1.2.4.2 Cabezal de Control

El cabezal de control consiste en todos los implementos necesarios para tratar, medir y filtrar el agua, así como, comprobar la presión con la que circulará y ayudará en la incorporación de fertilizantes. Si es necesario se puede incluir un equipo de bombeo

que dotará al agua de la presión necesaria para alcanzar el punto más alejado de la red, el cual puede formar parte del cabezal o estar alojado en un lugar independiente. Si se sabe que el agua llega al sistema desde una toma de agua localizada en un sitio lo suficientemente alto (diferencia de niveles) para proporcionar la presión requerida, no es necesaria esta instalación.

Existe una gran variedad de cabezales, elemento del cual depende el éxito o fracaso del riego, por lo que se debe prestar mucha importancia, pues con esto se regula el suministro de agua, la fertilización, aplicación de pesticidas, etc.

Los cabezales constan básicamente de:

#### a) Válvula compuerta

Este tipo de válvula permite el paso del fluido mediante el levantamiento de una compuerta o cuchilla, la cuál puede ser redonda o rectangular. Las ventajas en el uso de este implemento son su alta capacidad, cierre hermético, bajo costo, poca resistencia a la circulación, diseño, y funcionamiento sencillo. Por otro lado, las válvulas compuerta no son empleadas para regular el flujo. En la Figura 12 se muestra diferentes modelos de válvulas compuertas.



Figura 12: Modelos de válvulas de compuerta  
Fuente: ABE riego

#### b) Válvula de aire

El aire del sistema de riego por goteo debe ser controlado. Este aspecto es vital para evitar el vacío que puede causar problemas y daños al sistema, ya que de este modo se evita la succión de suciedad a través de los goteros, así como daño de algunas tuberías y sus accesorios. En la Figura 13 se muestra diferentes modelos de válvulas de aire.



Figura 13: Modelos de válvulas de aire  
Fuente: Tubería Moreno

### c) Filtro de anillos

Los filtros de anillos (Figura 14) están compuestos por anillos plásticos ranurados, que en conjunto forman una columna de filtrado. Este filtro se utiliza para el filtrado de control en procesos industriales con agua que contiene partículas orgánicas. En este implemento se pueden cambiar los anillos plásticos por cartuchos filtrantes o por rejillas.



Figura 14: Modelos de filtro de anillos  
Fuente: (Mendoza, 2009)

### d) Arco de riego con válvula de bola

Los arcos de riego con una válvula de bola o válvula de esfera (Figura 15) son utilizados para regular el flujo del fluido canalizado y se caracterizan por la forma esférica perforada de su mecanismo regulador, el cual está situado en el interior.



Figura 15: Válvula de bola  
Fuente: Válvulas y Medidores

### 1.2.4.3 Sistema de fertirrigación

La fertirrigación (Figura 16) es una técnica que permite la aplicación simultánea de agua y fertilizantes a través del sistema de riego, lo cual es opcional si se conoce que fertilizantes pueden ser aplicados a los cultivos. La fertirrigación trata de aprovechar los sistemas RLAF (Riegos Localizados de Alta Frecuencia) para aplicar los nutrientes necesarios a las plantas. A pesar de utilizarse en múltiples sistemas RLAF, la técnica de la fertirrigación es implementada muchas veces en el sistema de riego por goteo.

Las ventajas de la fertirrigación son:

- Dosificación racional de los fertilizantes.
- Ahorro considerable de agua.
- Utilización de aguas incluso de mala calidad.
- Nutrición del cultivo optimizada y aumento de rendimientos y calidad de frutos.
- Control de la contaminación.
- Mayor eficacia y rentabilidad de los fertilizantes.
- Adaptación de los fertilizantes a un cultivo bajo condiciones climáticas determinadas.

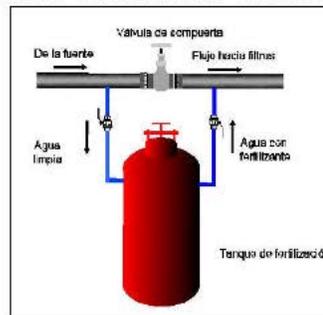


Figura 16: Esquema de funcionamiento del sistema de fertirrigación  
Fuente: (Mendoza, 2009)

#### 1.2.4.4 Red de Tuberías

La red de tuberías o red de distribución está formada por las tuberías que llevan el agua filtrada y tratada desde el cabezal a la parcela a regar.

La red de tuberías del sistema de riego por goteo dependerá del tamaño de la superficie de riego; en sistemas pequeños pueden existir tres tipos de tuberías: principal, múltiple o manifold, y laterales o porta goteros.

Para las tuberías se tienen:

- Tuberías de PVC (Figura 17)
- Tuberías de polietileno (Figura 18)



Figura 17: Tuberías PVC  
Fuente: Arquigrafico



Figura 18: Tuberías de Polietileno  
Fuente: Tu riego

#### 1.2.4.5 Goteros o emisores

Los goteros o emisores son los dispositivos por medio de los cuales se aplica el agua al suelo donde se encuentran ubicados los cultivos. Dado que el agua que circula en los laterales de riego posee presión, los goteros disipan la presión del agua de tal

forma que sale a la atmósfera sin presión, en forma de gota. La clasificación es la siguiente (Mendoza, 2009):

**a) Por su instalación en la tubería**

- **En la línea:** Son aquellos goteros que se instalan cortando la tubería e insertando los extremos del gotero en los sitios donde se hizo el corte. El agua circula por el interior del gotero, que forma parte de la conducción.
- **Sobre la línea:** (goteros de botón o goteros pinchados), se instalan en la tubería en un orificio realizado con un equipo de perforación, estos goteros se pueden colocar en tuberías de distintos diámetros.
- **En integración o integrados:** Estos goteros se implantan en la tubería de polietileno durante el proceso de extrusión de la misma, con distintos espaciamientos (30 cm, 50 cm, etc.) y distintos caudales, se encuentran termosoldados en el interior. En ocasiones los diámetros de las tuberías con goteros integrados son diferentes a los usuales, lo que obliga a utilizar elementos de conexión especiales.
- **Cintas de riego:** Otra clase especial de riego por goteo es la cinta de riego que consiste en una tubería integral de paredes delgadas con orificios en la misma cinta o goteros termosoldados en su interior.

En la Figura 19 se muestran los diferentes tipos de goteros y emisores.



Figura 19. Goteros según su instalación en la tubería  
Fuente: (1) Jaendlima, (2) Hydroerv, (3) elriego, (4) agroterra

**b) Por su comportamiento hidráulico**

- **Normales o estándar:** Son goteros que a mayor presión existente proveen de mayor caudal de agua. Este tipo de goteros a su vez pueden ser de conducto largo, laberinto u orificio.
- **Autocompensantes:** Son goteros que mantienen el caudal dentro de un determinado rango de presión, al que se denomina intervalo de compensación.

Son indicados para lugares donde hay grandes diferencias de presión debidas a desniveles topográficos o cuando existen, a lo largo de la tubería lateral, grandes pérdidas de carga.

#### 1.2.4.6 Dispositivos de control

Estos dispositivos se emplean para medir el caudal, el volumen de agua o bien la presión en cualquier punto del sistema. Su instalación es imprescindible para tener información de cómo se está realizando el riego. Estos dispositivos pueden ser:

- Medidores de caudal (Figura 20)
- Medidores de presión (Figura 21)



Figura 20: Medidor de caudal  
Fuente: Zenner



Figura 21: Medidor de presión  
Fuente: Toro

### 1.3 Casos de Estudio

A continuación, se presentan tres casos de estudio, donde se aplican conceptos relacionados a la programación lineal, la programación entera, así como, la metodología de riego por goteo.

#### 1.3.1 Modelo de localización - asignación aplicada a servicios públicos urbanos: análisis espacial de Centros de Atención Primaria de Salud (caps) en la ciudad de Luján, Argentina

La aplicación de procedimientos de análisis geográficos orientados a la planificación de servicios es un campo de investigación de gran dinamismo en Argentina. Un ejemplo claro de esto es el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE). (Revelle & Swain, 1970; Austin, 1974; McAllister, 1976).

En este ámbito, Gustavo Buzai aplicó un análisis basado en la estructura espacial vectorial compuesta por puntos, arcos (líneas) y polígonos (áreas), así como conocimientos de problemas de cobertura máxima y p-mediano para los casos de localización. La aplicación se enfoca en el análisis de la distribución espacial de los servicios de salud como tema fundamental de desarrollo procedimental con SIG en el marco de los estudios de Geografía de la Salud (Buzai, 2009; Fuenzalida, 2010).



Figura 22: Los 12 CAPS localizados originalmente  
Fuente: (Buzai, 2011)

La figura 22 presenta el área de estudio mostrando la red de calles, límites de radios censales, y la localización de los 12 CAPS (Centros de Atención Primaria de Salud) existentes, los cuales con una finalidad de modelización, fueron asignados al centroide del radio censal correspondiente. El primer cálculo realizado logró determinar la mejor ubicación para un total de 12 CAPS, de un total de 70 puntos.

Para la obtención de dicho resultado se utilizó el modelo de localización de cobertura máxima con un número de instalaciones a localizar "P=12". Por medio de este modelo se seleccionaron los sitios candidatos para capturar la totalidad de la población de demanda. Adicionalmente, se estableció una distancia restrictiva de 1500 metros. Es decir, que ningún habitante del área de estudio se ubique a más de 1 500 metros del CAPS (Centro de Atención Primaria de Salud) más cercano.

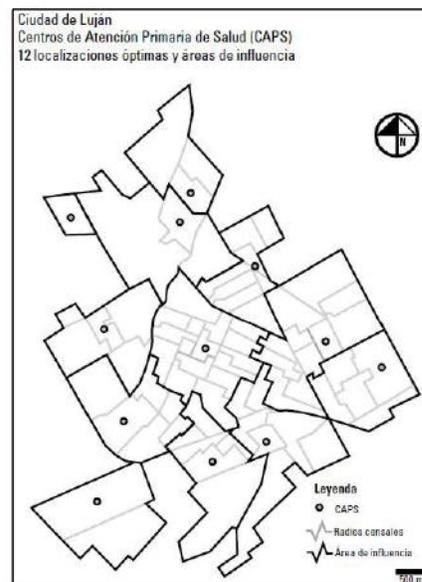


Figura 23: Área de influencia  
Fuente: (Buzai, 2011)

La figura 23 muestra el mapa con los doce centros óptimos obtenidos y la figura 24 el mapa de araña (alcance de cada punto) realizado a partir de los centros y la asignación de demanda desde los radios censales incluidos dentro de cada área de influencia.

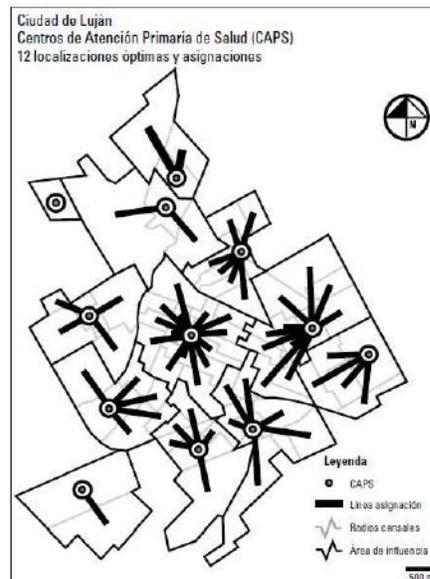


Figura 24: Asignación de demanda potencial con cada alcance  
Fuente: (Buzai, 2011)

### 1.3.2 Modelo de Optimización del área óptima de cultivo en un sistema con reservorio

La programación de riego, en el caso del limitado uso del suministro de agua, ha sido ampliamente estudiada en zonas de un solo cultivo. Sin embargo, la mayoría de las zonas de riego cuentan con la presencia de varios cultivos en simultáneo. En este sentido, en el año 2007 Mahdi Moradi-Jalal, Omid Bozorg, Bryan Karney y Miguel Mariño presentaron un modelo de programación lineal para obtener el patrón óptimo de cultivos múltiples y áreas de riego asociadas con el adecuado funcionamiento del uso de un reservorio, y la programación de riego en un sistema de embalse-riego considerando la operación de depósito mensual óptimo, así como cultivos anuales óptimos y área asignada a cada cultivo en simultáneo.

El sistema embalse-riego se caracteriza por dos componentes principales: el flujo mensual de agua de riego y las zonas de riego estacionales. El único parámetro de entrada del depósito es el flujo de corriente mensual, mientras que los parámetros de salida son las áreas de riego óptimas suministradas por agua liberada desde el depósito. Un diagrama esquemático del sistema embalse-riego se presenta en la Figura 6. El agua mensual consta de: (1) Las liberaciones del depósito cuando este no está completamente lleno, esto se define mayor que la demanda mensual de agua de riego por el modelo de optimización, y (2) las liberaciones de depósito cuando el agua

almacenada excede la capacidad de embalse. En el primer caso, después de suministrar la demanda por el sistema de riego, el exceso de agua es transportado a través del río aguas abajo de la ingesta de riego del sistema.

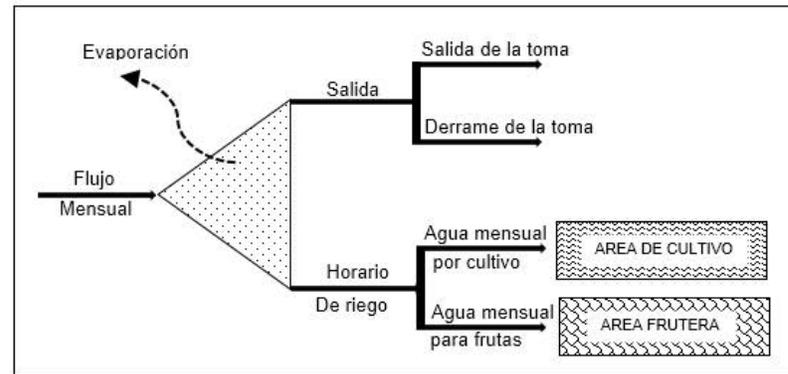


Figura 25: Diagrama esquemático del sistema  
Fuente: (Moradi-Jalal, Bozorg, Karney, & Mariño, 2007)

Para ello, antes de explicar el modelo propuesto por Moradi-Jalal et al (2007), se definirán las variables utilizadas en su programación:

- $A_{i,m}$ : Área de la superficie libre del embalse en el mes  $m$  año  $i$  ( $m^2$ )
- $A_{fr}$ : Área máxima de frutas y hortalizas (ha)
- $A_{arg}$ : Área máxima de cultivos (ha)
- $C$ : Unidad de beneficio de los cultivos y/o producciones de frutas (\$/ha)
- $(EV)_{m,i}$ : Volumen de la evaporación del reservorio en el mes  $m$  año  $i$  ( $m^3$ )
- $f$ : Número de frutas producidas
- $i$ : Año de cultivación
- $k$ : Número de producciones de cultivos agrícolas
- $m$ : Mes del programa de riego
- $n$ : Número de años en el horizonte de planificación
- $p$ : Tipo de cultivo
- $Q_{m,i}$ : Descarga de flujo de río en el mes  $m$  año  $i$  ( $m^3$ )
- $S_{i,m}$ : Volumen de agua almacenada en el extremo en el mes  $m$  año  $i$  ( $m^3$ )
- $u$ : Tipo de fruta
- $(V_{m,i})_p$ : Tarifa unitaria de la demanda de agua de riego para la producción de hortalizas en el mes  $m$  año  $i$
- $(V_{m,i})_u$ : Tarifa unitaria de la demanda de agua de riego para la producción de frutas en el mes  $m$  año  $i$
- $(V_s)_{m,i}$ : Volumen de agua almacenada en el mes  $m$  para el próximo mes del año  $i$  ( $m^3$ )
- $V_{dam}$ : volumen máximo de almacenamiento ( $m^3$ )
- $X$ : área de cultivo de plantas y/o frutas (ha)
- $\alpha$  y  $\beta$ : Coeficientes de la curva de área-volumen

La función objetivo del modelo de embalse-riego busca maximizar los beneficios anuales del sistema de depósito-riego. Los beneficios totales del sistema para este caso son el resultado de cultivos agrícolas (trigo, soja, etc.) y las huertas (manzana, almendra, etc.). Por ello la formulación de la función objetivo sería:

$$MAX \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^k C_{i,p} X_{i,p} + \sum_{i=1}^n \sum_{u=1}^f C_{i,u} X_{i,u} \right] \quad (1)$$

El volumen de evaporación desde el depósito depende de la zona media de la superficie libre del almacenamiento. La superficie libre es una función explícita del volumen actual de almacenamiento. Con el fin de considerar el efecto de la evaporación en el depósito durante el horizonte de planificación, la relación de la curva área-volumen del sistema de depósito se debe aplicar para obtener la superficie libre del depósito en todos los meses operativos, por eso para evaluar el valor de la evaporación se tiene:

$$A_{i,m} = \alpha x S_{i,m} + \beta \quad \text{para } i = 1, \dots, n, \text{ y } m = 1, \dots, 12 \quad (2)$$

Donde  $A_{i,m}$  es el área de la superficie libre del embalse en el mes  $m$  del año  $i$  ( $m^2$ ) y  $S_{i,m}$  es el volumen de agua almacenada en el mes  $m$  del año  $i$  ( $m^3$ ). Los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  se pueden obtener a partir de la regresión de la relación área-volumen de la curva original que representa la topografía.

La tercera restricción es una combinación de áreas de riego fijos y variables que se considera en el modelo de optimización actual mientras modelos previos han tratado solamente con áreas de riego variable. La ecuación de control del volumen se aplica a todas las operaciones mensuales del sistema:

$$\sum_{p=1}^k (V_{m,i})_p X_{i,p} + \sum_{u=1}^f (V_{m,i})_u X_{i,u} + (EV)_{m,i} + (VS)_{m,i} = (VS)_{m-1,i} + Q_{m,i} \quad \text{para } i = 1, \dots, n \text{ y } m = 1, \dots, 12 \quad (3)$$

Donde  $(V_{m,i})_p$  es la tarifa unitaria de la demanda de agua de riego para la producción de cultivos en el mes  $m$  año  $i$ ;  $(V_{m,i})_u$  es la tarifa unitaria de la demanda de agua de riego para la producción de fruta en el mes  $m$  año  $i$ ;  $m$  el mes actual del programa de riego;  $Q_{m,i}$  es la descarga de flujo de río en el mes  $m$  año  $i$  ( $m^3$ );  $(EV)_{m,i}$  es el volumen de la evaporación del reservorio en el mes  $m$  año  $i$  ( $m^3$ ); y  $(Vs)_{m,i}$  es el volumen de agua almacenada en el mes  $m$  para el próximo mes del año  $i$  ( $m^3$ ).

La ecuación (3) denota el balance de masas mensual del sistema, estableciendo un equilibrio entre los volúmenes de agua de riego y de entrada (flujo de corriente). El

área asignada de la agricultura es limitada en el horizonte de planificación y el área sembrada con hortalizas es menor que el área máxima de cultivo:

$$\sum_{p=1}^k X_{i,p} \leq A_{arg} \text{ para } i = 1, \dots, n \quad (4)$$

Donde  $A_{arg}$  es el área máxima de hortalizas (ha). Del mismo modo, se establece la limitación para la zona de frutales

$$\sum_{u=1}^f X_{i,u} \leq A_{frt} \text{ para } i = 1, \dots, n \quad (5)$$

El sistema también está limitado por el volumen total de agua almacenada en el depósito:

$$(VS)_{m,i} \leq V_{dam} \text{ para } i = 1, \dots, n \text{ y } m = 1, \dots, 12 \quad (6)$$

Donde  $V_{dam}$  es el volumen máximo de almacenamiento (m<sup>3</sup>). Es decir, el almacenamiento en depósito meses  $m$ -ésimo de año  $i$  debe ser menor que el volumen total del depósito. Además, hay una restricción sobre las superficies plantadas de frutas y jardines. Por lo tanto, la siguiente restricción, la ecuación (7), implica que el área asignada para huertos y jardines es constante durante el horizonte de planeación:

$$(X_{i,u})_m = (X_{i+1,u})_m \text{ para } i = 1, \dots, n \quad m = 1, \dots, 12 \text{ y } u = 1, \dots, f \quad (7)$$

Con el fin de evitar que cada año se traspase el almacenamiento del depósito, se supone que el almacenamiento del depósito inicial en el primer mes del horizonte de planificación es igual a la del almacenamiento del depósito al final del horizonte de planificación:

$$(VS)_{1,1} = (VS)_{m,n} \quad (8)$$

Además, se impone una restricción de no negatividad en el modelo de modo que las variables de decisión no sean valores negativos.

### 1.3.3 Riego por Goteo: Fortalecimiento de la Cadena productiva del Palto en el Distrito de Torata

Southern Perú, una de las mineras de cobre importantes en el país, ha establecido una política de ayuda social, apoyando en el desarrollo de las comunidades situadas en la zona de influencia de sus operaciones mediante proyectos en beneficios de estas.

Uno de estos proyectos es el caso de éxito sobre la mejora en la producción de palta en el Distrito de Torata, en Moquegua, gracias a la implementación de un sistema de riego tecnificado en toda la zona de producción. El Distrito de Torata cuenta con condiciones agrícolas favorables para el desarrollo de cultivos como es el caso del Palto en sus variedades Hass y Fuerte, así también como otros cultivos de menor producción como alfalfa, papa, maíz etc; por medio por el cual el presente proyecto pretende incrementar la oferta agro de estos importantes cultivos.



Figura 26: Plaza de armas del distrito de Torata  
Fuente: Palto Torata Blogspot

El proyecto comenzó en Enero del 2013 contando con un público objetivo de 113 beneficiarios. Los productores de palto tenían la necesidad de uniformizar sus producciones agrícolas, aumentar su producción, y fortalecer sus cultivos a través de técnicas de riego y fertilización. Ellos contaban con una infraestructura de riego insuficiente y la mayoría de los agricultores no tenía los medios suficientes para implementar un riego regulado ni conocimientos para operarlo.



Figura 27: Estudio de campo en Torata  
Fuente: Palto Torata Blogspot

Por ello con el objetivo de mejorar el crecimiento y la producción de palto en el distrito de Torata, surge el proyecto llamado "Fortalecimiento de la Cadena Productiva de Palto en Torata", respaldado y financiado por Southern Perú, FONDOEMPLEO y la ONG El Taller; con el objetivo de incrementar la capacidad y la calidad productiva de los agricultores, aumentar la frontera agrícola, optimizar el consumo de agua, producir productos de calidad y aumentar del 15% de su producción total.

Tabla 5: Presupuesto de inversión para el proyecto

Programación Presupuestal	Total según convenio	Total ejecutado al entregable
Fondoempleo	US\$ 526 390	US\$ 163 719
ONG El Taller	US\$ 23 604	US\$ 8 524
SOUTHERN PERU	US\$ 71 168	US\$ 67 665
<b>TOTAL</b>	<b>US\$ 621 162</b>	<b>US\$ 239 908</b>

Fuente: Grupo México - Southern

Las acciones que se establecieron fueron la capacitación constante en temas relacionados a las buenas prácticas de cultivo, la instalación de módulos de riego, la provisión de plantones injertados, la entrega de herramientas, y la construcción de una planta física para el procesamiento del palto.

Lo que se logró en general fue capacitar a 253 productores de palta acerca de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA). Los resultados fueron: 93.5 hectáreas de cultivos de paltas con un manejo adecuado de estándares de calidad, 9 346 plantones cultivados para ampliar 20 hectáreas de cultivos, 45 agricultores certificados por SENASA, y sobre todo nueve módulos demostrativos de riego tecnificado instalados.

En el caso de los módulos de riego tecnificado, se evaluó el campo con riego por goteo y un campo con riego por gravedad, ambos del mismo dueño, con plantas de la misma edad, bajo las mismas condiciones de suelo y el mismo manejo agrícola; con el fin de medir la mejora de dicho sistema. Se tomó una muestra el 10% del total de plantas y se contó el número total de frutos por árbol considerando un peso promedio de 250 gramos por fruta de palta Fuerte y 200 gr. por fruto para la palta Hass. La parcela con riego tecnificado tuvo una producción de 38.4 Kg./planta de palta Hass, versus 20 Kg./planta de la misma variedad en el campo sin tecnificación, aumentando así en 92 %; y para lo que es la producción de palta Fuerte se logró obtener 35.5 Kg./planta en la parcela demostrativa, versus los 12.5 Kg./planta en el campo con riego por gravedad, aumentando así en 184 % en su producción total.

## CAPITULO 2. DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO

En este capítulo se describe la situación actual de la agricultura en el Perú. Asimismo, se presenta información importante sobre el Distrito de Santa Eulalia con un mayor detalle en la zona de estudio ubicada en San Gerónimo de Punan. Por otro lado, se presenta el análisis de oferta y demanda para los cultivos predominantes: la palta fuerte y chirimoya cumbe.

### 2.1 Situación actual de la Agricultura en el Perú

Desde los años sesenta la agricultura peruana ha pasado por varios cambios importantes. En 1969, se inició el proceso de la reforma agraria culminando en 1976. Esto conllevó a un proceso de parcelación en los años ochenta que atomizó a la agricultura nacional. A inicios de los noventa se produjo un cambio estructural en la economía, lo que permitió la apertura a nuevos mercados gracias a la globalización, incluyendo el mercado de la agricultura. Esto permitió que la agricultura se desarrolle gracias al “boom agroexportador” donde se ofrecían, con el apoyo del gobierno, productos de origen peruano a diferentes partes del mundo.

La agricultura es la fuente principal de ingresos de aproximadamente el 31,6% de los hogares peruanos y genera, junto al sector pecuario, el 8,3% del Producto Bruto Interno (PBI) (INEI, 2012). Tal como se puede ver en la figura 28, según el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) en el año 2014 se estimó un crecimiento del 2% en el PBI agropecuario, comparándolo con el año 2013, fue un resultado positivo, mayor al 1,4% de aumento logrado en ese mismo año. Sin embargo, este valor se ubicó muy por debajo de la tendencia de largo plazo (4,2%). En este contexto, se prevén tasas de crecimiento de 3,5% y 3,8% para los años 2015 y 2016, respectivamente.

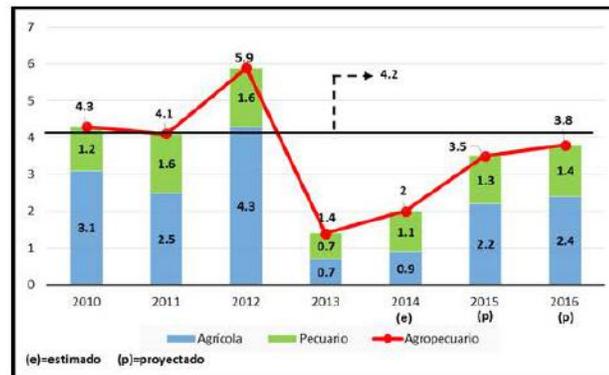


Figura 28: Crecimiento del sector agropecuario en puntos porcentuales  
Fuente: MINAGRI

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) y al IV Censo Nacional Agrario (Cenagro) realizado en el 2013, la actividad agropecuaria proporciona 13 millones 867 400 trabajos eventuales y otros 180 500 permanentes. Estos resultados también indican que según el género de los ocupados, el 81,2% de los trabajadores permanentes son hombres y el 18,8 % son mujeres. Por otro lado, en el caso de los trabajadores eventuales, la composición de género es 72,8% hombres y 27,2% mujeres. Los resultados también indican que la mayoría de los trabajadores que se dedica a la agricultura, se encuentran en la sierra, con el 45,7% de trabajadores. En la costa y en la selva se tienen concentraciones del 33% y 21,3% respectivamente.

Tabla 6: Producción Agropecuaria según subsector y principales productos en miles de toneladas (Enero – Noviembre 2013/2012)

Principales productos	2012	2013	Variación (Miles ton.)	Var. (%)
<b>Subsector agrícola</b>				
Mango	153	414	261	171,6%
Alfalfa	6 125	6 401	276	4,5%
Caña de azúcar	9 406	9 957	551	5,9%
Maíz Amiláceo	280	308	28	9,7%
Arroz Cáscara	2 779	2 814	35	1,2%
Choclo	342	376	34	10,1%
Tomate	189	220	31	16,6%
Mandarina	271	305	34	12,4%
Cacao	58	63	5	9,4%
Palta	253	269	16	6,4%
Yuca	1 015	1 072	57	5,6%
Piña	389	405	16	4,0%
Cebolla	712	707	-5	-0,6%
Maíz Amarillo Duro	1 264	1 245	-19	-1,5%
Algodón Rama	110	82	-28	-26,1%
Aceituna	93	58	-35	-37,7%
Café	314	253	-61	-19,5%
<b>Subsector Pecuario</b>				
Carne de Ave	1 302	1 332	30	2,4%
Huevo	286	321	35	12,0%
Carne de Porcino	152	156	4	2,8%
Leche	1 652	1 665	13	0,8%
Carne de Ovino	86	85	-1	-1,4%
Fibra Alpaca	4	4	0	-8,2 %

Fuente: Ministerio de Agricultura y Riego

La producción de la agricultura peruana se desarrolla en 2,5 millones de hectáreas, de las cuales el 84% se dedica a la producción de cultivos transitorios y el restante a frutales. Los principales productos agrícolas que se producen en nuestro país son el arroz, maíz amarillo, papa, maíz amiláceo, trigo, cebada grano, entre otros. La producción de estos productos entre el 2012 y 2013 fue favorable, con un crecimiento como se indica en la tabla 6.

Analizando la producción agropecuaria total, esta creció un 5,7% en el 2012 y habría crecido un 1,85% en el acumulado al mes de agosto del 2013 en comparación con el mismo periodo del año 2012. Asimismo, se evidenció un crecimiento de 1,6 % en el mismo marco temporal, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 7: Valor Bruto de la producción agropecuaria Enero – Octubre (en US\$ millones)

Actividad	2012	2013	Variación
Agrícola	11 319	11 501	1,60%
Pecuaria	7 693	7 863	2,21%
Agropecuaria	19 012	19 364	1,85%

Fuente: Ministerio de Agricultura y Riego

Como se ve en la figura 29, para febrero del 2015, la producción agropecuaria se incrementó en 2,8 %, con respecto al mismo mes del año 2014, como resultado de la mayor producción del subsector pecuario (5,9 %) y del subsector agrícola (0,4 %). Es de destacar el aumento del café, que comparándolo con el periodo 2012/2013, para el año 2015 ha contribuido con el crecimiento del valor bruto de la producción de dicho mes, es por ello que la producción agropecuaria aumentó con respecto a la del 2014 como se puede observar en la figura 30.

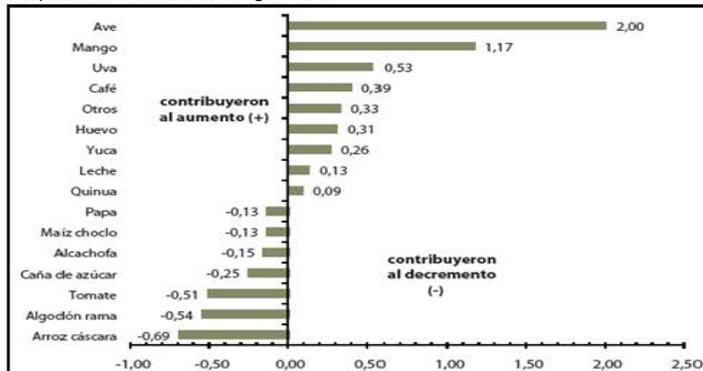


Figura 29: Principales productos en febrero del 2015

Fuente: DGESEP-DEA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dirección General de Seguimiento y Evaluación de Políticas – Dirección de Estadística Agraria

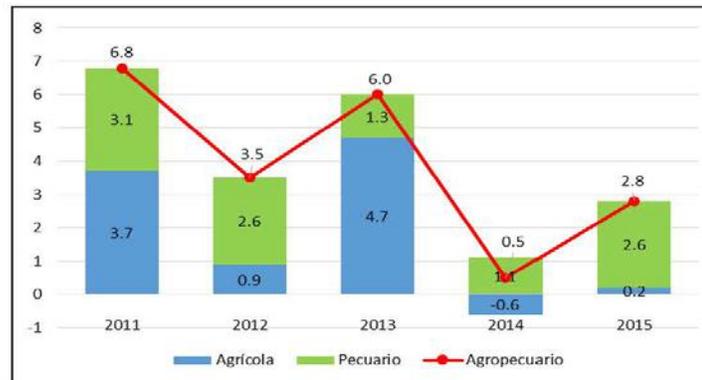


Figura 30: Producción agropecuaria (en %)  
Fuente: Ministerio de Agricultura y Riego

No obstante, en el periodo enero - febrero del 2015 la producción agropecuaria mostró un decremento en 0,1 % con respecto al similar periodo del año 2014. Este comportamiento fue resultado de la menor producción del subsector agrícola (-3,9 %); mientras que el subsector pecuario tuvo una mayor producción (4,9 %), tal como se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 8: Valor de la producción agropecuaria

Sector/Subsector	Febrero			Enero - Febrero		
	2014	2015	Var. %	2014	2015	Var. %
<b>Agropecuario</b>	2151	2212	2,8	4342	4337	-0,1
<b>Agrícola</b>	1203	1208	0,4	2467	2370	-3,9
<b>Pecuario</b>	948	1004	5,9	1875	1967	4,9

Fuente: Ministerio de Agricultura y Riego

Como se puede observar del cuadro anterior, en el mes de febrero del 2015 la producción agrícola a nivel nacional registró un crecimiento del 0,4 %, sustentado principalmente por la mayor producción de mango, uva, café, yuca y quinua.

Con todo lo anterior, el Perú es hoy en día un país con producción agrícola variada y, además, un exportador neto de productos agrícolas. En los últimos años, la exportación de productos agrícolas producidos en el Perú ha crecido significativamente, desatando el "Boom exportador", y sigue creciendo como se puede ver en la figura 31.

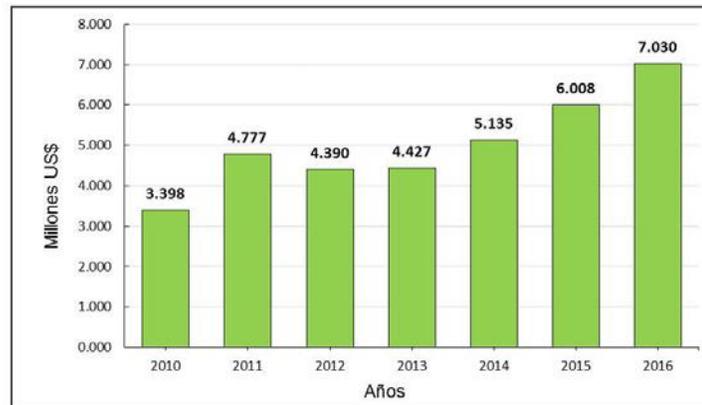


Figura 31: Agroexportaciones Anuales (Millones US\$)  
Fuente: Ministerio de Agricultura y Riego

## 2.2 La agricultura en el Valle de Santa Eulalia

En este subcapítulo se tomarán en cuenta cuatro puntos referentes a la actividad agrícola en el Valle de Santa Eulalia.

### 2.2.1 Descripción general del distrito de Santa Eulalia

El distrito de Santa Eulalia es uno de los 32 distritos de la Provincia de Huarochirí que integra la región de Lima bajo el Gobierno Regional de Lima-Provincias (Figura 32). Este distrito fue fundado en la Época de la Independencia después de proclamada la independencia un 30 de Setiembre de 1821, contando con una extensión territorial de 11 km<sup>2</sup>. Este territorio es un valle que es bañado por el río del mismo nombre, Santa Eulalia.

Este valle posee un clima muy cálido que favorece el cultivo de palta, chirimoya y otros frutos característicos de la zona. Ubicado a 1050 m.s.n.m., posee montañas áridas, rocosas y de fuerte pendiente, en las cuales, en temporada de lluvia, se puede observar la proliferación de pasto natural llamado ichu.



Figura 32: Mapa del distrito de Santa Eulalia  
Elaboración Propia

El Valle de Santa Eulalia presenta cuatro micro estaciones climatológicas. Estas son producidas debido a la presencia de sol en la mayor parte del año a excepción de los meses comprendidos entre Diciembre a Marzo, periodo en el cual comienzan las lluvias por la sierra central. En la tabla 9, se puede apreciar las micro estaciones por meses, alcanzándose temperaturas máximas de 29°C y mínimas de hasta 9°C según SENAHMI.

Tabla 9: Tiempo en Santa Eulalia

Meses	Tiempo
Dic - Mar	
Mar-Jun	
Jun-Sep	
Sep-Dic	

Fuente: SENAHMI  
Elaboración Propia

Los últimos censos realizados por el INEI a la población de Santa Eulalia muestran que para el año 2015 hubo un incremento del 0,73 % en dicha población con respecto al 2014, y ese año un 0,88 % con respecto al 2013, tal y como se puede observar en la tabla 10.

Tabla 10: Población Censada por Año calendario y Sexo en la Provincia de Huarochirí

Departamento, Provincia Y Distrito	2013			2014			2015		
	Total	Hombre	Mujer	Total	Hombre	Mujer	Total	Hombre	Mujer
<b>Huarochirí</b>	<b>80011</b>	<b>42452</b>	<b>37559</b>	<b>80854</b>	<b>42957</b>	<b>37897</b>	<b>81696</b>	<b>43463</b>	<b>38233</b>
Matucana	3937	1943	1994	3808	1876	1932	3680	1810	1870
Antioquia	1291	681	610	1265	665	600	1238	648	590
Callahuanca	3611	1772	1839	3841	1874	1967	4080	1980	2100
Carampoma	1621	860	761	1704	911	793	1788	964	824
Chicla	7603	5570	2033	7620	5656	1964	7632	5737	1895
Cuenca	402	242	160	399	243	156	395	244	151
Huachupampa	2454	1207	1247	2630	1292	1338	2814	1381	1433
Huanza	2468	1237	1231	2570	1287	1283	2674	1338	1336
Lahuaytambo	723	378	345	699	365	334	674	352	322
Laraos	1985	1004	981	2137	1086	1051	2298	1173	1125
Mariatana	1356	720	636	1333	710	623	1309	699	610
Ricardo Palma	6102	3058	3044	6105	3063	3042	6103	3065	3038
San Andres de Tupicocha	1326	660	666	1297	645	652	1268	630	638
San Antonio	5280	2691	2589	5377	2741	2636	5469	2789	2680
San Bartolome	2166	1083	1083	2219	1106	1113	2271	1129	1142
San Damian	1275	642	633	1229	619	610	1183	596	587
San Juan de Iris	1554	813	741	1661	868	793	1772	925	847
San Juan de Tantarache	481	250	231	476	249	227	471	248	223
San Lorenzo de Quinti	1592	816	776	1562	802	760	1532	788	744
San Mateo	5158	2820	2338	5090	2792	2298	5017	2761	2256
San Mateo de Otao	1684	843	841	1643	819	824	1603	796	807
San Pedro de Casta	1301	692	609	1302	694	608	1303	696	607
Santa Cruz de Cocachacra	2467	1245	1222	2472	1247	1225	2477	1249	1228
Santa Eulalia	11599	5694	5905	11701	5737	5964	11787	5772	6015
Santiago de Anchucaya	543	258	285	533	254	279	522	249	273
Santiago de Tuna	721	381	340	726	384	342	729	385	344
Santo Domingo de Los Olleros	4216	2253	1963	4457	2381	2076	4705	2514	2191
Surco	1936	1047	889	1937	1049	888	1938	1051	887

Fuente: INEI

### 2.2.2 Costumbres y Festivales del distrito de Santa Eulalia

El distrito de Santa Eulalia se caracteriza por sus costumbres y por sus paisajes, pues existen en la zona varios lugares turísticos para visitar y conocer, así como días festivos. Entre estas festividades podemos mencionar:

- **Festival de la Pachamanca:** Existen varios clubes campestres que ofrecen este plato andino, el cual rinde tributo a la Madre Tierra o Pachamama. La celebración de este evento es anual, y no cuenta con una fecha específica. Durante esta festividad, los restaurantes ofrecen este plato típico de la zona en cantidad y a un menor costo para el deleite de los pobladores y turistas que los visitan. La preparación del mismo se realiza de forma artesanal y de acuerdo a la tradición colonial (figura 33).



Figura 33: Festival de la Pachamanca  
Fuente: Jack Noticias 2015

- **Festival de la Palta:** Este evento también es otra forma de rendir tributo a la tierra, por lo que son normales los rituales andinos durante su celebración. Este festival se realiza anualmente en Santa Eulalia con la intención de promocionar el ecoturismo en la zona e incentivar la agricultura (figura 34). La festividad se realiza en conjunto con otros eventos como bailes sociales, conciertos, concursos, competencias deportivas, y ferias comerciales.



Figura 34: Festival de la Palta  
Fuente: Jack Noticias 2015

- **Festival Lítico:** Este evento tiene como propósito la conservación de las costumbres artesanales en materia lítica que poseen algunos pobladores en el distrito. Este festival maneja tres procesos importantes: el bloque, el enchapado y el tallado de piezas que serán posteriormente expuestas.

Asimismo, el Distrito de Santa Eulalia se caracteriza por poseer un clima muy cálido. Esto favorece al turismo en la zona, pues cuando la ciudad de Lima se encuentra en invierno, este distrito cuenta con un cielo despejado en presencia del sol; por ello, existen diferentes clubes de esparcimiento, restaurantes, áreas verdes, y pequeños zoológicos.

### 2.2.3 Descripción de la comunidad en estudio

La comunidad de San Gerónimo de Punan se localiza al Noreste del distrito de Santa Eulalia, en el margen de la parte derecha del río Santa Eulalia. Se extiende desde los 1540 a los 1650 m.s.n.m. presentando un clima óptimo para el cultivo de frutales como el chirimoyo, palto, paca, lúcuma, entre otros.

La comunidad tiene los siguientes límites:

- Por el Norte con el Distrito de San Antonio de Chaccla.
- Por el Sur con el Distrito de Callahuanca.
- Por el Este con el Distrito de Callahuanca.
- Por el Oeste con los Distrito de San Antonio de Chaccla.



Figura 35: Ubicación de la comunidad San Gerónimo de Punan  
Fuente: Blog Conquistador de lo inútil

El área del proyecto es accesible desde la ciudad de Lima vía la carretera central Lima-Chosica-Santa Eulalia-San Gerónimo de Punan. De Lima a Chosica (comenzando del puente Santa Anita) hay una distancia aproximada de 40 km, después de la cual existe un desvío al lado derecho con dirección a Santa Eulalia, desde allí son aproximadamente 6 Kilómetros más para llegar a la comunidad, siendo la longitud promedio unos 52 km desde la ciudad de Lima.

#### a) Características de la Comunidad

La comunidad de San Gerónimo de Punan se localiza en los flancos orientales de la cordillera central, cuenca baja del río Santa Eulalia, en el distrito de Santa Eulalia; se ubica a una distancia de 52 km de la ciudad de Lima, a una altitud de 1650 m.s.n.m. en promedio, a 11°46'60" latitud sur y 76°37'60" longitud oeste del meridiano Greenwich, perteneciente a las cordilleras occidentales y central de los andes peruanos, correspondiente a la jurisdicción de la región Lima.



Figura 36: Plaza de San Gerónimo de Punan  
Elaboración Propia

La zona de estudio tiene temperaturas medias de 20.5 °C grados durante el año con precipitaciones pluviales medias entre los meses de Enero a Marzo. El valle presenta suelos de origen aluviales para la agricultura, con una pendiente muy suave pero pronunciada.

#### b) Cultivos Predominantes:

El área de influencia del canal de San Gerónimo de Punan abarca parcelas donde se siembra principalmente árboles frutales como: palto y chirimoyo. Estos árboles se clasifican en dos: adultos (6 años a mas) y plantones (2 a 5 años). La tabla 11 y la tabla 12 muestran la distribución de las parcelas por propietario, así como la cantidad de árboles frutales y la producción aproximada del año 2014 para palta y chirimoya respectivamente. Dichos datos se obtuvieron con la información brindada por el presidente del comité de riego de San Gerónimo de Punan.

Tabla 11: Número de árboles y producción de palta por familia

Nombres y Apellidos	Extensión m2	Palta - Producción		
		Tipo de Arbol	Cantidad de cultivos	Producción (Kg/año)
Rosa Coter de Bautista	22,000	Adultos	100	9,500
		Plantones	20	120
Irma Ludeña Marquez	16,200	Adultos	30	900
		Plantones	40	160
Clementino Perez Sanchez	20,000	Adultos	164	16,400
		Plantones	-	-
Mercedes Haro	12,000	Adultos	150	12,500
		Plantones	5	70
Felix Narciso Carhuavilca	12,400	Adultos	50	5,200
		Plantones	10	120
Juan Pariona Huarcaya	4,200	Adultos	15	1,400
		Plantones	-	-
Roberto Ludeña Marquez	3,200	Adultos	12	1,100
		Plantones	-	-
Jacinto Perez Sanchez	12,600	Adultos	15	900
		Plantones	-	-
Galindo de la Cruz Mantilla	4,800	Adultos	20	2,200
		Plantones	15	180
Juan Caypo	50,000	Adultos	45	3,600
		Plantones	15	120
Otto Huamanyauri Contreras	20,000	Adultos	12	1,000
		Plantones	-	-
Alejandro Utus	2,000	Adultos	10	130
		Plantones	-	-
Juan Mazzini Medina	8,000	Adultos	20	2,300
		Plantones	18	160
Olga Ludeña Gonzales	4,600	Adultos	5	400
		Plantones	-	-
Margarita Mazzini Medina	10,000	Adultos	50	4,200
		Plantones	20	160
Julia Rosadio	48,800	Adultos	80	6,000
		Plantones	90	1,000
Hector Huaman Ludeña	25,600	Adultos	20	2,600
		Plantones	15	280
Arturo Villarroel Ludeña	6,600	Adultos	6	720
		Plantones	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>283,000</b>			

Elaboración Propia

Tabla 12: Número de árboles y producción de chirimoya por familia

Nombres y Apellidos	Extensión m2	Chirimoya - Producción		
		Tipo de Arbol	Cantidad de cultivos	Producción (Kg/año)
Rosa Cotera de Bautista	22,000	Adultos	1050	38,000
		Plantones	50	200
Irma Ludeña Marquez	16,200	Adultos	550	18,700
		Plantones	150	640
Clementino Perez Sanchez	20,000	Adultos	635	22,600
		Plantones	-	-
Mercedes Haro	12,000	Adultos	450	15,650
		Plantones	115	270
Felix Narciso Carhuavilca	12,400	Adultos	560	21,500
		Plantones	30	120
Juan Pariona Huarcaya	4,200	Adultos	100	3,750
		Plantones	-	-
Roberto Ludeña Marquez	3,200	Adultos	120	3,900
		Plantones	30	142
Jacinto Perez Sanchez	12,600	Adultos	90	2,500
		Plantones	-	-
Galindo de la Cruz Mantilla	4,800	Adultos	100	3,900
		Plantones	30	130
Juan Caypo	50,000	Adultos	60	2,200
		Plantones	20	100
Otto Huamanyauri Contreras	20,000	Adultos	400	14,200
		Plantones	30	220
Alejandro Utus	2,000	Adultos	40	1,400
		Plantones	-	-
Juan Mazzini Medina	8,000	Adultos	350	10,200
		Plantones	15	60
Olga Ludeña Gonzales	4,600	Adultos	20	550
		Plantones	-	-
Margarita Mazzini Medina	10,000	Adultos	450	17,000
		Plantones	-	-
Julia Rosadio	48,800	Adultos	815	22,000
		Plantones	40	280
Hector Huaman Ludeña	25,600	Adultos	500	15,000
		Plantones	100	400
Arturo Villarroel Ludeña	6,600	Adultos	22	600
		Plantones	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>283,000</b>			

Fuente: Elaboración propia

**c) Situación del Riego Actual:**

El sistema de riego actual se compone de un canal principal y uno secundario a lo largo de la zona agrícola. Ambos canales son artesanales, sin revestimiento de concreto en la mayor parte de su longitud, con sección irregular y son alimentados por una bocatoma tomada desde el río Santa Eulalia. La metodología de riego aplicada es por gravedad a través de compuertas manuales ubicadas a lo largo de ambos canales, sin embargo, este método no permite entregar agua a los cultivos de forma uniforme, lo cual tiene un impacto en el rendimiento productivo de los mismos. Asimismo, se evidencia un uso ineficiente del agua, desventaja propia de la metodología empleada.



Figura 37: Tramo del canal de riego de San Gerónimo de Punan  
Fuente: Elaboración Propia

El problema existente del sistema de riego actual es la falta de confiabilidad en el rendimiento de productos debido a una inadecuada gestión del agua originando el abandono de los terrenos de este sector. Los turnos de riego bordean los 21 días, generando un estrés hídrico a las plantas, lo que influye negativamente en el rendimiento productivo de los cultivos, tal como se ve en la figura 38. Dicho cuadro se obtuvo con la información brindada por el presidente del comité de riego.

Nombre y Apellidos	Tiempo	Día	Hora	A	Día	Hora
ROSA COTERA	24 HRS	22	4PM		23	4PM
IRMA LUDEÑA	18 HRS	-	-	-	-	-
CLEMENTINO PEREZ	12 HRS	23	4PM		24	4AM
MERCEDES HARO	12 HRS	24	4AM		24	4PM
FELIX NARCISO	12 HRS	24	4PM		25	4AM
JUAN PARIONA	4 HRS	-	-	-	-	-
ROBERTO LUDEÑA	6 HRS	25	4AM		25	10AM
JACINTO PEREZ	6 HRS	25	10AM		25	4PM
GALINDO DE LA CRUZ	8 HRS	25	4PM		25	12PM
JUAN CAYPO	24 HRS	25	12PM		26	5PM
OTTO HUAMANYAURI	24 HRS	26	5PM		27	5PM
ALEJANDRO UTUS	6 HRS	-	-	-	-	-
JUAN MAZZINI	12 HRS	27	5PM		28	5AM
OLGA LUDEÑA	4 HRS	-	-	-	-	-
LUIS BLANCO	24 HRS	28	5AM		29	5AM
JULIA ROSARIO	36 HRS	29	5AM		30	5PM
HECTOR HUAMAN	32 HRS	30	5PM		1	1AM
ARTURO VILLARROEL	12 HRS	1	1AM		1	1PM

Figura 38: Programación de riego de los pobladores de San Gerónimo de Punan

Fuente: Comité de Riego

#### d) Población a beneficiar

El área de influencia abarca zonas que se encuentran en pobreza con un bajo nivel de vida. La insuficiente disponibilidad del recurso hídrico reduce las posibilidades de los pobladores de incrementar su producción agrícola, donde el 95 % de la población está constituida básicamente por agricultores y el 5 % restante se dedica a otras actividades.

El área de estudio abarca 28.3 hectáreas aproximadamente, donde en la actualidad, los cultivos solo producen durante una sola campaña con bajos rendimientos debido al método de riego empleado. Asimismo, existen terrenos con disponibilidad agrícola que no se explotan debido a lo poco atractivo que resulta esta actividad económica en la zona.



Figura 39: Terreno abandonado en el valle  
Elaboración Propia

Durante el trabajo de campo realizado en la comunidad, se observaron dos parcelas acondicionadas con un sistema de riego tecnificado por goteo. A partir de esta evidencia se tomó la decisión de analizar la prefactibilidad de implementar un sistema de riego por goteo en todo este valle, método que brinda mejores beneficios que el riego por gravedad, ya que con este sistema se puede llegar a zonas donde la pendiente es muy pronunciada y también porque se puede dar sostenibilidad a todo el valle a través de un uso adecuado del agua.

#### 2.2.4 La palta y chirimoya

La palta y la chirimoya son los principales cultivos producidos en el valle de Santa Eulalia. Según fuentes allegadas a la Municipalidad de Santa Eulalia y también dicho

por algunos agricultores de la zona, la producción de palta es, en la mayoría de las veces, superior en comparación con la chirimoya. Esto se debe a la mayor presencia de árboles de dicho fruto presente a lo largo de todo el valle. Estos frutos se destinan en mayor medida a la comercialización; sin embargo, una pequeña parte es destinada al autoconsumo de los pobladores de la zona. Por otro lado, se ha visto que los mismos agricultores están elaborando helados ecológicos a partir de sus mismas cosechas de forma artesanal, los cuales son puestos a la venta en stands fuera de sus casas para ser adquiridos por los turistas visitantes.



Figura 40: Palta y Chirimoya  
Fuente: Los girasoles de Santa Eulalia

La mayoría de los agricultores recibe ayuda de la Municipalidad y del Gobierno Regional, esto a través de capacitaciones en materia de curamiento de cosechas, fumigación y control de plagas, entre otros. Asimismo, se evidencia colaboración mutua entre los mismos agricultores, quienes han formado pequeños comités de riego con la finalidad de planificar la siembra y cosecha en las distintas temporadas, la programación del riego, la organización para las ferias, y el desarrollo de los festivales.

### 2.3 La Palta Fuerte

En este subcapítulo se presentan las características de la palta fuerte, el entorno climático en donde se produce, y por último la demanda y el precio que se tiene en el mercado peruano.

#### 2.3.1 Características del Producto

Esta variedad de palta proviene de la yema sacada de un árbol nativo de Atlixo (México). Tiene características intermedias entre la raza mexicana y la guatemalteca, por esto es considerada un híbrido natural de estas dos razas. Presenta un aspecto piriforme, cuyo peso medio se encuentra entre 180 gramos a 400 gramos. Su largo promedio es de 10 a 12 cm. y su ancho de 6 a 7 cm. La piel es ligeramente áspera y es fácilmente separable de la carne del fruto. El contenido de aceite se encuentra en el rango de 18 a 22 % (MINAGRI, 2006)

### 2.3.2 Requerimientos edafoclimáticos

- Clima: tropical y sub-tropical
- Temperatura: 18° a 26°
- Humedad relativa: 80%
- Precipitación pluvial: 1000 a 1800 mm./año
- Altitud: depende de la variedad
- Luminosidad: Foto periodo anual de 980 a 1200 horas luz
- Suelo: textura media, relativa profundidad, y con muy buen drenaje.

### 2.3.3 Contenido Nutricional

A continuación se muestra la composición química y el valor nutricional en un contenido de 100 gr. de palta:

Tabla 13: Contenido Nutricional de la Palta (100gr)

Elemento	Unidad	Valor
Calorías	cal	131,00
Agua	gr	79,20
Proteínas	gr	1,70
Grasas	gr	12,50
Carbohidratos	gr	5,80
Fibra	gr	5,80
Ceniza	gr	1,00
Calcio	mg	30,00
Fosforo	mg	67,00
Hierro	mg	0,60
Retinol	mcg	0,05
Vit B1 (Tiamina)	mcg	0,03
Vit B2 (Riboflamina)	mcg	0,10
Vit B5 (Niacina)	mcg	1,82
Acid. AscorbicoReduc.	mcg	6,80

Fuente: Instituto de Nutrición – Ministerio de Salud

### 2.3.4 Demanda nacional de palta

De acuerdo a MINAGRI (2015), el volumen de la producción de palta destinada al mercado nacional ascendió a las 81,5 mil toneladas en el año 2000, este valor aumenta y declina alrededor de esta cifra hasta el año 2008. En los siguientes años, se observó un mayor crecimiento alcanzando las 185,1 mil toneladas en el año 2012 y 174,4 mil toneladas en el 2013. Estos niveles históricos pueden ser apreciados en la figura 41.

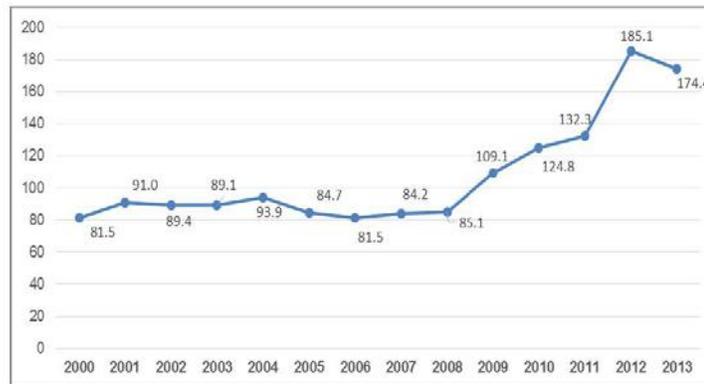


Figura 41: Oferta de la palta en el mercado peruano  
Fuente: FAOSTAT 2014  
Elaboración Propia

El cálculo de los valores presentados se realizó sobre la base de la producción nacional, a la cual se añadió las importaciones, que son inexistentes, y se restó el volumen de las exportaciones. El mismo informe indica que pese al fuerte crecimiento de las exportaciones de palta, la disponibilidad creciente de la producción nacional abasteció la mayor demanda interna de este fruto. En este sentido, las exportaciones peruanas se incrementaron de un valor de 2% respecto a la producción nacional durante el año 2000 a un 28% en el año 2005. Este incremento se ha mantenido sostenido en el tiempo alcanzando participaciones del 38% en el año 2008 y un 40% en el 2013. Cabe mencionar en este último año que el incremento de las exportaciones no significa un menor abastecimiento del mercado nacional, ya que la producción también se incrementa de manera proporcional.

En la Figura 42, se observan los valores históricos del consumo per cápita de palta en el Perú. Este indicador se mantuvo alrededor de 3,2 kilogramos por persona hasta el año 2008. En los siguientes años, reflejó un crecimiento sostenido hasta alcanzar los 4,4 kilogramos en el 2011 y 6,1 kilogramos en el 2012. En el año 2013, se registró un volumen de 5,7 kilogramos por persona.

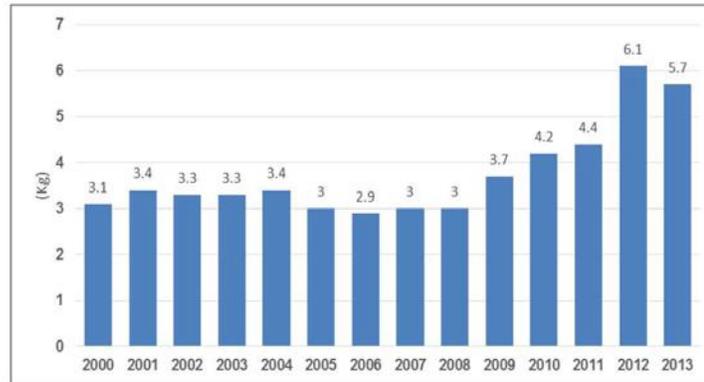


Figura 42: Consumo Per Cápita de la palta en el Perú  
Fuente: MINAGRI  
Elaboración Propia

### 2.3.5 Demanda interna en Lima Metropolitana

Según la Agencia Agraria de Santa Eulalia, el 95% de palta que se produce en el Valle se destina para el mercado mayorista de Lima, mientras que el 5% es para consumo interno. En la Tabla 14, se muestran los volúmenes totales de palta fuerte que ingresaron al mercado mayorista de Lima metropolitana. Se aprecia un consumo de 2,6 miles de toneladas en el año 2000, volumen que aumento a casi 3 miles de toneladas en el 2001. Sin embargo, se tuvo una tendencia descendente hasta el año 2008 con un volumen de aproximadamente 1,3 miles de toneladas. Desde el 2008 se aprecia un incremento significativo de abastecimiento en el mercado local. Los valores se incrementaron considerablemente con 6,65 miles de toneladas en el 2012 y con aproximadamente 8,5 miles de toneladas registradas durante el año 2014. Este último valor representa un incremento de más del 600% con respecto al año 2000, lo cual se ve sustentado en el incremento sostenido de la demanda interna por esta variedad de palta.

Tabla 14: Volúmenes totales de la palta fuerte en Lima Metropolitana

Año	Palta Fuerte (Tn)
2015	4 433,06
2014	8 530,30
2013	8 452,73
2012	6 650,52
2011	2 713,59
2010	1 828,69
2009	1 602,16
2008	1 286,50

Año	Palta Fuerte (Tn)
2007	1 452,15
2006	1 157,09
2005	1 034,65
2004	1 275,04
2003	1 474,53
2002	1 638,94
2001	2 996,01
2000	2 619,68

Fuente: MINAGRI  
Elaboración Propia

Tabla 15: Volumen según procedencia en Lima Metropolitana

Fecha	Palta Fuerte Costa (Tn)										
	Total	Yauyos	Huaura	Huarocharí	Hualal	Canta	Canete	Barranca	Oyon	Lima	Cajatambo
2015	4433,06	105,66	489,06	1524,12	1202,18	267,30	106,08	738,66	-	-	-
2014	9530,3	-	1026,08	3278,48	2633,40	166,68	143,16	1282,50	-	-	-
2013	8452,73	-	1451,6	3832,76	2692,45	75,00	-	400,92	-	-	-
2012	6650,52	-	973,14	2079,20	3050,04	73,20	31,20	443,74	-	-	-
2011	2713,59	-	230,40	1110,40	1220,40	79,20	15,60	57,60	-	-	-
2010	1828,69	-	301,80	331,01	1114,48	36,00	27,80	18,00	-	-	-
2009	1602,16	-	104,80	313,19	995,38	67,20	78,40	43,20	-	-	-
2008	1286,5	-	25,00	449,71	584,80	54,79	131,40	40,80	-	-	-
2007	1452,15	-	29,64	389,50	778,29	24,65	198,68	31,40	-	-	-
2006	1157,09	-	12,35	363,89	613,93	37,41	67,23	18,90	0,58	42,80	-
2005	1034,65	-	37,28	524,92	151,27	32,38	51,34	29,73	4,35	203,38	-
2004	1275,04	-	31,99	450,15	380,40	52,55	84,68	5,84	-	262,01	7,52
2003	1474,53	13,03	149,25	412,61	532,26	72,05	81,50	12,06	-	201,76	-
2002	1638,94	0,96	110,24	661,09	497,68	22,68	84,78	49,28	-	212,26	-
2001	2996,01	5,13	169,61	1172,98	1176,72	56,25	169,41	52,25	-	193,67	-
2000	2619,68	6,91	111,8	720,27	1290,36	42,40	203,54	23,14	-	215,54	5,72

Fuente: MINAGRI SISAP

La Tabla 15, muestra la procedencia desagregada de los volúmenes mostrados. Asimismo, se deduce que la participación de Huarocharí tiene un valor del 41% en el 2010, 45% en el 2011, 31% en el 2012, 45% en el 2013 y 38 % en el 2014. En términos generales, se presenta una producción creciente procedente de la provincia de Huarocharí, cuya participación es significativa en el mercado de Lima Metropolitana.

### 2.3.6. Análisis de Precios

La siguiente tabla muestra el precio promedio por kilogramo de palta fuerte en Lima Metropolitana en un periodo anual.

Tabla 16: Precio Promedio por kg de la palta fuerte en Lima

Año	Precio
2003	2,42
2004	2,53
2005	2,28
2006	2,57
2007	2,51
2008	3,07
2009	2,57
2010	2,94
2011	3,43
2012	3,43
2013	3,31
2014	3,52

Fuente: MINAG

En el 2003 se tuvo un precio promedio de 2,42 soles por kilogramo. Este precio ha mantenido una tendencia positiva logrando alcanzar los 3,52 soles por kilogramo en el 2014. Para analizar mejor esta apreciación se muestra a continuación la correspondiente tendencia lineal.

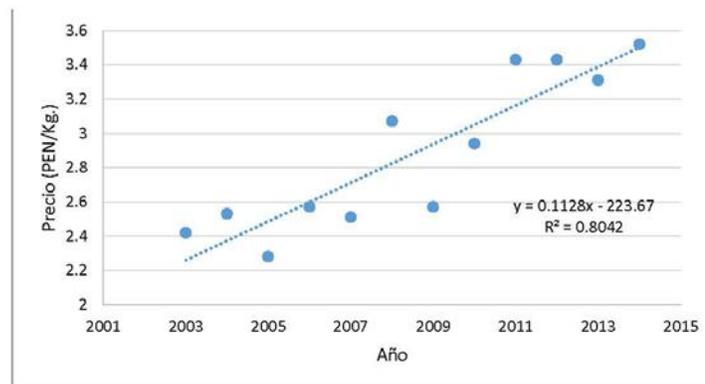


Figura 43: Precio Promedio de la Palta Fuerte  
Fuente: MINAG  
Elaboración Propia

Se obtuvo un coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ) igual a 0,7607. Esto nos indica que la relación entre el precio promedio por kilogramo y los años es positiva y se ajusta a una ecuación lineal. Es así que existe un buen panorama económico para los productores de palta fuerte, ya que el valor de este fruto se encuentra, sosteniblemente, en aumento en el mercado local de Lima metropolitana. Más aun, se

presenta a continuación (tabla 17) el desagregado de los precios anuales para realizar un análisis de las tendencias dentro de un año.

Tabla 17: Comportamiento de Precios de la Palta Fuerte en Lima Metropolitana (En nuevos Soles)

Meses	Año					
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Enero	2,32	3,84	3,28	3,64	3,81	3,97
Febrero	2,14	3,57	3,18	3,45	3,19	3,41
Marzo	2,40	3,28	3,10	3,25	3,04	3,36
Abril	1,93	2,58	3,09	2,58	2,77	3,49
Mayo	2,46	3,10	2,99	2,37	2,41	3,10
Junio	2,26	2,81	2,31	2,30	2,58	-
Julio	2,45	2,41	2,69	2,41	2,90	-
Agosto	3,26	3,30	3,82	2,83	3,39	-
Septiembre	4,88	3,94	4,32	3,44	4,08	-
Octubre	5,86	4,34	5,69	4,18	4,71	-
Noviembre	5,39	4,62	4,40	4,36	5,16	-
Diciembre	4,31	3,73	3,43	5,46	4,71	-

Fuente: MINAG  
Elaboración Propia

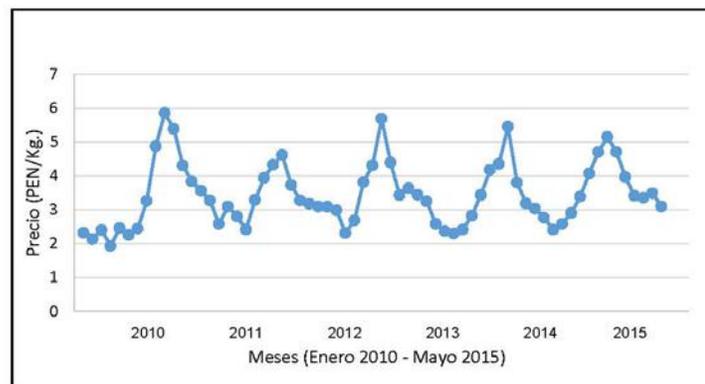


Figura 44: Estacionalidad de precios de la Palta Fuerte  
Fuente: MINAG  
Elaboración Propia

En el gráfico, se pueden observar dos momentos muy marcados en el comportamiento del precio por kilogramo de la palta fuerte en el mercado de Lima metropolitana. Se tiene una tendencia creciente desde Junio hasta Octubre seguida de una tendencia decreciente desde Octubre hasta Julio. Este comportamiento responde al volumen de

palta fuerte presente en el mercado local cuya procedencia, de acuerdo al Ministerio de Agricultura (MINAG), corresponde a las provincias de Huaura, Huarochirí, Huaral, Canta, Cañete y Barranca.

### 2.3.7 Proyección de la Demanda de la Palta Fuerte

Teniendo en cuenta los volúmenes de ingreso al mercado mayorista de Lima, se obtuvieron las entradas de palta fuerte provenientes del Valle de Santa Eulalia. Con esto, se evaluarán dos formas de proyectar dicha demanda:

#### 2.3.7.1 Método de Comportamiento Lineal:

Para este método se graficaron las demandas y se dibujó la línea de tendencia para observar su linealidad. Se obtuvo el siguiente gráfico:

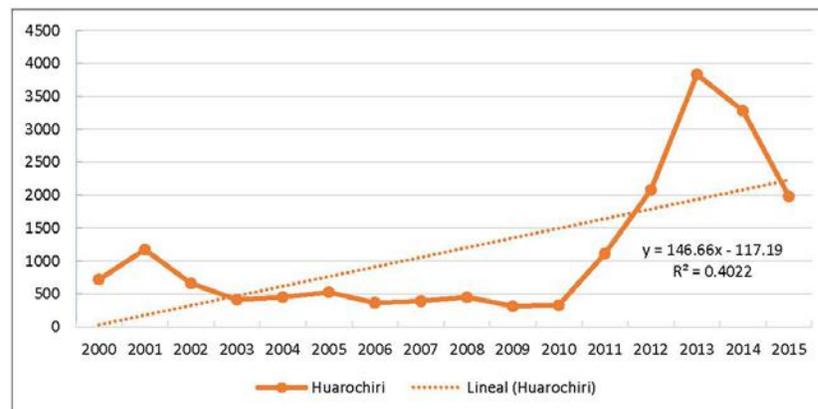


Figura 45: Regresión Lineal de la Demanda de Palta Fuerte en el Mercado Mayorista de Lima  
Elaboración Propia

Como se observa, la ecuación de la línea de tendencia de la curva es:  $y = 146,66x - 117,19$  con un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0,4022$ , el cual da evidencia de una baja aproximación lineal, por lo que no se considerará este método.

#### 2.3.7.2 Método Estacional Multiplicativo:

Al tratarse la palta de un producto que se produce por temporadas, se considera que puede seguir un comportamiento estacional, por lo que se realizó una agrupación en trimestres (considerando que es durante Mayo, Junio y Julio donde se cosecha la mayor cantidad de este fruto). Se presenta la información en la tabla 18.

Trimestre	Año				
	2011	2012	2013	2014	2015
1	2859	3005.62	3103.78	3312.8	4185.8
2	2762.96	3241.15	3553.55	3865.96	4839.14
3	3049.74	3371.70	3693.66	4241.11	
4	2521.62	2436.96	2693.96	2733.78	

Tabla 18: Demanda de Palta Fuerte (Tn) ordenado por Trimestres  
Elaboración Propia

A partir de estos datos se obtiene la siguiente gráfica:

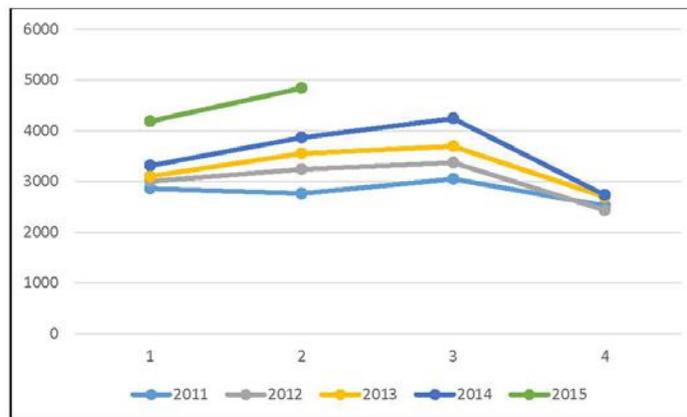


Figura 46: Grafico de la Demanda de Palta Fuerte por Trimestre  
Elaboración Propia

Como se observa en el gráfico, se tiene estacionalidad en la demanda y la magnitud es creciente cada año. Se vio un desfase de demanda en el segundo y tercer trimestre del año 2012, así como en el tercer trimestre en el 2013. Por ello se utilizó el promedio del trimestre del año siguiente y del año anterior para poder ajustar dicha data. Partiendo de esto, se utiliza el Método Estacional Multiplicativo, del cual se deriva la siguiente proyección con los siguientes índices (tabla 19):

Tabla 19: Proyección de la Demanda de Palta Fuerte por el Método Estacional Multiplicativo

Periodo Futuro	Proyección (Tn)	Índice Estacional	Proyección Ajustada (Tn)
17	3 528,92	1,00	3 545,11
18	3 584,52	1,07	3 832,6
19	3 640,12	1,08	3 919,02
20	3 695,73	0,85	3 139,84
21	3 751,33	1,00	3 768,54
22	3 806,93	1,07	4 070,41
23	3 862,54	1,08	4 158,47
24	3 918,14	0,85	3 328,8
25	3 973,74	1,00	3 991,97
26	4 029,35	1,07	4 308,22
27	4 084,95	1,08	4 397,92
28	4 140,55	0,85	3 517,75
29	4 196,16	1,00	4 215,41
30	4 251,76	1,07	4 546,02

Elaboración Propia

#### 2.4 La Chirimoya Cumbe

En este subcapítulo se presentan las características físicas y nutricionales de la Chirimoya Cumbe, así como la proyección de la demanda y los precios de este producto.

##### 2.4.1 Características del Producto

La chirimoya es oriunda de los valles andinos de Ecuador, Colombia, Bolivia y Perú. Es una planta de aspecto arbustivo, mide entre 5 a 9 metro de altura. Su fruto tiene forma cordiforme o cónica. Su longitud es de 10 a 20 cm y su ancho es más de 10 cm. Tiene un peso promedio entre 150 y 500 gramos, con variedades que llegan a tener un peso de 2,7 kg o más. La piel puede ser delgada o gruesa, suave, de color verde pálido y está cubierta de escamas redondas. Su pulpa es blanca, jugosa y carnosa, con un agradable aroma y un delicioso sabor semiácido. En su interior contiene numerosas semillas duras, brillantes de color café y que miden de 1 a 2 cm de longitud. Las flores de esta planta crecen solitarias o en grupo de dos o tres, en tallos cortos y velludos a lo largo de las ramas. La planta tiene una longevidad de 15 años aproximadamente y entra en producción a los tres o cuatro años (AREX, 2012)

##### 2.4.2 Requerimientos edafoclimáticos

- Clima: seco donde no llueva mucho, sin extremos de calor ni de frío
- Temperatura: 18° a 20°

- Humedad relativa: 60-70%
- Precipitación pluvial: 1000 a 1800 mm./año
- Altitud: entre 1000 y 2000 msnm
- Suelo: pH entre 6,0 y 7,5; suelos arcillo-arenosos, fértiles y drenados. Suelos con 2 o 5 % de materia orgánica favorecen el buen desarrollo del cultivo

### 2.4.3 Contenido Nutricional

A continuación se muestra la composición química y el valor nutricional en un contenido de 100 gr. de chirimoya:

Tabla 20: Contenido Nutricional de la Chirimoya (100gr)

Elemento	Unidad	Valor
Calorías	kcal	81,00
Agua	gr	75,70
Proteínas	gr	1,00
Grasas	gr	0,10
Carbohidratos	Gr	22,00
Fibra	gr	1,80
Ceniza	gr	1,00
Calcio	mg	24,00
Fosforo	mg	47,00
Hierro	mg	0,40
Vit. A	U1	10,00
Vit B1 (Tiamina)	mg	0,06
Vit B2 (Riboflamina)	mg	0,14
Vit B5 (Niacina)	mg	0,75
Vit. C	mg	18,00

Fuente: Kamawata (1997)  
Elaboración Propia

### 2.4.4 Demanda interna de Chirimoya Cumbe en Lima Metropolitana

Al igual que la palta fuerte, el 95% de la producción de Chirimoya Cumbe tiene como destino final a los mercados mayoristas de Lima, mientras que el 5% es destinado para el consumo local del valle de Santa Eulalia. La tabla 20 muestra los volúmenes de ingreso de Chirimoya Cumbe a los mercados mayoristas de Lima. Como se puede observar, desde el año 2000 se consumía aproximadamente 2 mil toneladas de chirimoya. En los años posteriores, se presentaron valores oscilantes alrededor de las 4 mil toneladas con una ligera tendencia positiva. En los últimos años se registraron volúmenes de 5,5 miles de toneladas en el 2013 y 6,6 miles de toneladas en el 2014, siendo este último el máximo valor registrado en el periodo analizado. De este modo, se observa un crecimiento del casi 300% en el 2014 en comparación con el año 2000.

Tabla 21: Demanda de Chirimoya Cumbe en los Mercados Mayoristas de Lima

Fecha	Chirimoya Cumbe (Tn)
2015	3162,01
2014	6577,47
2013	5490,92
2012	4374,54
2011	3404,62
2010	4082,85
2009	4509,86
2008	5587,46
2007	6084,38
2006	3863,18
2005	4838,75
2004	4668,83
2003	4289,54
2002	4583,93
2001	2846,82
2000	2006,16

Fuente: MINAGRI

Tabla 22: Demanda de los Mercados Mayoristas Disgregado por Proveedores Provinciales

Fecha	Chirimoya Cumbe (Tn)									
	Total	Huachochiri	Canta	Huaral	Oyon	Lima	Huaura	Yauyos	Canete	Barranca
2015	3162,01	3157,94	4,07	-	-	-	-	-	-	-
2014	6577,47	6577,47	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	5490,92	5490,92	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	4374,54	4374,54	-	-	-	-	-	-	-	-
2011	1839,67	1839,67	-	-	-	-	-	-	-	-
2010	2405,96	2405,96	-	-	-	-	-	-	-	-
2009	3117,09	3117,09	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	3434,10	3434,10	-	-	-	-	-	-	-	-
2007	4540,12	4533,68	4,45	1,99	-	-	-	-	-	-
2006	3093,25	3071,70	4,65	13,45	1,45	2,00	-	-	-	-
2005	4250,43	4244,38	-	1,45	-	4,30	0,30	-	-	-
2004	3754,02	3721,41	2,02	1,25	-	29,34	-	-	-	-
2003	3355,5	3351,12	0,84	0,39	-	3,15	-	-	-	-
2002	3906,16	3827,08	-	15,33	-	40,07	11,68	4,68	1,13	6,19
2001	2460,79	2290,88	2,53	19,92	-	102,34	43,60	-	1,52	-
2000	1867,84	1795,90	3,12	5,97	-	59,72	-	3,13	-	-

Fuente: MINAGRI

La Tabla 22, muestra la procedencia desagregada de los volúmenes mostrados. Se puede observar que casi la totalidad de chirimoya cumbe ingresada a los mercados mayoristas de Lima procede de la provincia de Huachochiri.

### 2.4.5 Análisis de Precios

La tabla 23 muestra el precio promedio por kilogramo de chirimoya cumbe en Lima metropolitana en un periodo anual.

Tabla 23: Precio Promedio de la Chirimoya Cumbe en Lima Metropolitana

Año	Precio
2003	3,63
2004	3,54
2005	3,66
2006	3,69
2007	4,31
2008	4,05
2009	4,16
2010	4,60
2011	4,96
2012	5,06
2013	5,53
2014	5,64

Fuente: MINAG  
Elaboración Propia

En el 2003 se tuvo un precio promedio de 3,63 soles por kilogramo. Este precio ha mantenido una tendencia positiva logrando alcanzar los 5,64 soles por kilogramo en el 2014. Para analizar mejor esta apreciación se muestra a continuación la figura 47.

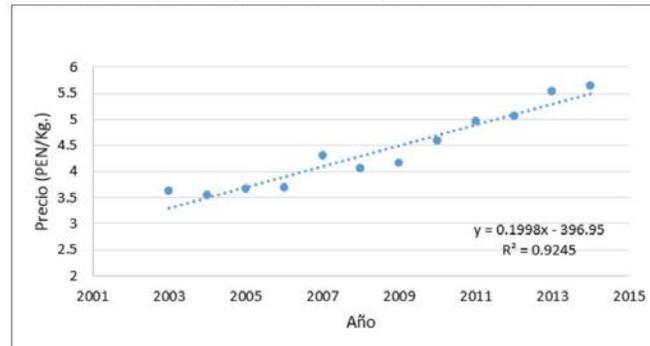


Figura 47: Precio Promedio de la Chirimoya Cumbe  
Fuente: MINAG

Se obtuvo un coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ) igual a 0,9077. Esto nos indica que la relación entre el precio promedio por kilogramo y los años es positiva y se ajusta a una ecuación lineal. Es así, que al igual que la palta fuerte, la chirimoya cumbe

tiene un buen panorama económico para sus productores, ya que el valor de este fruto tiene un aumento sostenible de valor en el mercado local de Lima metropolitana. Se presenta a continuación (tabla 24) el desagregado de los precios anuales para realizar un análisis de las tendencias dentro de un año.

Tabla 24: Comportamiento de Precios de la Chirimoya Cumbe en Lima Metropolitana

Meses	Año					
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Enero	5,75	7,60	5,59	7,13	6,63	6,73
Febrero	5,35	6,73	6,33	7,20	6,50	6,65
Marzo	4,94	5,56	5,03	6,05	6,02	5,98
Abril	4,18	5,33	4,93	5,20	5,14	4,90
Mayo	4,16	4,39	4,23	4,74	4,89	4,15
Junio	3,79	4,20	4,51	4,40	4,65	-
Julio	3,86	4,88	4,97	4,43	4,76	-
Agosto	4,49	5,56	4,54	5,30	4,91	-
Septiembre	5,34	5,84	5,65	5,51	5,59	-
Octubre	6,45	5,08	5,78	6,23	6,81	-
Noviembre	6,91	5,01	5,25	7,10	8,11	-
Diciembre	7,48	5,32	6,21	6,53	6,81	-

Fuente: MINAG  
Elaboración Propia



Figura 48: Estacionalidad de la Chirimoya Cumbe  
Fuente: MINAG  
Elaboración Propia

En la figura 48, se pueden observar de igual forma dos momentos marcados en el comportamiento del precio por kilogramo de la chirimoya cumbe en los mercados

mayoristas de Lima metropolitana. Se tiene en general una tendencia creciente desde Junio hasta Enero seguida de una tendencia decreciente desde Enero hasta Junio. Este comportamiento responde al volumen de chirimoya cumbe presente en el mercado local cuya procedencia, de acuerdo al Ministerio de Agricultura (MINAG), es la provincia de Huarochirí.

**2.4.6 Proyección de la Demanda de Chirimoya Cumbe**

En base a los valores obtenidos de chirimoya cumbe, se evaluarán dos formas de proyectar la demanda tal y como se hizo con la palta fuerte:

**2.4.6.1 Método de Comportamiento Lineal:**

Para este método se graficaron las demandas y se dibujó la línea de tendencia para observar su linealidad. Se obtuvo el siguiente gráfico:

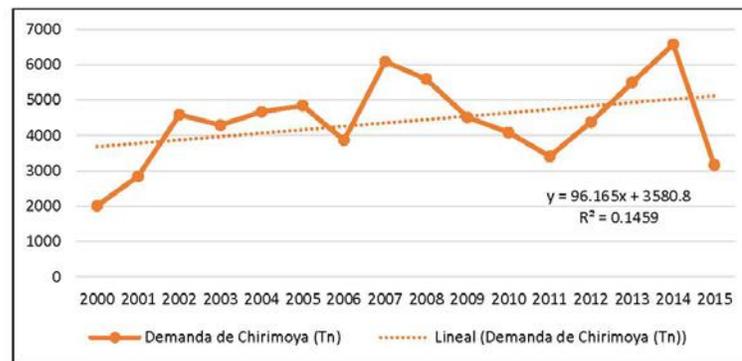


Tabla 25: Regresión Lineal de la Demanda de la Chirimoya Cumbe en el Mercado Mayorista de Lima  
Elaboración Propia

Como se observa, la ecuación de la línea de tendencia de la curva es:  $y=96,17x - 3580,8$  con coeficiente de determinación de  $R^2 = 0,1459$ . Esto nos indica que la aproximación no sigue un comportamiento lineal, por lo que no se considerará este método.

**2.4.6.2. Método Estacional Multiplicativo**

Al igual que la palta, la chirimoya es un producto que se produce por temporadas, se considera que puede seguir un comportamiento estacional, por lo que se agrupó la demanda por trimestres (considerando a Diciembre, Enero y Febrero los meses donde se cosecha la mayor cantidad de este fruto). De esto se obtuvo lo siguiente:

Tabla 26: Demanda de Chirimoya Cumbe (Tn) ordenado por Trimestres

Trimestre	2011	2012	2013	2014	2015
1	389,40	1136,20	1251,00	1632,95	1726,02
2	1050,97	1596,05	1899,26	2020,83	2083,84
3	292,6	1006,29	1420,49	1830,46	
4	229,82	769,35	1070,50	1093,24	

Elaboración Propia

A partir de estos datos se obtiene lo siguiente:

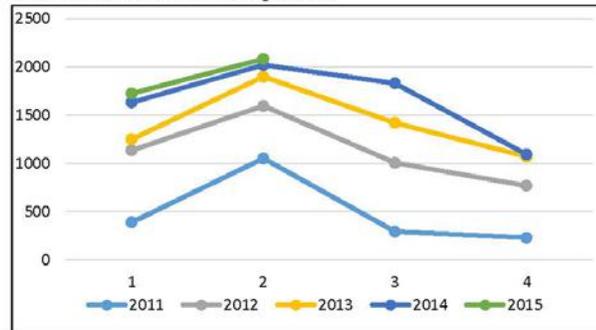


Figura 49: Grafico de la Demanda de la Chirimoya Cumbe por Trimestre  
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 27: Proyección de la Demanda de la Chirimoya Cumbe por el Método Estacional Multiplicativo

Periodo Futuro	Proyección (Tn)	Índice Estacional	Proyección Ajustada (Tn)
17	1847,72	1,00	3545,11
18	2882,37	1,07	3832,6
19	2087,44	1,08	3919,02
20	1514,02	0,85	3139,84
21	2198,46	1,00	3768,54
22	3404,72	1,07	4070,41
23	2449,34	1,08	4158,47
24	1765,60	0,85	3328,8
25	2549,21	1,00	3991,97
26	3927,08	1,07	4308,22
27	2811,24	1,08	4397,92
28	2017,18	0,85	3517,75
29	2899,95	1,00	4215,41
30	4449,43	1,07	4546,02

Elaboración Propia

Como se observa en la figura 49, hay estacionalidad en la demanda con una magnitud creciente cada año. Asimismo, se corrobora al segundo trimestre como el de mayor demanda (Marzo – Abril – Mayo). Partiendo de esto, se utiliza el Método Estacional Multiplicativo, del cual se obtiene la siguiente proyección con los siguientes índices (tabla 27)

## 2.5 Conclusión del panorama del mercado potencial de la Palta Fuerte y Chirimoya Cumbe

La Microeconomía es la parte de la Economía que estudia los mercados y el comportamiento económico de los agentes económicos individuales, incluyendo a los consumidores y empresas. Su área de estudio fundamental es el análisis de la oferta y demanda, el cual estudia la interacción entre compradores y vendedores para determinar los precios y cantidades de las transacciones realizadas. Este análisis se basa en dos teorías: la teoría del consumidor y la teoría de la firma. La primera establece que la demanda de bienes y servicios responde a la maximización de la satisfacción percibida por los individuos. Por otro lado, la segunda trata sobre la oferta de bienes y servicios, la cual es conducida por las empresas en la búsqueda de maximizar sus ganancias. De este modo, la microeconomía ofrece un marco conceptual para el entendimiento de la realidad económica, así como, la realización de pronósticos basados en el comportamiento de los agentes económicos individuales, entendiéndose por estos a los individuos y las empresas.

De acuerdo a la teoría económica, un desplazamiento de la curva de demanda hacia la derecha implica un incremento de la cantidad demandada para cualquier nivel de precios. Esto puede ser ocasionado entre diferentes aspectos, por un cambio de los gustos y preferencias de los consumidores hacia el bien demandado. Por otro lado, un desplazamiento de la curva de oferta hacia la derecha se relaciona a un aumento de la cantidad ofertada. Esto puede deberse principalmente a cambios en los precios de los factores de producción, cambios de la tecnología o cambios de expectativas frente al mercado. En un escenario simultáneo de las curvas de oferta y de demanda, un desplazamiento único de la curva de demanda a la derecha provoca un incremento tanto en la cantidad de equilibrio como en el precio de equilibrio. Mientras que un desplazamiento único de la curva de oferta a la derecha provoca un incremento de la cantidad de equilibrio, pero implica un menor precio de equilibrio (Krugman, 2007).

En el contexto del mercado de la palta fuerte y la chirimoya cumbe, se observa un incremento de la producción ofertada en los mercados mayoristas de Lima metropolitana. De acuerdo a las cifras presentadas anteriormente, hubo un aumento de aproximadamente 300% y 600% en el año 2014 con respecto al año 2000, respectivamente. Ambas curvas históricas muestran una tendencia creciente en este periodo analizado. Por otro lado, el análisis de precios realizado en el periodo 2003 - 2014 para el valor promedio en soles por kilogramo muestra una tendencia a la subida de los precios de la palta fuerte y chirimoya cumbe. El primero, tenía un precio promedio de 3.63 S/./kg en el 2003 alcanzando un valor de 5.64 S/./kg en el 2014.

Mientras que el segundo, 2.42 S/./kg. en el 2003 y un valor promedio de 3.52 S/./kg. en el 2014. Asimismo, los precios de ambos bienes fluctúan durante el año en respuesta a la estacionalidad de la cantidad ofertada en el mercado destino. Este aspecto es propio del modelo de oferta y demanda, el cual puede ser explicado por la teoría microeconómica referente al mecanismo del mercado para alcanzar el equilibrio. En este sentido, nos encontramos en un caso, donde la demanda se ha incrementado debido a un cambio creciente por los gustos y preferencias de los consumidores hacia ambos frutos destinando una parte de su presupuesto en la adquisición de estos bienes de consumo. Asimismo, la oferta se ha ido incrementando en respuesta a las buenas expectativas de los productores ante la demanda de los consumidores y el fomento y ayuda del estado para la expansión del mercado agricultor. Sin embargo, la tendencia de precios crecientes nos indica que el incremento de la demanda ha sobrepasado al incremento de la oferta en el mercado. Este hecho puede ser entendido a través de la figura 45, el cual nos muestra el desplazamiento simultáneo de las curvas de oferta y demanda, así como, el equilibrio de mercado. En el gráfico, observamos como la curva de demanda se desplaza a la derecha a  $D'$  en respuesta a la mayor preferencia de los consumidores por el bien. A la vez, la curva de oferta también se desplaza en la misma dirección a  $O'$  pero con menor magnitud. Este desplazamiento desproporcional genera que haya un exceso de demanda lo cual pone al mercado en un estado de desequilibrio. Finalmente, el mecanismo del mercado logra el equilibrio aumentando el precio del bien hasta alcanzar nuevamente un estado estable, donde el nuevo precio  $P_1 > P_0$  y la cantidad  $Q_1 > Q_0$ .

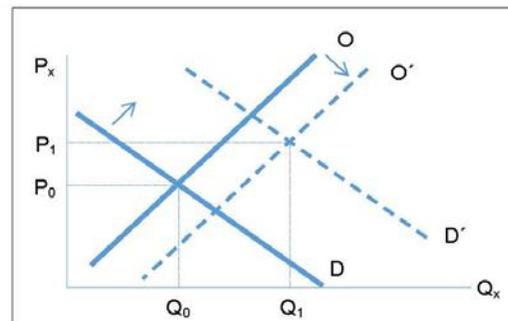


Figura 50: Mecanismo del Mercado  
Elaboración Propia

De acuerdo a los datos obtenidos, este comportamiento puede explicar la situación actual del mercado de la palta fuerte y chirimoya cumbe en Lima metropolitana. Esto representa un panorama muy favorable para ambos productos, que de acuerdo a la tendencia actual, se encuentran como productos con una demanda potencial en desarrollo.

### CAPITULO 3. PROPUESTA DE MEJORA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizaron múltiples visitas al Distrito de Santa Eulalia concretándose comunicaciones con la Municipalidad de la localidad. Sin embargo, no se obtuvieron las facilidades necesarias para hacer un estudio más extenso de los sistemas de riego presentes en todo el distrito. Es por ello que también se estableció contacto con el puesto del Ministerio de Agricultura ubicado en Santa Eulalia. Es así, que se pudo concretar una visita guiada al Valle de San Gerónimo de Punan, zona de estudio de la presente tesis, y donde se evaluará la propuesta de mejora. En la visita, se observó un terreno accidentado, ubicado en las faldas del valle con pendiente descendente en dirección al río Santa Eulalia. Se realizó un análisis exploratorio de todas las zonas a pie, de este modo, se observó un sistema de riego por canales a partir de una bocatoma y un regado por gravedad; sin embargo, se encontró evidencia del uso de riego tecnificado por goteo en dos parcelas (el Anexo 27 describe el trabajo de campo realizado en la zona de estudio). Es por ello que se decidió mejorar el sistema de riego en base al método de riego por goteo, pues tiene un impacto positivo no solo productividad, sino también una en la adecuada gestión del agua. Adicionalmente, la geografía del terreno permite el aprovechamiento de energía potencial debido al diferencial de alturas, lo cual permite la implementación de un sistema de riego por goteo sin el uso de una bomba.

El presente capítulo busca formular el Modelo de Optimización que se tendrá en consideración para mejorar la eficiencia del Valle en el uso adecuado de agua y la sostenibilidad del sistema en el tiempo. Para ello, se desarrollarán dos modelos que permitirán la optimización de la gestión del agua en el sistema de riego, los cuales son:

- Localización de los puntos donde se ubicarán los microreservorios
- Dimensionamiento de cada microreservorio.

#### 3.1 Localización de los microreservorios en el Valle

Para asegurar la funcionalidad del riego por goteo, es necesaria la instalación de reservorios que ayuden a alimentar de agua a todo el sistema. Es por ello que se delimitó el área de todo el Valle de San Gerónimo de Punan, y se dividió en cuadrados de 50x50. Cada área delimitada es una potencial ubicación para un microreservorio cuyo alcance máximo ha sido establecido de acuerdo a la geografía de la zona. Este modelo determinará el número mínimo de microreservorios y la ubicación de los mismos en zona de estudio.

**Método 1: Planteamiento del modelo como un Problema de Cobertura**

Teniendo en cuenta las divisiones mostradas en la figura 51, se empezará a tomar puntos (en este caso los cuadrados de 50x50 m) donde se puede ubicar un microreservorio. El alcance estará delimitado mediante aproximadamente 150 m, por lo que un cuadrado puede alimentar (abastecer de agua) a los cuadros adyacentes a él. Dado que se desea aprovechar la energía potencial por la geografía del lugar, el cuadrado donde se ubicará el microreservorio solo podrá alimentar a las áreas subyacentes por debajo de él. El alcance de cada punto es mostrado en la tabla 28, la tabla completa se ajunta en el Anexo 1; en base a estos datos, se plantea una solución del modelo, la cual busca minimizar el número de microreservorios ubicados en todo el Valle.

Tabla 28: Alcance de cada punto ubicando el reservorio

Punto Oferta	Puntos Demandas						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	2					
2	1	2	3				
3	2	3	4				
4	3	4	5				
5	4	5	7				
6	5	6	7	8	9		
7	7	9					
8	6	7	8	9	12	13	
...	...	...	...	...	...	...	...
111	111	115					
112	112	113	114				
113	113	114	116				
114	114	115	117	118			
115	115	118					
116	116	117	119	120	118		
117	117	118	120	121			
118	118	121					
119	119	120	122	123			
120	120	121	123	124			
121	121	124					
122	122	123	125	124			
123	123	124	125	126			
124	124						
125	125	126	127	128			
126	126	128					
127	127	128					
128	128						

Fuente: Elaboración Propia

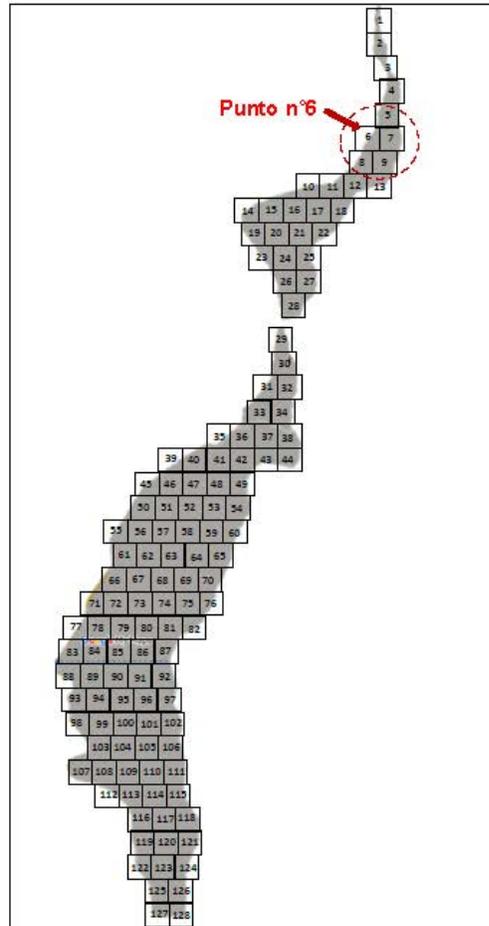


Figura 51: División por cuadrículas del valle San Gerónimo de Punan  
Fuente: Adaptado de Google Maps  
Elaboración Propia

Por ejemplo, el punto n°6 mostrado en la figura 51, podría abastecer de agua a las áreas 5, 6, 7, 8, y 9; ya que se encuentra a una distancia óptima de radio de 150 m. Esta misma lógica ha sido replicada en todo el mapa mostrado para la determinación del alcance de cada punto. Se tomó en consideración la ubicación del punto ofertante, ya que este es un factor determinante en la delimitación de su alcance.

**Desarrollo:**

Variables de Decisión

$X_i$  = Decisión de colocar el microreservorio de agua en el punto  $i$

La P.L es la siguiente,

$$\min \sum_{i \in I} X_i \quad (1.1)$$

$$\text{s.a. } \sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 \quad (\forall j \in J) \quad (1.2)$$

$$x_j = (0,1) \quad (\forall j \in J)$$

En las restricciones se toma en cuenta que cada punto demandante es un candidato para ser elegido como localización de un microreservorio, además, se establece que todos los puntos del sistema deben ser cubiertos. Asimismo, todas las variables son no negativas y binarias, porque solo pueden tomar valores de cero o uno.

**Resultado:**

El modelo se desarrolló en el software LINGO 15.0 (ver Anexo 2), obteniéndose así 37 puntos donde se ubicarían los microreservorios y los cuales pueden ser observados en la figura 47.

2	5	8	10	15	20	23	28
30	33	35	42	45	46	48	55
58	62	66	69	71	74	77	79
88	90	91	98	100	101	107	109
110	116	117	122	125			

Por ejemplo, el nodo n°5 fue seleccionado como ubicación para uno de los 37 microreservorios. De acuerdo a la tabla 28, este microreservorio abastecería de agua a las áreas representadas por los puntos 4, 5 (así mismo), y 7.

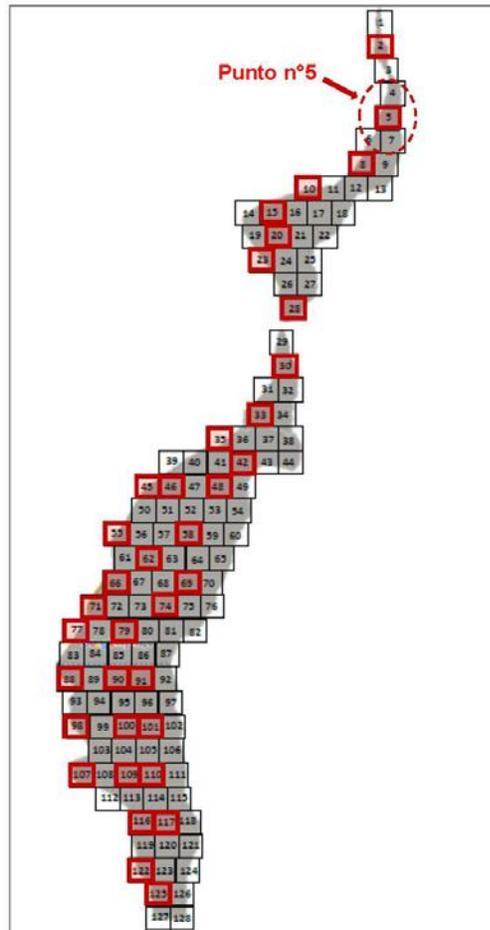


Figura 52: Puntos donde se ubicarán los microreservorios  
Fuente: Adaptado de Google Maps  
Elaboración Propia

**Método 2: Evaluación como un problema de Localización de Máxima Cobertura**

Se plantea la misma problemática dando como variable preestablecida el número de microreservorios a localizar. De este modo se busca determinar el porcentaje de cobertura para cada nivel seleccionado.

**Desarrollo:**

Variables de Decisión

$x_j$  = si un microreservorio es localizado en el lugar "j", toma el valor de 1. Caso contrario toma el valor de 0

$y_i$  = si un nodo demandante "i" es alcanzado por la red de microreservorios localizados, toma el valor de 1. Caso contrario toma el valor de 0

P = número de microreservorios a ser localizados

La P.L es la siguiente,

$$\max \sum_{i \in I} y_i \tag{1.1}$$

$$\text{s. a. } \sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i \quad (\forall i \in I) \tag{1.2}$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P \tag{1.3}$$

$$x_j = (0,1) \quad (\forall j \in J)$$

$$y_i = (0,1) \quad (\forall i \in I)$$

**Resultado:**

El modelo matemático se desarrolló en el software LINGO 15.0 (ver Anexo 3). Se evaluó el modelo para un número fijo de microreservorios a localizar "P" tomando valores desde el 1 hasta 37. La tabla 29 muestra la cobertura (el número de puntos cubiertos por la red de microreservorios) obtenida para un número determinado "P" de microreservorios localizados. Se puede observar una tasa decreciente en la cobertura resultante conforme el número de microreservorios va aumentando. De este modo, se puede apreciar que a partir de un P igual a 29, localizar un microreservorio más aumenta la cobertura en un punto adicional. Es decir, cada microreservorio agregado permite cubrir un nodo demandante en el sistema (un cuadrado 50mx50m).

Tabla 29: Cobertura alcanzada para cada P "Microreservorios"

P	Cobertura	P	Cobertura
1	7	21	100
2	14	22	103
3	20	23	106
4	26	24	109
5	32	25	112
6	38	26	114
7	43	27	116
8	48	28	118
9	53	29	120
10	58	30	121
11	62	31	122
12	66	32	123
13	70	33	124
14	74	34	125
15	78	35	126
16	82	36	127
17	86	37	128

Elaboración Propia

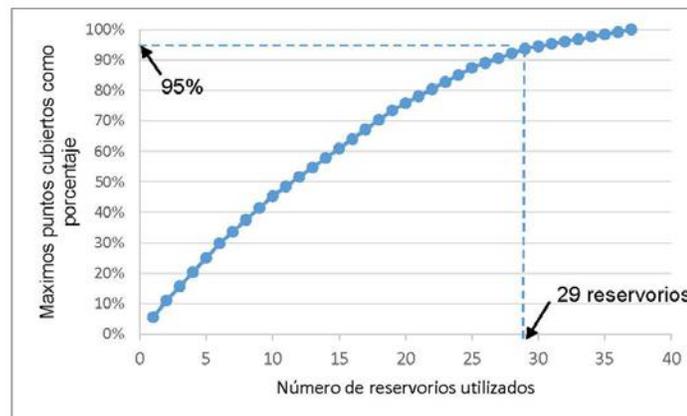


Figura 53: Curva de la efectividad lograda por el número de microreservorios utilizados  
Elaboración Propia

Los valores resultantes indican que el número adecuado de microreservorios a localizar es de 29 reservorios, los cuales cubren al 95% del área meta. La figura 54 muestra la ubicación de los nodos seleccionados.

2	6	10	15	23	29	33
35	42	46	48	55	62	63
64	66	74	77	79	89	91
93	99	101	108	110	116	122
125						

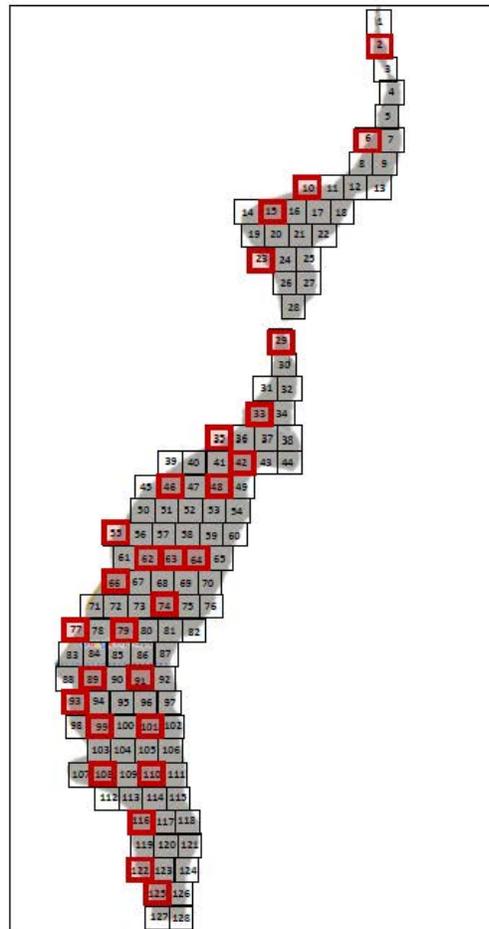


Figura 54: Ubicación de los 29 microreservorios mediante Cobertura Máxima  
Elaboración Propia

### 3.2 Dimensionamiento de cada microreservorio

Para este modelo, se busca construir microreservorios de agua necesarios para el sistema. Se desea determinar la capacidad de cada microreservorio, esto se logrará a través de un balance de masas para cada caso particular asegurando el abastecimiento de agua a todas las plantas en la zona de alcance. De este modo, se abastecerán las 28,3 hectáreas distribuidas en toda la zona del Valle de San Gerónimo de Punan.

#### 3.2.1 Formulación del Modelo de capacidad

El modelo evaluará el dimensionamiento de un microreservorio para 1 ha de árboles adultos de palta y chirimoya, esto sería equivalente a proveer de agua a cuatro cuadrados 50x50 llenos de cultivos. Como se observa en la figura 55, se considera el espacio entre cultivos a 5 metros de distancia unos de otros, resultando así en una población de 361 árboles adultos. Adicionalmente, la población de la hectárea patrón replica la distribución actual del área plantada en las 28,3 hectáreas del valle, la cual está compuesta por un 89% de árboles de chirimoya y 11% de árboles adultos de palta. Es decir, la hectárea patrón propuesta tendría 321 árboles de chirimoya y 40 árboles de palta.

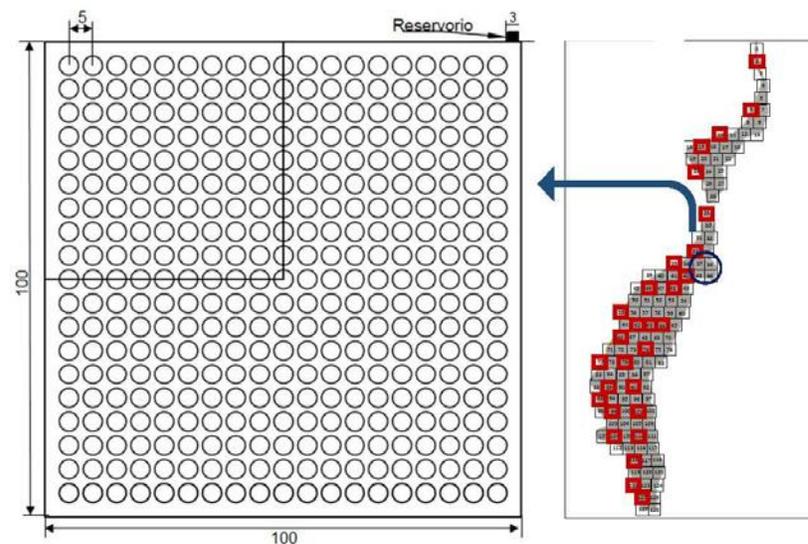


Figura 55: Área patrón de 1 ha propuesta para el modelo  
 Elaboración Propia

### VARIABLES DE DECISIÓN

$t, n$  = índice de días y el número total de días en el periodo evaluado

$s_t$  = reserva al final del día  $t$

$s_0$  = reserva inicial

$q$  = flujo de salida de agua día a día, especificado en el primer modelo y luego una variable.

$w_t$  = pérdidas de agua por exceso de capacidad en el reservorio en el mes  $t$ .

$c$  = capacidad del reservorio para almacenar agua

$i_t$  = flujo de ingreso al reservorio en el mes  $t$  del periodo crítico.

$$\min \quad z = c \quad (4.1)$$

$$\text{s. a.} \quad s_t = s_{t-1} + i_t - q - w_t \quad (t = 1, \dots, n) \quad (4.2)$$

$$s_t \leq c \quad (t = 1, \dots, n) \quad (4.3)$$

$$s_t \geq s_0 \quad (t = n) \quad (4.4)$$

$$s_t, w_t \geq 0 \quad (t = 1, \dots, n)$$

$$c, q \geq 0$$

La función objetivo (4.1) busca minimizar la capacidad del reservorio. La restricción (4.2) establece el balance entre las entradas y las salidas del sistema del reservorio. La restricción (4.3) prohíbe cualquier almacenamiento que exceda la capacidad de almacenamiento seleccionada para el reservorio. Finalmente, la restricción (4.4) establece que el almacenamiento al final del periodo crítico debe ser al menos tan grande como el almacenamiento al inicio del periodo crítico.

El Modelo fue aplicado para la evaluación del balance de masas durante todo un año. El ingreso de agua al reservorio se consideró quincenal e ilimitado dada la gran disponibilidad de agua (ver Anexo 12). El índice de días "n" del modelo es igual a 360 días. Las demandas hídricas fueron determinadas por el método propuesto por la FAO Pemman-Monteith y se evaluó en el software CROPWAT 8.0 (ver Anexo 5, 6, 7, y 8).

### **Resultado:**

El modelo de programación lineal fue ejecutado en el software LINGO 15.0 (ver anexo 4). La capacidad obtenida fue de  $6 \text{ m}^3$  de agua, por tanto, una opción en el diseño del microreservorio sería  $3 \times 2$  metros de base con una altura de 1,5 metros. Con esto se asegurarían los  $6 \text{ m}^3$  de agua requerida en almacenamiento para darle sostenibilidad al sistema de riego por goteo durante todo un año.

### 3.3 Resumen de resultados

La siguiente tabla resume las propuestas que serán evaluadas en el siguiente capítulo. Ambas alternativas muestran una distribución de los microreservorios a lo largo del área de estudio bajo el marco del riego tecnificado por goteo. Las características de este método fueron descritas en el marco teórico. Más aun, existe evidencia empírica sobre el aumento de la productividad en la zona de estudio.

Tabla 30: Resumen de resultados obtenidos para hallar el número de microreservorios

Referencia	Nombre	Resumen
Figura 52	Problema de cobertura total	Se determinó el requerimiento de 37 microreservorios distribuidos a lo largo de la zona de estudio para cubrir toda el área disponible.
Figura 54	Problema de localización de máxima cobertura	Se determinó el requerimiento de 29 microreservorios distribuidos a lo largo de la zona de estudio para cubrir un 95% del área disponible.

Elaboración Propia

La decisión final será tomada a partir de la evaluación económica y financiera, la cual analizará la conveniencia de ambas propuestas tomando en cuenta que cada microreservorio tendrá una capacidad de 6 m<sup>3</sup> de agua con una dimensión de 3x2 metros de base y una altura de 1,5 metros.

## CAPITULO 4: EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA

En este capítulo se analizarán los tipos de egreso de dinero que corresponden a la implementación del sistema de riego por goteo referentes a la construcción de los microreservorios y el costeo de los implementos del sistema. También se analizarán los ingresos de dinero basándose en la mejora de la productividad de los cultivos a un periodo de 6 años. Para ello se evaluarán primero los costos en un área patrón de 1 hectárea, para luego replicarla en las 28.3 hectáreas del valle. Posteriormente, se analizarán diferentes indicadores económicos para determinar la factibilidad económica del proyecto.

A continuación, se presenta una tabla resumen que ayudará a entender la extrapolación realizada.

Tabla 31: Cuadro Resumen sobre la utilización de una hectárea patrón

Referencia	Nombre	Resumen
Figura 50	Layout de posición de cultivos en 1 hectárea	Representación y distribución de los cultivos en una hectárea patrón.
Tabla 30	Lista de costos de implementos en un sistema de riego por goteo	Cotización de implementos que servirán como punto de partida para poder tener un costo por cada hectárea, lo cual permitirá estimar un costo aproximado en toda la dimensión del valle.
Tabla 31	Lista de costos de materiales de construcción para un microreservorio	Cotización de los materiales que se utilizaran para poder construir un microreservorio de 3x2x1.5 m. Este costeo, que será unitario, permitirá calcular el costo total de los 37 microreservorios en todo el valle.
Tabla 32	Costos de transporte	Los costos de transporte para los implementos del sistema y los materiales de la construcción de 1 microreservorio. Esto ayudará a estimar posteriormente la cantidad de viajes necesarios para poder cubrir los costos de la construcción de todos los microreservorios y la instalación del sistema de riego en todo el valle.

Elaboración propia

#### 4.1 Evaluación técnica de la propuesta de mejora en 1 ha patrón

La figura 56 detalla la ubicación del reservorio propuesto con medidas 3x2x1,5 m, el cual se encuentra ubicado en el extremo superior derecho. Los costos de implementación y construcción del microreservorio para una hectárea de riego fueron cotizados por un proveedor. La cotización presupuestal fue determinada a partir del layout descrito.

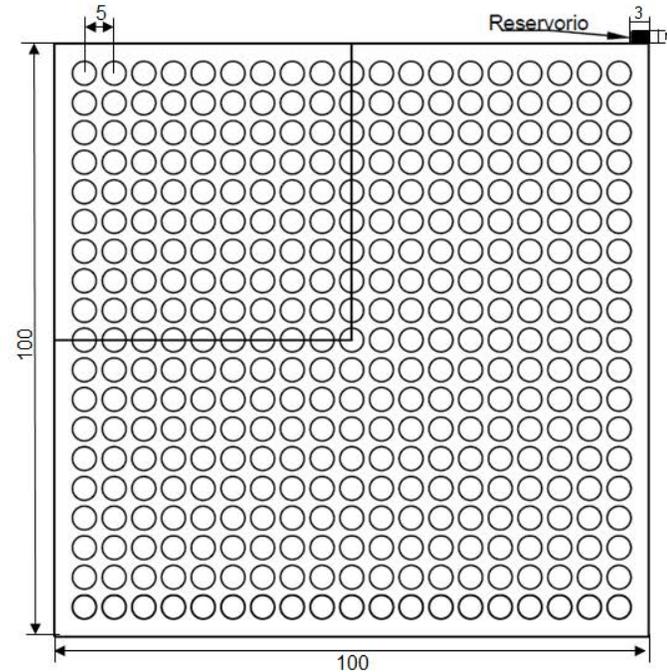


Figura 56: Layout de posición cultivos en 1 hectárea  
Elaboración Propia

##### 4.1.1 Costos de los implementos del riego por goteo para 1 ha

A continuación se detallan los costos asociados a los implementos del sistema de riego por goteo (ver cotización en el anexo 13).

Tabla 32: Lista de costos de implementos en un sistema de riego por goteo

Implemento	Cantidad	Unidad	P/U	Total
Bomba de ariete	1	und	S/.750.00	S/.750.00
Filtro de Malla	1	und	S/.350.00	S/.350.00
Manguera Polietileno 63	1	Rollo	S/.520.00	S/.520.00
Conector Inicial	40	und	S/.0.60	S/.24.00
Tapón Doble Anillo	40	und	S/.0.35	S/.14.00
Válvula Dentada	40	und	S/. 2.60	S/.104.00
Tapón Compresor	1	und	S/.19.00	S/.19.00
Adaptador macho	3	und	S/. 17.50	S/.52.50
Válvula esférica	2	und	S/.18.00	S/.36.00
Collarín PP	1	und	S/.10.00	S/.10.00
Válvula de Aire	1	und	S/.35.00	S/.35.00
Manguera Polietileno 16	8	rollo	S/.185.00	S/.1,480.00
Gotero Auto compensado	1600	und	S/. 0.45	S/. 720.00
			<b>Total</b>	<b>S/. 4,114.50</b>

Elaboración Propia

Se ha considerado la longitud total de las mangueras de polietileno en toda la hectárea, así como el número de cultivos que se tiene para la cantidad de goteros que se necesitarían. Por otro lado, se aprovechará la energía cinética del canal mediante la utilización de una bomba de ariete.

#### 4.1.2 Costos de materiales y construcción del microreservorio para 1 ha patrón

A continuación, se detallan los costos asociados a los materiales y la construcción del microreservorio para el sistema de riego por goteo.

##### Mano de obra

Mano de obra	S/.850.00
--------------	-----------

**Materiales**

Tabla 33: Lista de costos de materiales de construcción para un microreservorio

Materiales	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Cemento Portland Tipo I Sol	bls	24	S/.16.50	S/.396.00
Arena Gruesa	m3	4	S/.39.90	S/.159.60
Piedra Chancada 1/2"	m3	2	S/.58.00	S/.116.00
Calamina Metálica 0.8x3.6	und	2	S/.13.50	S/.27.00
Listones de Madera 3"x16pies	und	2	S/.38.40	S/.76.80
Clavos 1/2"	kg	0.02	S/.5.90	S/.0.12
			<b>Total</b>	<b>S/.775.52</b>

Elaboración Propia

Se ha considerado mano de obra calificada. Los materiales indicados fueron obtenidos luego de consultar a maestros de obra que se encuentran por la zona. La construcción del reservorio toma unos 4 a 5 días aproximadamente para una dimensión aproximada de 2x3x1.5 m.

**4.1.3 Costos adicionales**

A continuación se detallan los costos de transporte, tanto para los implementos del sistema así como los materiales de construcción del microreservorio.

Tabla 34: Costos de transporte

Transporte	Ida y vuelta
Implementos	S/.350
Instalación	S/.1150
Materiales	S/.136

Elaboración Propia

Se ha considerado que el proveedor de los implementos está en La Molina. Por otro lado, el proveedor de los materiales se encuentra ubicado en el distrito de Santa Eulalia.

**4.2 Evaluación técnica de la propuesta de mejora en todo el Valle**

Para poder replicar los costos a todo el Valle, se tiene que el total de área cultivable es de 28,3 ha. Anteriormente, se determinaron los materiales necesarios para 1 ha patrón, en base a esta se realizará el cálculo total requerido. Estas conversiones nos servirán para poder costear la cantidad de goteros y los rollos de manguera de polietileno a utilizar si cubrimos toda el área cultivable.

**4.2.1 Costos de los implementos del riego por goteo para todo el Valle**

La tabla 34 detalla los costos asociados a los implementos del sistema de riego por goteo para todo el valle.

Tabla 35: Lista de costos de implementos para los 37 microreservorios

Implemento	Cantidad	Unidad	P	Unidad	P/U	Total
Bomba de ariete	1	und	37	und	S/.750.00	S/.27,750.00
Filtro de Malla	1	und	37	und	S/.350.00	S/. 12,950.00
Manguera Polietileno 63	1	rollo	28.3	ha	S/.520.00	S/. 14,716.00
Conector Inicial	40	und	28.3	ha	S/.0.60	S/.679.20
Tapón Doble Anillo	40	und	28.3	ha	S/.0.35	S/.396.20
Válvula Dentada	40	und	28.3	ha	S/.2.60	S/. 2,943.20
Tapón Compresor	1	und	37	und	S/.19.00	S/.703.00
Adaptador macho	3	und	37	und	S/.17.50	S/. 1,942.50
Válvula esférica	2	und	37	und	S/.18.00	S/. 1,332.00
Collarín PP	1	und	37	und	S/. 10.00	S/.370.00
Válvula de Aire	1	und	37	und	S/. 35.00	S/. 1,295.00
Manguera Polietileno 16	8	rollo	28.3	ha	S/.185.00	S/. 41,884.00
Gotero Auto compensado	1600	und	28.3	ha	S/. 0.45	S/.20,376.00
					<b>Total</b>	<b>S/.127,337.10</b>

Elaboración Propia

Se ha considerado la cantidad de microreservorios que se utilizará según la solución del modelo; se observa que serán 37 microreservorios que se construirán, así como la conversión en hectáreas de los implementos que no dependen del número de microreservorios sino del área a utilizar.

**4.2.2 Costos de materiales y construcción del microreservorio para todo el Valle**

A continuación se detallan los costos asociados a los materiales y la construcción de los 37 microreservorios necesarios para el sistema de riego por goteo.

Mano de Obra

Mano de obra	S/. 27,000.
--------------	-------------

**Materiales**

Tabla 36: Lista de costos de materiales de construcción de los microreservorios

Materiales	Unidad	Cantidad	Reservorio	Precio	Total
Cemento Portland Tipo I Sol	bolsas	26	37	S/.16.50	S/.15,873.00
Arena Gruesa	m3	6	37	S/.39.90	S/.8,857.80
Piedra Chancada 1/2"	m3	3	37	S/.58.00	S/.6,438.00
Calamina Metálica 0.8x3.6	und	2	37	S/.13.50	S/.999.00
Listones de Madera 3"x16pies	und	2	37	S/.38.40	S/.2,841.60
Clavos 1/2"	kg	0.02	37	S/.5.90	S/.4.37
				Total	S/.35,013.77

Elaboración Propia

Se ha considerado mano de obra no calificada, así como la construcción de 37 microreservorios de igual dimensión 3x2x1.5 m aproximadamente.

**4.2.3 Costos adicionales**

A continuación se detallan los costos de transporte, tanto para los implementos del sistema, así como los materiales de construcción de los 37 microreservorios. Los coston fueron aproximados en base a lo presentado anteriormente.

Tabla 37: Costo de transporte

Transporte	Ida y vuelta
Implementos	S/. 7,500
Instalación	S/.42,500
Materiales	S/.5,010

Elaboración Propia

Se ha considerado que el proveedor de los implementos está en La Molina, teniendo en cuenta 10 viajes aproximadamente para llevar todos los implementos a la zona. También se consideró que el proveedor de los materiales está ubicado en el distrito de Santa Eulalia y se considera 37 viajes en un volquete para llevar los materiales, por ello se observa la diferencia de precios. La inversión total para la construcción de los 37 microreservorios es de 244 361 nuevos soles.

#### 4.3 Financiamiento del Proyecto

Para poder solventar la inversión de este proyecto que beneficiará a más de 30 familias en el Valle de San Gerónimo de Punan, se evaluaron dos propuestas de inversión las cuales son el crédito agropecuario de Agrobanco y el fondo Mi Riego ofrecido por el Ministerio de Agricultura y Riego.

El crédito agropecuario de Agrobanco ofrece una T.E.A. mínima del 15 % y máxima del 23 %, además de un año de periodo de gracia y costos de producción por hectárea de 5,000 soles.

El fondo Mi Riego del Ministerio de Agricultura ofrece financiar proyectos agropecuarios hasta por mil millones de soles en construcción y mejoramiento de canales, represas, reservorios, instalación de riego tecnificado (aspersión y goteo), así como proyectos novedosos relacionados al riego, siempre y cuando hayan sido declarados viables en el marco del Sistema Nacional de Inversión Pública (SNIP).

Los requisitos para postular a este fondo son<sup>2</sup>:

- Debe tratarse de proyectos para la provisión de servicios e infraestructura del uso de recursos hídricos con fines agrícolas, que causen impacto en la reducción de la pobreza extrema.
- Estar ubicados por encima de los 1 000 metros sobre el nivel del mar.
- Estar declarados viables por el Sistema Nacional de Inversión Pública y que cuente con el expediente técnico vigente.
- No estar incluidos en los Proyectos de Inversión Pública ganadores del concurso FONIPREL (Fondo de Promoción de la Inversión Pública Regional y Local). Las dependencias del Ministerio de Agricultura y Riego podrán postular proyectos, en tanto cumplan con los requisitos previstos en la presente norma y cuenten con la opinión favorable del Gobierno Regional o Local correspondiente, la cual operará como solicitud para efectos del presente Reglamento.

Por lo anteriormente mencionado, es preferible aplicar al Fondo Mi Riego del Ministerio de Agricultura, ya que es factible cumplir con todos los requisitos, además, que este no representaría una deuda para los pobladores.

#### 4.4 Evaluación Económica del Sistema de Riego por Goteo

A continuación, se presenta la evaluación económica de la instalación de los microreservorios. Para efecto de la evaluación, se consideró un análisis simplificado para un solo reservorio, un análisis de cobertura total de las 28,3 hectáreas de la zona

<sup>2</sup> Requisitos obtenidos de la web: <http://pregionales.minag.gob.pe/miriego/fondo-mi-riego>

de estudio, y un análisis final en función al número de microreservorios colocados. Los retornos del proyecto fueron estimados a partir de la ganancia por concepto del diferencial de producción que se obtendría luego de implementar el riego por goteo.

Se ha considerado un financiamiento con capital propio o con apoyo de un fondo del ministerio de Agricultura. Debido a que el costo de capital calculado por la fórmula del CAPM resulto en 9.5%, valor que es menor al costo del endeudamiento, se asume un costo de capital de 18.0% mayor al 15% TEA mínimo requerido por un prestado de Agrobanco.

#### 4.4.1 Evaluación Económica de la implementación individual de un microreservorio

En el caso de la implementación de un solo reservorio, se observa en la tabla 38 la variación de la inversión, así como el TIR y el VAN en relación al área cubierta. La tabla 38 nos muestra valores de TIR negativos para las áreas presentadas de 0.2 a 0.75 hectáreas, -21,7% y -17,1% respectivamente. La Figura 56 se obtuvo en base a esta tabulación. A partir de esto se obtiene que un área de 0,37 ha o aproximadamente 3 700 m<sup>2</sup> es la mínima para no incurrir en pérdidas en el establecimiento de un microreservorio. Sin embargo, se requiere de un área regada mayor a las 0,75 hectáreas aproximadamente para sobrepasar nuestro costo de capital del 18,0% anual.

De acuerdo al sistema planteado, el alcance máximo de un microreservorio (Figuro 56) es de aproximadamente 6 casilleros de 50mx50 m o equivalente a 1,55 ha. Para este nivel de área cubierta se obtiene un TIR de 39,7 %. Sin embargo, con la adición de un casillero más como área para regar se tendría que implementar un segundo microreservorio que reduce el TIR a 18,6 %.

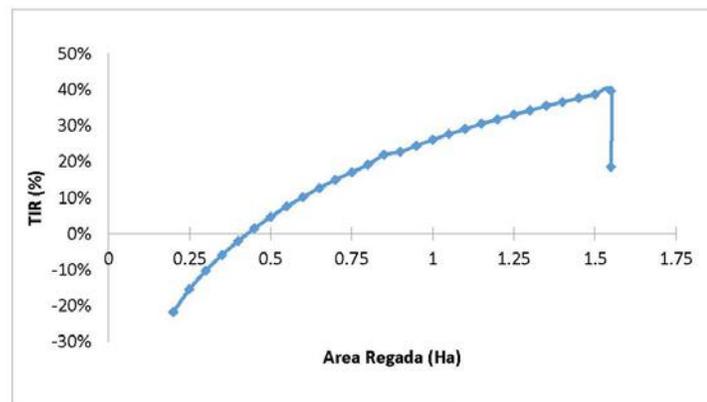


Figura 57: Gráfico de TIR vs Área Regada  
Elaboración Propia

Tabla 38: Tabla de Inversión según Cubierta el Área

P	INVERSION	Area (Ha)	TIR	VAN
1	S/. 5,086	0.2	-21.7%	S/. -3,743
1	S/. 5,229	0.25	-15.4%	S/. -3,415
1	S/. 5,372	0.3	-10.3%	S/. -3,087
1	S/. 5,516	0.35	-5.9%	S/. -2,759
1	S/. 5,659	0.4	-2.0%	S/. -2,431
1	S/. 5,802	0.45	1.5%	S/. -2,103
1	S/. 5,945	0.5	4.7%	S/. -1,776
1	S/. 6,088	0.55	7.6%	S/. -1,448
1	S/. 6,231	0.6	10.2%	S/. -1,120
1	S/. 6,374	0.65	12.7%	S/. -762
1	S/. 6,517	0.7	15.0%	S/. -464
1	S/. 6,660	0.75	17.1%	S/. -136
1	S/. 6,803	0.8	19.2%	S/. 192
1	S/. 6,947	0.85	21.9%	S/. 520
1	S/. 7,090	0.9	22.8%	S/. 848
1	S/. 7,233	0.95	24.5%	S/. 1,176
1	S/. 7,376	1	26.1%	S/. 1,504
1	S/. 7,519	1.05	27.7%	S/. 1,831
1	S/. 7,662	1.1	29.1%	S/. 2,159
1	S/. 7,805	1.15	30.5%	S/. 2,487
1	S/. 7,948	1.2	31.8%	S/. 2,815
1	S/. 8,091	1.25	33.1%	S/. 3,143
1	S/. 8,234	1.3	34.3%	S/. 3,471
1	S/. 8,378	1.35	35.5%	S/. 3,799
1	S/. 8,521	1.4	36.6%	S/. 4,127
1	S/. 8,664	1.45	37.7%	S/. 4,455
1	S/. 8,807	1.5	38.7%	S/. 4,783
1	S/. 8,950	1.55	39.7%	S/. 5,110
2	S/. 13,329	1.55	18.6%	S/. 191

Elaboración Propia

#### 4.4.2 Evaluación Económica de la implementación de la red completa de microreservorios (Caso I)

En la Tabla 39, se presenta el flujo de caja proyectado para la implementación del sistema de riego por goteo de 37 microreservorios en todo el valle. En el anexo 14, se presenta la estimación de la ganancia proyectada.

Tabla 39: Flujo de Caja Proyectado

P = 37													
AÑO	2015		2016		2017		2018		2019		2020		
GANANCIA		S/.	88,624	S/.	91,490	S/.	94,356	S/.	113,505	S/.	116,852		
INVERSION	S/.	244,361	S/.	3,700	S/.	7,400	S/.	7,400	S/.	7,400	S/.	7,400	
FLUJO	S/.	-244,361	S/.	84,924	S/.	84,090	S/.	86,958	S/.	108,105	S/.	109,452	
TIR	25.2%												
COK	18.0%												
VAN	S/.	43,495											

Elaboración Propia

Según los resultados mostrados, el VPN y TIR indican que la implementación de la propuesta es económicamente factible.

#### 4.4.3 Evaluación Económica en función al número de microreservorios instalados (Caso II)

La Tabla 41 muestra el monto de inversión, TIR, y VAN obtenidos para un número determinado de microreservorios P instalados en la zona de estudio. El detalle del flujo de caja para cada caso particular se encuentra en el anexo 15. Según los resultados mostrados, el VPN y TIR indican que la implementación a todo nivel es factible. Sin embargo, se evidencia que a partir de 25 microreservorios el VAN empieza a disminuir al igual que el TIR obtenido. Este número de microreservorios es menor al resultado sugerido por el modelo de localización de máxima cobertura que indicaba una cobertura del 95% del área para un nivel de P igual a 29. Por el contrario, la evaluación económica sugiere un nivel de P igual a 25 lo cual cubriría el 88% del área total disponible.

La tabla 40 presenta el flujo de caja proyectado para un P igual a 25 microreservorios.

Tabla 40: Flujo de caja proyectado para P=25

P = 25													
AÑO	2015		2016		2017		2018		2019		2020		
GANANCIA		S/.	77,548	S/.	80,054	S/.	82,562	S/.	99,317	S/.	102,248		
INVERSION	S/.	181,286	S/.	2,500	S/.	5,000	S/.	5,000	S/.	5,000	S/.	5,000	
FLUJO	S/.	-181,286	S/.	75,046	S/.	75,054	S/.	77,562	S/.	94,317	S/.	97,246	
TIR	34.1%												
COK	18.0%												
VAN	S/.	74,576											

Elaboración Propia

Tabla 41: TIR y VAN según el número instalados de microreservorios

P	INVERSION	Area (Ha)	TIR	VAN
1	S/. 8,943	1.5	48.8%	S/. 7,352
2	S/. 17,751	3.1	49.2%	S/. 14,840
3	S/. 25,927	4.4	47.8%	S/. 20,554
4	S/. 34,102	5.7	47.0%	S/. 26,269
5	S/. 42,413	7.1	46.3%	S/. 31,849
6	S/. 50,588	8.4	46.0%	S/. 37,564
7	S/. 58,131	9.5	45.0%	S/. 41,506
8	S/. 65,674	10.6	44.3%	S/. 45,449
9	S/. 73,351	11.7	43.5%	S/. 49,256
10	S/. 80,894	12.8	43.0%	S/. 53,199
11	S/. 87,804	13.7	42.1%	S/. 55,369
12	S/. 94,714	14.6	41.3%	S/. 57,539
13	S/. 101,759	15.5	40.5%	S/. 59,574
14	S/. 108,668	16.4	39.9%	S/. 61,744
15	S/. 115,578	17.2	39.3%	S/. 63,914
16	S/. 122,488	18.1	38.8%	S/. 66,084
17	S/. 129,533	19.0	38.3%	S/. 68,119
18	S/. 136,443	19.9	38.0%	S/. 70,290
19	S/. 143,353	20.8	37.6%	S/. 72,460
20	S/. 149,630	21.4	36.9%	S/. 72,857
21	S/. 156,042	22.1	36.3%	S/. 73,120
22	S/. 162,319	22.8	35.7%	S/. 73,518
23	S/. 168,596	23.4	35.1%	S/. 73,915
24	S/. 174,874	24.1	34.7%	S/. 74,313
25	S/. 181,286	24.8	34.1%	S/. 74,576
26	S/. 186,930	25.2	33.4%	S/. 73,201
27	S/. 192,574	25.6	32.7%	S/. 71,826
28	S/. 198,219	26.1	32.1%	S/. 70,452
29	S/. 203,998	26.5	31.4%	S/. 68,942
30	S/. 209,010	26.8	30.5%	S/. 65,795
31	S/. 214,021	27.0	29.7%	S/. 62,648
32	S/. 219,033	27.2	28.9%	S/. 59,501
33	S/. 224,180	27.4	28.1%	S/. 56,218
34	S/. 229,191	27.6	27.3%	S/. 53,071
35	S/. 234,203	27.9	26.6%	S/. 49,924
36	S/. 239,214	28.1	25.9%	S/. 46,777
37	S/. 244,361	28.3	25.2%	S/. 43,495

Elaboración Propia

#### 4.4.4 Análisis de Sensibilidad

El ingreso económico de la propuesta de mejora se basa en el diferencial de producción obtenido como resultado del aumento de la productividad. Por este motivo, la sensibilidad del flujo económico solo puede ser evaluada a partir de dos variables relevantes directamente relacionadas. Estas son el precio por kilogramo del producto obtenido y la cantidad en kilogramos producidos. En base a estas se presenta las variaciones del flujo de caja proyectado para el sistema con P igual a 37 y 25 microreservorios respectivamente. La variación de estas variables es presentada a continuación para un escenario pesimista con un efecto combinado del precio y producción resultante equivalente a un 15% menos sobre el flujo de ganancia.

##### Caso I

Tabla 42: Flujo de caja proyectado para P=37

P = 37

AÑO	2015	2016	2017	2018	2019	2020
GANANCIA	S/. 75,330	S/. 77,766	S/. 80,203	S/. 101,558	S/. 104,552	
INVERSION	S/. 244,361	S/. 3,700	S/. 7,400	S/. 7,400	S/. 7,400	S/. 7,400
FLUJO	S/. -244,361	S/. 71,630	S/. 70,366	S/. 72,803	S/. 94,158	S/. 97,152

TIR	18.4%
COK	18.0%
VAN	S/. 2,220

Elaboración Propia

##### Caso II

Tabla 43: Flujo de caja proyectado para P=25

P = 25

AÑO	2015	2016	2017	2018	2019	2020
GANANCIA	S/. 65,914	S/. 68,046	S/. 70,177	S/. 88,863	S/. 91,483	
INVERSION	S/. 181,286	S/. 2,500	S/. 5,000	S/. 5,000	S/. 5,000	S/. 5,000
FLUJO	S/. -181,286	S/. 63,414	S/. 63,046	S/. 65,177	S/. 83,863	S/. 86,483

TIR	26.5%
COK	18.0%
VAN	S/. 38,460

Elaboración Propia

El VPN y TIR indican que la implementación de ambas propuestas es económicamente factible. Asimismo, se observa que el escenario para P igual a 25 microreservorios presenta un mejor TIR igual a 26,5% comparado a un 18,4% obtenido para P igual a 37 microreservorios. Por tanto, esta alternativa es la menos afectada por un efecto combinado del precio y producción obtenida.

## CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presentan las conclusiones y las recomendaciones del proyecto:

### 5.1 Conclusiones

- La Agricultura es un sector económico de importancia en el Perú, pues a pesar de representar una pequeña parte del PBI. Es la principal fuente de ingresos para muchas familias en las zonas rurales del país (cerca del 31,6% de la población nacional según el INEI para el año 2012).
- El riego por gravedad es conveniente en relieves con pendiente decreciente; sin embargo, no es muy eficiente, pues la distribución de agua para cada cultivo no es uniforme; por ello se optó como propuesta de mejora la implementación de un sistema de riego por goteo.
- Se ha identificado que se puede aprovechar la geografía de la zona para ubicar los microreservorios al inicio de la pendiente descendiente. De este modo, no habrá la necesidad de utilizar bombas, ya que se aprovechará la energía potencial debido a la altura en la zona.
- En las visitas realizadas a la zona de estudio se identificaron zonas abandonadas aptas para el cultivo y se encontró la presencia abundante de maleza. El riego por goteo permite obtener un mayor rendimiento de los cultivos, haciendo que la actividad agrícola sea económicamente viable y atractiva. De este modo, se potenciarán las zonas existentes y las zonas abandonadas serán repobladas; asimismo, esta metodología de riego tendrá un aporte significativo en contrarrestar el crecimiento de la maleza en los alrededores de los cultivos, ya que la distribución de agua se realiza directamente en la zona de cada cultivo evitando la proliferación de maleza en otras áreas.
- Se proyectó la demanda de palta y chirimoya por el método de proyección lineal y el método estacional multiplicativo. Con esto se concluye que el método más apropiado para estimar la demanda futura es el estacional multiplicativo.
- La energía cinética del flujo de agua que recorre el canal puede ser aprovechada para suministrar de agua a los microreservorios. Esto podrá ser logrado a través del uso de una bomba de ariete, pues su accionamiento permite multiplicar la fuerza de entrada recibida.
- El software CROPWAT 8.0 provisto por la FAO es una herramienta muy útil para el cálculo de las demandas hídricas de los cultivos. A través del software,

es posible obtener una estimación adecuada que posteriormente servirá de input para la determinación de la capacidad de cada microreservorio.

- Se desarrollaron dos modelos de programación entera y uno de programación lineal. Para el modelo de cobertura se determinó el número total de microreservorios para cubrir el área total del valle y luego la máxima área cubierta para un número determinado de microreservorios; por otro lado, se utilizó un modelo de programación lineal para poder hallar la capacidad de cada microreservorio necesario en el sistema considerando la población de cultivos en el área estudiada. Todo esto demuestra la aplicabilidad de la programación lineal en la agricultura como una herramienta, a través de la cual, se pueden encontrar soluciones de optimización para el sistema existente.
- El financiamiento del proyecto puede ser cubierto en su totalidad por recursos provisto por el Estado. Es así, que al tener como opción de financiamiento al fondo "Mi Riego" del Ministerio de Agricultura y Riego, no se considera tener financiamiento por entidades bancarias que ofrezcan créditos agropecuarios, ya que este fondo dona hasta mil millones de nuevos soles a proyectos novedosos relacionados al riego.
- Este proyecto de mejora beneficiaría cerca de 33 familias en la comunidad de San Gerónimo de Punan a través de un aumento en la productividad de los cultivos de Palta y Chirimoya. Esto permitirá obtener mayores ingresos a los pobladores de la zona aumentando así la calidad de vida de ellos y de sus familias.
- La instalación de un sistema de riego por goteo no siempre es económicamente factible. El éxito de la inversión dependerá del área disponible para cultivo, los ingresos generados a través de la actividad agrícola, y los costos asociados a la misma.
- La situación actual puede ser mejorada a través de la implementación de un sistema integrado de riego por goteo el cual implica la instalación de 37 microreservorios con el fin de cubrir la totalidad de la zona de estudio. Por otro lado, mediante la instalación de 25 microreservorios se puede obtener una mayor rentabilidad económica; sin embargo, solo se cubriría el 88% de la zona cultivable.

## 5.2 Recomendaciones

- La municipalidad de Santa Eulalia debería invertir en infraestructura de riego (reconstrucción y mantenimiento de los canales de riego). Esto a través de una participación conjunta con los agricultores del distrito para así brindar sostenibilidad a la actividad agrícola, muy importante en el distrito de Santa Eulalia.
- Sería conveniente para la Agencia Agraria de Santa Eulalia mantener una continua comunicación con los comités de riego ubicados en el distrito con el fin de registrar información relevante en materia de resultados de la producción agrícola. Esta información sería de mucha ayuda para la toma de decisiones futuras, así como para futuras investigaciones a ser desarrolladas en esta localidad.
- La capacitación es un aspecto muy importante en la aplicación de las metodologías de riego tecnificado, por esto se propone capacitar a los agricultores de San Gerónimo de Punan en materia del uso adecuado de la metodología de riego por goteo con la finalidad de orientarlos en el funcionamiento del sistema, así como en su correcto uso y mantenimiento.
- Sería conveniente cubrir toda la zona cultivable de San Gerónimo de Punan plantando nuevos cultivos para un mejor aprovechamiento del área existente, y así, aumentar aún más la capacidad de producción.
- Se recomienda formar un equipo multidisciplinario de expertos, ya sean ingenieros civiles, agrónomos, etc, que ayuden a evaluar la implementación de los microreservorios en todo el valle, asimismo, a evaluar la distribución del nuevo sistema de riego por goteo.
- Se recomienda el recalcu de los volúmenes de agua para replicar la metodología empleada en la presente investigación en otras zonas del distrito. Además, se debe considerar la topografía de la zona de estudio y las fuentes de agua disponibles.
- Para efectos del proyecto de inversión, se sugiere realizar el dimensionamiento de cada microreservorio localizado en base a los cultivos que serán regados por el sistema particular. Esto permitirá costear de manera exacta la inversión necesaria, y así, obtener mayor precisión en el análisis económico del proyecto.

## Bibliografía

- ABE RIEGO  
Válvula de bola. Consulta: 9 de Octubre del 2015.  
<http://www.aberiego.cl/index.php?op=valvulas>
- AMERICA NOTICIAS  
Huarochiri: Huaicos afectan a 9 poblados en Santa Eulalia. Consulta: 17 de Mayo de 2015.  
<http://www.americatv.com.pe/noticias/actualidad/huarochiri-huaicos-afectan-9-poblados-santa-eulalia-n169517>
- AREX (Asociación Regional de exportadores de Lambayeque)  
2012 Perfil Comercial de la Chirimoya. Área de Comercio Exterior.
- CHURCH, R, Charles REVELLE  
1974 The Maximal covering location problem. Papers of the Regional Science Association Volume 32, Issue 1, pp 101-118.
- CHURCH, R.  
1974 Synthesis of a Class of Public Facilities Location Models. Ph.D. thesis The Johns Hopkins University, Baltimore.
- DASGUPTA, C., H. PAPADIMITRIOU, y U. V. VAZIRANI  
2006 Algorithms. Notas de Clase. King Abdulaziz University.
- DOORENBOS, J. y Otros  
1986 Las necesidades de agua en los cultivos. Estudio FAO: Riego y Drenaje (FAO). Direccion de Tierras y Agua. Roma.
- ERNST & YOUNG PERU  
2014 Guía de Negocios e Inversión en el Perú 2014/2015. Lima. Consulta: 17 de Mayo de 2015.  
[http://www.rree.gob.pe/promocioneconomica/invierta/Documents/Guia\\_de\\_Negocios\\_e\\_Inversion\\_en\\_el\\_Peru\\_2014\\_2015.pdf](http://www.rree.gob.pe/promocioneconomica/invierta/Documents/Guia_de_Negocios_e_Inversion_en_el_Peru_2014_2015.pdf)
- FRENCH, Richard  
1988 Hidráulica de canales abiertos. Primera Edicion. Mexico: McGRAW HILL.
- GARCIA, Alvaro y Miguel ORTEGA  
2012 Programación Lineal. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

- HILLIER, Frederick y Gerald LIEBERMAN  
 2015 Introducción a la investigación de operaciones. Octava edición.  
 México: McGraw-Hill.
- HYDRO ENVIRONMENT  
 Riego Localizado. Consulta: 09 de Octubre del 2015.  
[http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main\\_page=page&id=162](http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=162)
- INOSTROZA, Juan y Patricio Méndez  
 2009 Manual de Papa para la Araucanía: Manejo de cultivo, enfermedades y  
 almacenaje. Instituto de Investigaciones Agropecuarias –  
 Ministerio Agricultura. Temuco, Chile. Pág. 57-70.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA E INFORMATICA (INEI)  
 2015 Informe Técnico: Producción Nacional Febrero 2015. Lima.
- JACK NOTICIAS  
 Festival de la Palta Fuerte en Santa Eulalia. Consulta: 17 de Mayo de 2015.  
<http://www.jacknoticias.com/festival-de-la-palta-fuerte-en-santa-eulalia.html>
- JAEN CLIMA  
 Clasificación de los sistemas de riego localizado. Consulta: 9 de Octubre del 2015.  
[http://www.jaenclima.com/articulos/articulo\\_04.php](http://www.jaenclima.com/articulos/articulo_04.php)
- KRUGMAN, Paul y Robin WELLS  
 2007 Introducción a la economía: macroeconomía  
 Reverté. Madrid
- LEVERATTO, Claudio  
 2005 El Riego por goteo en la Huerta Comunitaria. Área de Diseño y  
 Comunicación – Plan Nacional de Seguridad Alimentaria. Buenos Aires.
- MENDOZA, Alirio  
 2013 Riego por Goteo. CENTA. El Salvador.
- MINAGRI Oficina General de Planificación Agraria  
 2006 Perfil del Mercado de la Palta. Unidad de Comercio Internacional
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y RIEGO  
 2015 Valor Bruto de la Producción Agropecuaria – VBP. Lima.
- MORADI-JALAL, Mahdi y otros  
 2007 Operación de embalse en la asignación de áreas óptimas de riego de  
 varios cultivos. Irán.

## MUNICIPALIDAD DE SANTA EULALIA

Santa Eulalia celebrara el XVIII Festival de la palta fuerte 2015. Consulta: 19 de Mayo de 2015.

<http://munisantaaulia.blogspot.com>

## MUNICIPALIDAD DE SANTA EULALIA

Municipalidad de Santa Eulalia convoca a concurso de logotipo del Festival de la palta fuerte 2015. Consulta: 17 de Mayo de 2015.

<http://munisantaaulia.blogspot.com>

## MUNICIPALIDAD DE SANTA EULALIA

Municipalidad de Santa Eulalia. Consulta: 17 de Mayo de 2015.

<http://www.munisantaaulia.gob.pe>

## PERU OPPORTUNITY FUND

2011 Diagnostico de la Agricultura en el Perú. Lima.

## REVELLE, Charles

1999 Optimizing Reservoir Resources: Including a New Model for Reservoir Reliability. New York City : John Wiley&Sons.

## SAGRISA

Bomba Turbina Vertical para Pozo Profundo. Consulta: 9 de Octubre del 2015.

<http://www.sagrisa.com/catalogo/index.php/industrial/bombas-de-uso-individual/sumergibles/bomba-turbina-vertical-para-pozo-profundo.html>

## SING, Ajay

2013 Irrigation Planning and Management Through Optimization Modelling. Kharagpur, India. Indian Institute of Technology.

## SHOCK, Clint y Teresa WELCH

2013 El Riego por Goteo: Una introducción. Oregon State University – Extension Service. Oregon – United States.

## TAHA, Hamdy

2012 Investigación de Operaciones. Novena Edición. México: Pearson Education.

## TECNICA INTERNACIONAL

División Manejo de Aguas – Sistemas de Riego. Consulta: 28 de Setiembre del 2015.

<http://tecnicainternacional.com/manejodeaguas/category/articulos-tecnicos-riego>

## TORO

Medidor de caudal y presión. Consulta: 09 de Octubre del 2015.

<http://www.toro.com/es-us/homeowner/do-it-yourself-irrigation/accessories/pages/model.aspx?pid=53351-flow-and-pressure-gauge>

## TUBERIA MORENO

Válvulas de admisión y expulsión de aire. Consulta: 9 de Octubre del 2015.

<http://www.tuberiamoreno.com/productos/riego-agricola/valvulas-de-admision-y-expulsion-de-aire>

## VARAS, Edmundo y Jorge SANDOVAL

1989 Riego por Aspersión. Institutos de Investigaciones Agropecuarias.  
Programa de Riego y Drenaje. Temuco, Chile.

## WINSTON, Wayne

2005 Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos. Cuarta Edición  
México D.F.: Thomson.

## ZENNER

Contadores Woltman WI-N. Consulta: 09 de Octubre del 2015.

[http://www.zenner.es/categorias/categorias/productos\\_medidores\\_para\\_grandes\\_volu\\_menes\\_de\\_agua/producto/contadores\\_woltman\\_wi-n.html](http://www.zenner.es/categorias/categorias/productos_medidores_para_grandes_volu_menes_de_agua/producto/contadores_woltman_wi-n.html)