INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

UNIDAD ZACATENCO

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

MODELACIÓN ESTOCÁSTICA Y FIABILIDAD DE UN SISTEMA HIDRÁULICO DE RIEGO POR GOTEO.

Tesis:
Que para obtener el
Grado Académico de
Maestro en Ingeniería Civil

Presenta:
Ing. Moisés Ochoa Flores

Directores de Tesis:
Dr. Mario Ulloa Ramírez
Dr. Juan Manuel Navarro Pineda

México, D.F. Febrero del 2011

SIP-14-BIS

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 18 del mes de febrero del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A.-U.Z. para examinar la tesis titulada:

MODELACIÓN ESTOCÁSTICA Y FIABILIDAD DE UN SISTEMA HIDRÁULICO DE RIEGO POR GOTEO.

Presentada por el alumno:

Ochoa	Flores	Moisés
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)

Con registro:

B	0	8	1	5	8	2

aspirante de:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron ***APROBAR LA TESIS***, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Mario Ulloa Ramírez

Dr. Juan Manuel Navarro Pineda

Dr. Jorge Meléndez Estrada

M. en I. Felipe López Sánchez

M. en C. Lucio Fragoso Sandoval

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

M. en C. Pino Durán Escamilla

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA UNIDAD ZACATENCO IPN ESIA MEXICO

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 19 del mes de Febrero del año 2011, el que suscribe Moises Ochoa Flores alumno del Programa de Maestría en Ingeniería Civil con número de registro B081582, adscrito a la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Mario Ulloa Ramírez y Dr. Juan Manuel Navarro Pineda, ceden los derechos del trabajo intitulado MODELACIÓN ESTOCÁSTICA DE UN SISTEMA HIDRÁULICO DE RIEGO POR GOTEO al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección mosseslee@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Moises Ochoa Flores

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis de maestría, si bien ha requerido de esfuerzo y mucha dedicación por parte del autor y sus directores de tesis, no hubiese sido posible su finalización sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que a continuación citaré y muchas de las cuales han sido un soporte muy fuerte en momentos de angustia y desesperación.

Primero y antes que nada, dar gracias a **Dios**, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Agradecer hoy y siempre a mi familia porque procuran mi bienestar y esta claro que si no fuese por el esfuerzo realizado por ellos, mis estudios no hubiesen sido posibles. A mi madre Juana, a mis hermanos: José Luis, Noé, Felipe y Porfiaría, porque el ánimo, apoyo y alegría que me brindan me dan la fortaleza necesaria para seguir adelante.

A mis compañeros de la Maestría: Orlando, Toxki, Martín y Oscar por ser las personas que ha compartido parte importante en este gran logro, que gracias a su compañía las cosas malas se convierten en buenas, la tristeza se transforma en alegría y la soledad no existe.

De igual manera mi más sincero agradecimiento al Dr. Mario Ulloa Ramírez y al Dr. Juan Manuel Navarro Pineda a quienes debo el realizar la Maestría en el Instituto Politécnico Nacional.

En general quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que han vivido conmigo la realización de esta tesis doctoral, con sus altos y bajos y que no necesito nombrar porque tanto ellas como yo sabemos que desde los más profundo de mi corazón les agradezco el haberme brindado todo el apoyo, colaboración, ánimo y sobre todo comprensión y amistad.

ÍNDICE

Capitulo		Pag.
	Resumen……	3
	Abstract……	4
1.0	INTRODUCCIÓN……	5
1.1	Justificación……	8
1.2	Objetivo……	8
1.3	Hipótesis……	8
1.4	Metodología……	8
2.0	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO……	10
2.1	Climatología……	16
2.2	Aspectos Abióticos……	20
2.3	Descripción fisiográfica y recursos naturales……	21
2.4	Aspectos sociales……	32
2.5	Aspectos productivos y económicos……	35
2.6	Descripción del sistema de tratamiento de las aguas residuales……	40
2.7	Descripción de las actividades de uso de aguas residuales……	48
3.0	MARCO TEORICO CONCEPTUAL……	50
3.1	El Riego……	50
3.2	Componentes de un sistema de riego tecnificado……	57
	3.2.1 Tuberías……	57
	3.2.2 Equipo de Impulsión……	61
	3.2.3 Equipos de Control y Medida……	62
	3.3.4 Filtros……	64
	3.3.5 Fertirrigación……	69
	3.3.6 Elección de tuberías, pérdidas de carga, perdidas secundarias, perdidas de goteros, perdidas en equipo de Impulsión, presión Requerida, consumo de combustible y lubricante……	72
3.3	Confiabilidad……	78
	3.3.1 Definición de confiabilidad……	80
	3.3.2 Probabilidad……	81

3.3.3 Falla..... 81
3.3.4 Sistema..... 81

3.4 Fundamentos matemáticos para el análisis y el cálculo de la confiabilidad..... 84
3.5 Distribuciones teóricas usadas en Confiabilidad..... 92
3.6 Procesos estocásticos homogéneos y no homogéneos..... 98

3.6.1 Procesos estocásticos homogéneos..... 102
3.6.2 Procesos estocásticos no homogéneos..... 108

4.0 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 111

5.0 ÁNALISIS DEL SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO..... 120

Conclusiones..... 132
Recomendaciones..... 135

Anexos..... 136
Bibliografía.....

RESUMEN.

Se analiza la confiabilidad de un sistema hidráulico de riego por goteo. Como caso de estudio se aborda los pastizales y árboles ubicado en la zona federal del ex lago de Texcoco. Se hace uso de cadenas de Markov y las distribuciones de probabilidad Exponencial, Log-normal, Normal, Weibull, Gamma, Binomial y Poisson entre otras, para el análisis de eventos aleatorios de interés.

Entre los componentes del sistema son:

- Fuente de abastecimiento de agua.
- Cárcamo de bombeo.
- Sistema eléctrico.
- Personal de operación.

Mediante la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con datos de puntos, líneas y áreas geográficamente referenciados se logró la localización del área espacial o una posición medible en el espacio relativo a la superficie terrestre de:

- La zona federal del ex lago de Texcoco,
- La vegetación de la zona,
- Las subcuencas del valle de México,
- Las zonas hidrológicas de la cuenca,
- Los ríos tributarios oriente del valle de México,
- La topografía de la cuenca,
- Los cuerpos de agua tales como; lagunas naturales y artificiales de la zona federal
- La ubicación del área donde opera el sistema de riego por goteo de pastizales y árboles Tamarix.

Y con la utilización de diagramas de bloques aplicados al caso de estudio se obtuvo un resultado de una confiabilidad aproximada de un 80 %, siendo este un rango bajo ya que para un sistema hidráulico de riego por goteo que operado con aguas residuales se considera de 85 %.

ABSTRACT.

We analyze the reliability of a hydraulic system of drip irrigation. As a case study deals with grasslands and trees located in the former federal Lake Texcoco. It makes use of Markov chains and exponential probability distributions, Log-normal, Normal, Weibull, Gamma, Binomial and Poisson among others, for the analysis of random events of interest.

Among the components of the system are:

- Source of water supply.
- Lift station.
- Electrical System.
- Operating personnel.

Using Geographic Information Systems (GIS) data points, lines and areas was achieved georeferenced spatial area location or position in space measured on the Earth's surface:

- The federal area of former Lake Texcoco,
- The vegetation of the area,
- The Valley of Mexico basins,
- The hydrology of the watershed areas,
- The eastern tributaries of the Valley of Mexico
- The topography of the basin,
- Water bodies such as: natural and artificial lakes of the federal zone
- The location of the area where it operates the drip irrigation system of grassland and salt cedar trees.

And with the use of block diagrams applied to the case study yielded a result of a reliability of approximately 80%, this being a low range as for a hydraulic system operated drip irrigation with wastewater is considered of 85 %.

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN.

El arte de riego es muy antiguo y ha sido esencial al desarrollo y florecimiento de algunas civilizaciones. Ya en el año 2100 a. C. se usaban sistemas elaborados, uno de ellos era un canal de 19 km de largo que desviaba las aguas desbordadas del Nilo al lago Moeris. En II Reyes 3:16-17 se alude al riego en el 2000 antes de J.C. De la misma forma se menciona el riego de: Incas, Siria, Persia, India, China e Italia.

En las faldas de los Andes peruanos se encontraron los restos de los canales de irrigación más antiguos conocidos hasta ahora en Sudamérica (Los canales del Valle Zaña, a 620 km al noroeste de Lima). Existen yacimientos en el área que tienen canales que datan de 5,300 años atrás.

La importancia del riego ha sido definida por Gulati.

“En muchos países el riego es un arte antiguo, tanto como la civilización, pero para la humanidad es una ciencia, la de sobrevivir”

El riego se aplica para lograr:

- Suministrar la humedad necesaria para el desarrollo de los cultivos.
- Asegurar un abasto suficiente de agua para las sequías de corta duración y clima impredecible.
- Disolver sales del suelo.
- Como medio para aplicar agroquímicos.
- Mejorar las condiciones ambientales para el desarrollo vegetal.
- Activar ciertos agentes químicos.
- Generar beneficios operacionales.

El riego por goteo ha sido utilizado desde la Antigüedad; se enterraban vasijas de arcilla llenas de agua con el fin de que el agua se infiltrara gradualmente en el suelo. El riego por gota a gota moderno se desarrolló en Alemania hacia 1860 cuando los investigadores comenzaron a experimentar la subirrigación con ayuda de tuberías de arcilla para crear una combinación de irrigación y de sistema de drenaje.

En los años 1860, tuberías perforadas fueron utilizadas en Alemania. Robey en los 20´s experimentó el riego por tubería porosa de tela en la universidad de Míchigan. Con la llegada de los plásticos modernos después de la Segunda Guerra Mundial, fueron posibles numerosas mejoras. Micro-tubos de plástico y

diversos tipos de goteros han sido empleados en invernadero en Europa y en Estados Unidos.

La moderna tecnología de riego por goteo fue inventada en Israel por Simcha Blass y su hijo Yeshayahuen 1959. En lugar de liberar el agua por agujeros minúsculos, que fácilmente se podían obstruir por acumulación de partículas minúsculas, el agua se libera por tuberías más grandes y más largas empleando el frotamiento para disminuir la velocidad del agua en el interior de un emisor (gotero) de plástico.

El primer sistema experimental de este tipo fue establecido en 1959 cuando la familia de Blass en el Kibboutz Hatzerim creó una compañía de riegos llamada Netafim. A continuación, desarrollaron y patentaron el primer emisor exterior de riego de gota a gota. Este método se perfecciono en Australia, en América del Norte y en América del Sur hacia el fin de los años 60.

Actualmente el Lago de Texcoco ha sido escenario, de la causa y efecto del desequilibrio ambiental en la región. Tomando en cuenta que fue el mayor cuerpo de agua de la Cuenca, su desecación originó tales tensiones ambientales que exacerbaron a muchos de los pobladores que vivían en el Valle de México producto de la dinámica social propia de la megalópolis capitalina.

Al respecto, se tiene que el crecimiento urbano ha llevado consigo a la destrucción masiva de la vegetación y la expansión de la carpeta de asfalto y de concreto que impide la infiltración hacia el subsuelo y hace que los escurrimientos de las corrientes sean torrenciales y los picos de sus avenidas pronunciadas, es por ello que a su paso arrastran suelo, basura y azolve lo que provoca desbordamientos e inundaciones.

Justo a la falta de filtración de los suelos existen factores determinantes que han influido en el rápido abatimiento de los niveles freáticos del subsuelo: la sobre explotación de 500 pozos profundos, la expulsión de los excedentes de agua y la fuerte evaporación que se producen en el área.

Esta situación origina hundimientos en las zonas de relleno ocupada por los lagos que se desecaron, generando el asentamiento total de la ciudad. Actualmente en la ciudad de México se observa una diferencia de hasta tres metros por debajo del nivel del lago de Texcoco, mismo que en otra época ocupó la parte más baja del Valle.

Estos tipos de sucesos llevó a la alteración del sistema hidrológico y nuevamente se presenta el fenómeno de avenidas cada vez más torrenciales, turbulentas y

erosivas que a su paso deslavan los suelos, forman cárcavas y barrancas cada vez más profundas y cuya última consecuencia es la desertificación de los terrenos.

Como parte de los efectos inmediatos a la desecación del lago fue que quedó al descubierto un amplio lecho salitroso que combinado con la materia orgánica de las recargas residuales de los ríos Churubusco y la de la Compañía, representa un foco de insalubridad para los habitantes de la región en tiempo de estiaje, cuando tiene lugar los vientos rasantes, que daban origen a las llamadas tolvaneras que invadían la ciudad.

CONAGUA aprobó el Fideicomiso Ambiental 1490, un sistema de riego por goteo para mitigar las tolveras con plantaciones de árboles de Tamarix y pastizales.

En el diseño ejecutivo de CONAGUA de las zonas de riego, se seleccionaron 569 has en la margen izquierda del Canal Texcoco Norte (un rectángulo de 5,667.33 m. de longitud x 1,004.00 m. de ancho), y 139 has en la margen derecha, con una figura trapezoidal, incluyendo seis hectáreas vecinas de la carretera de cuota Peñón-Texcoco. Lo anterior hace una superficie total de 708 hectáreas.

Actualmente el sistema de riego por goteo está funcionando solo para 600 has y se ha logrado una cubierta vegetal de 520 has en las tres zonas.

El material de las tuberías principales y secundarias son de PVC, y las líneas regantes (superficiales) son de manguera de polietileno de alta densidad, preparada químicamente para resistir los rayos ultravioleta solares.

La cantidad de goteros (Nestos) es de 1666 por hectárea de tipo desmontables, de 4 lph para cada árbol de tamarix, con una separación de 3 m.

Una sola planta de bombeo en la margen izquierda, con 3 Bombas eléctricas; una de 40 HP, para la zona I ubicada en la M.D. ; uno más de 100 HP para la zona II y un tercero de 125 HP *para la zona III.* El cárcamo de bombeo, está diseñado para recibir sólo los 30 centímetros superiores del tirante del Canal Texcoco Norte (en caso de tirante máximo, recibiría 60 cm).

La operación del sistema es de 8 horas al día, de lunes a sábado, de Noviembre a Abril se le considera época de estiaje y de Mayo a octubre época de lluvia, con mantenimiento al sistema todo el año. Ver Anexo A.

Para la ubicación geográfica del sistema se utilizó un Sistemas de Información Geográficos (SIG) diseñados para aceptar, organizar, almacenar, recuperar, analizar y desplegar la información geográfica o espacial. Ver Anexo B.

En la presente tesis se analiza la confiabilidad del sistema actual mediante la aplicación de cadenas de Markov y distribuciones de probabilidad como: la Exponencial, Log-normal, Normal, Weibull, Gamma, Binomial y Poisson, para ciertos eventos aleatorios de interés, como la probabilidad de falla del sistema, sus componentes y/o número de fallas por periodo.

En el capitulo uno se describe la justificación, el objetivo, la hipótesis y la metodología a utilizar para el análisis del sistema hidráulico de riego.

En el capitulo dos se describe la zona de estudio mediante la recopilación de los factores físicos, bióticos, geológicos, ambientales y sociales de la zona del ex lago de Texcoco y la aplicación de los SIG (Sistemas de Información Geográficos) a la información.

En el capitulo tres se hace la recopilación de los conceptos usados en sistemas de riego por goteo, así como los componentes que intervienen en su diseño, así como los fundamentos teóricos y metodología de confiablidad de sistema y los modelos probabilísticos a considerar en el análisis del caso de estudio

En el capitulo cuatro se hace el Planteamiento del Problema.

En el capitulo cinco se hace la modelación estocástica aplicando las distribuciones de probabilidad y analizando los resultados.

Por último se presentan las conclusiones, la bibliografía y los anexos de la tesis.

1.1 JUSTIFICACIÓN

En la Décima cuarta sesión extraordinaria de fecha 23 de noviembre de 1998, el Comité Técnico, autorizó el acuerdo número E.XIV.3 Fideicomiso Ambiental 1490 llamado "Programa para mitigar la emisión de partículas suspendidas en el Valle de México", proyecto prioritario en la Zona Federal del Ex lago de Texcoco.

Con este proyecto de **riego por goteo**, se pretendió solucionar una aplicación técnica de agua en las demandas requeridas por las plantas, permitiendo su cabal desarrollo, cubriendo parte del área problema que actualmente genera tolvaneras tan perjudiciales en la contaminación ambiental del Valle de México.

Actualmente CONAGUA ha logrado una cubierta vegetal de 520 Ha de 600 Ha en recuperación, esto en un tiempo aproximado de 10 años.

1.2 OBJETIVO

Conocer las variables físicas y de operación que intervienen así como su interrelación y estructura del sistema, para que a partir de las leyes de probabilidad de las variables de interés, medir mediante modelación estocástica la confiabilidad del sistema hidráulico de riego por goteo de la zona ex lago de Texcoco.

1.3 HIPÓTESIS

Conociendo las distribuciones de probabilidad de las variables físicas que intervienen en el sistema hidráulico de riego por goteo en el ex lago de Texcoco para su funcionamiento, podrá medirse mediante la modelación estocástica la confiabilidad del sistema y sus partes con el fin de proponer medidas preventivas y/o correctivas, así como el establecimiento de programas de mantenimiento, mejoras y de reemplazo para que el sistema hidráulico cuente con la confiabilidad adecuada.

1.4 METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la presente investigación, se partió de una revisión extensiva de diversas fuentes de información de sistemas de riego; de visitas de campo y de literatura sobre fiabilidad y de probabilidad, así como adquisición de información georeferenciada de la cuenca que presenta el sistema de riego por goteo como base para los Sistemas de Información Geográfica (SIG), posteriormente mediante una modelación estocástica se hace un análisis probabilístico aplicado a las variables físicas y de operación relevantes del caso.

CAPITULO 2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

Antecedentes y generalidades.

Se presenta el caso de la recuperación ambiental en la Zona Federal del Lago de Texcoco, cuyos trabajos se iniciaron en 1971, con la finalidad de evitar la contaminación atmosférica en la Ciudad de México, derivada de una condición de extrema degradación ambiental en el lecho desecado del lago de Texcoco y su cuenca tributaria.

La zona Federal del Lago de Texcoco se ubica al oriente de la Ciudad de México, dentro de la Zona Hidrográfica No. VII, de la Cuenca del Valle de México. Se encuentra a 2.237 msnm. Tiene un clima templado semiseco, caracterizado por valores altos de evaporación. En el área no hay núcleos poblacionales por tratarse de una Zona Federal. Sin embargo, por su localización, está sujeta a la presión urbana, ya que está delimitada por la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y por los municipios de Nezahualcóyotl, Chimalhuacán, Texcoco y Atenco del Estado de México. Por su ubicación, la Zona Federal Lago de Texcoco es un lugar primordial en el control de las aguas residuales de una parte de la Ciudad de México. El caudal de agua residual que se maneja en esta zona es de 10,0 m^3/s en el estiaje y 28,0 m^3/s durante el período de lluvias (valores promedio).

El Lago de Texcoco cuenta con tres plantas de tratamiento con una capacidad instalada de 1,5 m^3/s, que opera actualmente a 1,3 m^3/s. Una de estas plantas es el sistema de Lagunas Facultativas con Recirculación, que se opera a 0,5 m^3/s. Este sistema de tratamiento fue construido con recursos del Gobierno Federal, y desde el inicio de su operación en 1988, uno de sus objetivos fue dotar de agua tratada a una zona agrícola del Municipio de Texcoco, con la finalidad de reducir la extracción de agua del acuífero que se usa para riego.

El agua residual tratada en las Lagunas Facultativas con Recirculación se usa actualmente para conservación de un lago artificial de 36 millones de m^3de capacidad de almacenamiento, así como para la conservación de la fauna silvestre y para actividades de sembrado de pasto y forestación emprendidos en la zona. Por otro lado, también se suministra esta agua residual tratada a un área ejidal del Municipio de Texcoco para su uso en riego agrícola. La superficie regada y los volúmenes de agua utilizada con este fin fueron variables.

Se presentan dos propuestas para integrar un proyecto de tratamiento y reúso de agua para hacer más eficiente el uso del recurso y por ende para promover su conservación.

Por una parte, se propone la construcción de una planta con capacidad de 0,1 m^3/s, para reúso agrícola, proyecto en que se involucre de manera más activa a los usuarios. En este caso, se considera beneficiar a 40 ejidatarios que disponen de 80 ha de terreno en el ejido San Felipe - Santa Cruz de Abajo, mediante el suministro de agua tratada para cultivar alfalfa, calabacita o col en lugar de maíz ya que estos darían un mejor rendimiento para los ejidatarios.

Se considera también la construcción de otra planta de tratamiento con capacidad de 0,01 m^3/s para reúso en piscicultura, para lo cual se emplearán todos los estanques de producción de peces que actualmente operan en el Lago de Texcoco. Se propone desarrollar exclusivamente lo referente a la engorda de los peces, sobre la base del hecho de que la producción intensiva a escala comercial se puede desarrollar de manera controlada en el **Lago Nabor Carrillo** (figura 1), embalse de agua residual tratada en el que actualmente sólo se han ejecutado trabajos de forma ampliatoria. (Maya y Jiménez, 2000).

Figura 1. Fotografía aérea del lago Nabor carrillo y ubicación

Geográfica.

La sobre explotación del acuífero del Valle de México ha obligado a establecer la veda desde 1954. Uno de los problemas más importantes y costosos en ese sentido ha sido el hundimiento del suelo en la Ciudad de México, el cual se conoce desde 1925, en 1973-1986, el hundimiento promedio fue de 8 cm/año, sin embargo en algunas zonas es mayor, por ejemplo Xochimilco Mixquio, donde hay hundimiento hasta de 40 cm/año.

La vegetación nativa propia del ex Lago de Texcoco, corresponde a algunos “manchones” de pasto salado (“Dystychlis Spicate”) y arboles “Tamarix” que han logrado desarrollarse de manera silvestre y en ocasiones por plantaciones por

parte de la C.N.A. con resultados parciales por falta de agua oportuna en época de lluvias ó carencia total de agua especialmente en estiaje (Huesca, 1999).

El lago de Texcoco fue el cuerpo de agua más importante del Valle de México, siendo una parte fundamental del sistema y funcionamiento hidrológico de la cuenca.

La explosión demográfica y la expansión acelerada de la mancha urbana e industrial, junto con la deforestación, destrucción de suelos, desaparición de áreas verdes y de lagunas, el abatimiento de los recursos hidráulicos subterráneos, el comportamiento irregular de la hidrología que se manifiesta en la torrencialidad de sus corrientes, la erosión y las inundaciones, el desequilibrio de los ecosistemas que integran la cuenca, aunado a la desecación del Lago de Texcoco, llevaron al deterioro ecológico del Valle de México.

Por estas razones, las autoridades, los profesionales del país y la comunidad en general, aceptaron el desafío de recuperar aunque fuera una parte del Lago de Texcoco, no solo desde el punto de vista hidrológico, sino también desde el sanitario, y ecológico. Por eso, en 1971, la Secretaría de Recursos Hidráulicos formuló el Plan Texcoco, al desaparecer esa dependencia, el plan fue continuado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, quedando finalmente en manos de la Comisión Nacional del Agua, organismo desconcentrado de la SEMARNAP.

Es importante mencionar la dedicación profesional ejemplar del Dr. Nabor Carrillo Flores, quien fuera el pionero en el rescate del Lago de Texcoco.

Historia.

La cuenca del Valle de México fue la zona de mayor importancia económica, política, social y cultural de Mesoamérica. En la actualidad es asiento de una de las mayores concentraciones humanas del mundo.

El funcionamiento del lago de Texcoco, centro hidrológico de la cuenca del Valle de México, ha estado ligado íntimamente con el desarrollo social y urbano del valle. En la época prehispánica la zona lacustre llegó a cubrir hasta 2.000 km^2, aproximadamente 20% de la superficie total de la cuenca.

A la llegada de los españoles, gran parte del Valle de México, era una región lacustre, cuyo recipiente era el lago de aguas saladas de Texcoco, ubicado en su parte central y más baja. La ciudad de Tenochtitlán se hallaba en la laguna de agua dulce, separada de la salada por un albardón construido por Netzahualcóyotl en la época de Moctezuma.

La extensión de los lagos y de la zona lacustre variaba de acuerdo con la época del año y los ciclos de abundancia o sequía. Según datos históricos, el área de la zona lacustre era de cerca de 2,000 km^2, de los cuales el Lago de Texcoco, él más grande de ellos, ocupaba el 50% del área total, aproximadamente.

Años antes de la llegada de los españoles, Tenochtitlán había sufrido varias inundaciones, la más importante en 1449, con Moctezuma, quien solicitó a Netzahualcóyotl, señor de Texcoco, su asesoría para resolver el problema. Posteriormente se tomó la decisión de hacer todo el desagüe por un tajo a cielo abierto, iniciando los trabajos en agosto de 1637, terminando las obras en 1788. Sin embargo, la ciudad volvió a sufrir inundaciones varias veces.

La prioridad siempre fue sacar los excedentes de agua del Valle y las obras hidráulicas nuca fueron suficientes. El problema de inundaciones en las poblaciones urbanas es latente hasta nuestros días.

La desecación de los lagos y el deterioro ecológico de la Cuenca, está íntimamente ligado a la historia de la Ciudad de México, fundada en uno de los lechos lacustres. Para sus primeros pobladores, la compleja geografía hidrológica del Valle les permitió mantenerse aislados de las tribus que los hostilizaban, sin embargo, en tiempos de lluvias, el habitar en medio de un lago les representaba un peligro latente por inundaciones.

Esta situación constituyó uno de los principales problemas para la fundación de la nueva ciudad española y es en tiempos de la Colonia cuando se empieza a construir el Tajo de Nochistongo, primer dragado artificial de la Cuenca. A partir de este momento inició el proceso de desecación de los lagos.

En nuestros tiempos, el fenómeno del explosivo crecimiento demográfico que experimenta la Ciudad y su expansión hacia su zona conurbana así como el crecimiento de la actividad industrial, - con la consecuente devastación de amplias zonas verdes y el cambio de uso del suelo -, terminaron por quebrantar substancialmente el funcionamiento hidrológico de la Cuenca.

Ubicación.

El lago de Texcoco forma parte fundamental del sistema y funcionamiento hidrológico de la Cuenca del Valle de México.

Esta cuenca es una unidad hidrológica cerrada, actualmente drenada de forma artificial, que se ubica al centro del eje volcánico o falla de Humboldt. Su sistema lacustre estaba formado por 5 lagos someros, de las cuales, el 50 % del área total pertenecía al lago de Texcoco, ubicado en la parte más baja de la cuenca.

Esta posición originaba que sus aguas fueran de una gran salinidad, ya que era el recipiente natural de los sedimentos que bajan de las partes más altas de la cuenca que, a falta de una salida, convirtieron al lago en un verdadero mar interno.

La Cuenca del Valle de Texcoco abarca dos de las zonas hidrológicas del valle México, la zona IV, denominada "Teotihuacán", cuya área es de 930 km^2 y la VII denominada "Texcoco", con una extensión 1,146 km^2, lo que suma una superficie total de 2,076 km^2 incluyendo a las 10,000 hectáreas de la Zona Federal.

El lecho lacustre del Lago de Texcoco ocupa una superficie de 2,076 km^2 y abarca los municipios de Texcoco y Netzahualcóyotl del Estado de México y las delegaciones políticas de Venustiano Carranza y Gustavo A. Madero del Distrito Federal (Huesca, 1999).

En el Lago descargan las aguas de los ríos Churubusco, Piedad y San Francisco que llegan del Distrito Federal; y los ríos San Juan Teotihuacán. Papalotla, Xalapango, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica y Coatepec por la parte de la subcuenca oriental.

Del total de la superficie que comprende el lecho del lago, 10 mil hectáreas están destinadas a la zona federal de rescate hidroecológico, el resto ha sido ocupado por la mancha urbana de la zona conurbada de la Ciudad de México.

Localización Geográfica de la cuenca del Valle de México.

Zona Federal del Lago de Texcoco y el ejido San Felipe - Santa Cruz de Abajo, localizados en el Municipio de Texcoco, Estado de México. La Zona Federal y el Ejido se incluyen en la Zona Hidrológica VII denominada Texcoco, de la Cuenca del Valle de México (Lineamientos estratégicos para el desarrollo hidráulico región administrativa XIII Valle de México, 1999). La Zona Federal está situada en el borde sur de la meseta central de México, aproximadamente entre las latitudes norte 19º03'24" y 20º11'09" y las longitudes 98º11'53" y 99º30'24" al oeste de Greenwich. Con una extensión superficial de 9.600 km^2, está constituida por cadenas montañosas y lomeríos. Incluye territorio correspondiente a los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala y prácticamente todo el Distrito Federal.

La Zona Federal del Lago de Texcoco (Figuras 2) pertenece a la Cuenca del Valle de México, su superficie abarca principalmente parte de algunos municipios del Estado de México y colinda con la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (tabla 1,2 y 3).

Figura 2. Zona federal lago de Texcoco.

Tabla 1. Entidad federativa y municipios que se incluyen en la Cuenca del Valle de México.

Entidad federativa	Municipios en la cuenca	Porcentaje respecto al total de la superficie de la cuenca (%)	Superficie (km^2)
México	49	53	5.088
Hidalgo	15	27	2.592
D.F. (Delegaciones)	16	15	1.440
Tlaxcala	4	5	480
TOTAL	**84**	**100%**	**9.600**

Fuente: Proyecto Lago de Texcoco, Rescate Hidroecológico, G. Cruickshank , 2001

Tabla 2. Ámbito administrativo del territorio de la Zona Federal del Lago de Texcoco.

Municipio	Estado	Porcentaje de la zona federal lago de Texcoco que le corresponde	Superficie aproximada (ha)
Texcoco	México	61,24	6.091,40
Atenco	México	27,62	2.747,50
Nezahualcóyotl	México	8,59	854,44

Fuente: Proyecto Lago de Texcoco, Rescate Hidroecológico, G. Cruickshank , 2001

Tabla 3. Ámbito administrativo del territorio de la Zona Federal del Lago de Texcoco.

Municipio	Estado	Porcentaje de la zona federal lago de Texcoco que le corresponde	Superficie aproximada (ha)
Ecatepec	México	2,46	244,84
Chimalhuacán	México	0,06	5,92
Venustiano Carranza	D.F.	0,03	3,08

Fuente: Proyecto Lago de Texcoco, Rescate Hidroecológico, G. Cruickshank , 2001

2. 1 Climatología.

Temperatura.

La temperatura máxima alcanza de 30 a 32 °C entre abril y junio. Al comenzar la estación de lluvias, la insolación disminuye, los días son más frescos y se mantienen temperaturas máximas entre 26 y 29°C de julio a octubre; mientras que en la estación fría, la temperatura máxima varía de 26 a 28°C

Tomando en cuenta las altas temperaturas que se manifiestan y la frecuencia y duración de los vientos que favorecen a la evaporación, ésta ha alcanzado valores anuales hasta de 2,453.8 mm, con una media de 1,743 mm. Las temperaturas mínimas extremas tuvieron un promedio de 18°C. No obstante que se registran temperaturas bajas, éstas son esporádicas, lo cual permite que durante los meses invernales se encuentren en los lagos aves migratorias que vienen del Norte. (Ducks, 2005).

El clima en la Cuenca del Valle de México está condicionado por diferentes factores, tales como la altitud, humedad, vegetación, configuración topográfica, entre otras características.

En general, el clima del Valle de México se clasifica como subtropical de altura, templado, semiseco y sin estación invernal bien definida, la temperatura media anual es de unos 15ºC. Tabla 4.

Tabla 4. Tipos de clima en la Cuenca del Valle de México y área que representan del total de la cuenca.

Descripción del clima	Área en km^2	Porcentaje del área total (%)
Templado Semiárido B siKw (w)	2.296,11	23,92
Templado Subhúmedo (wO)	2.995,00	31,20
Templado Subhúmedo cb (w1)	1.829,67	19,06
Templado Subhúmedo cb (w2)	1.355,42	14,12
Semifrío Subhúmedo cb (w2)	1.123,80	11,70

Fuente: Proyecto Lago de Texcoco, Rescate Hidroecológico, G. Cruickshank , 2001

Precipitación.

La precipitación media anual registrada en el Atlas del Agua (período 1931-1970) editado por la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos, fue de 625 mm (estación Chapingo). Los datos actualizados al período 1981-1990, registran una precipitación media anual de 610 mm y de 810 mm en la zona hidrológica vecina No VII.

La temporada lluviosa en la Cuenca abarca generalmente los meses de mayo a octubre. En los demás meses sólo se registran lluvias aisladas. La precipitación media anual fluctúa entre los 385 y 1,400 mm. Las lluvias son intensas, concentradas y de corta duración. Durante una sola tormenta se puede precipitar entre 7 y 10% de lluvia media anual, y del total de lluvia que se precipita durante una tormenta, más de 50% lo hace sólo en 30 minutos. Durante la temporada de lluvia se precipitan entre 80 y 90% de lluvia del año, es decir aproximadamente 6.723,21 millones de m3 en el área de la Cuenca.

Debido a las características geográficas de la cuenca y según el patrón de precipitación, sobre todo el hecho de que las lluvias son intensas, concentradas y de corta duración, la mayor parte de los ríos son de carácter torrencial con avenidas de corta duración. La Cuenca del Valle de México se divide en 11 zonas hidrológicas. Tabla 5.

Tabla 5. Zonas hidrológicas en la Cuenca del Valle de México.

No. de zona	Nombre de la zona hidrológica	Área (km^2)	Precipitación media anual (mm)	Volumen (millones m^3)
I	Xochimilco	522	869,0	453,62
II	Churubusco	234	1.085,0	253,89
III	Ciudad de México	725	822,0	595,95
IV	Cuautitlán	972	781,0	759,13
V	Pachuca	2.087	501,0	1.045,59
VI	Teotihuacán	930	555,0	516,15
VII	Texcoco	1.146	635,0	727,71
VIII	Tecomulco	1.124	979,0	1.100,40
IX	Chalco	637	700,0	445,90
X	Pan	690	681,0	469,89
XI	Tochac	533	666,0	354,98
	TOTAL	**9.600**		**6.723,21**

Fuente: Proyecto Lago de Texcoco, Rescate Hidroecológico, G. Cruickshank , 2001

Las subcuencas del Valle de México son (figura 3):

San Juan Teotihuacán, Papalotla, Xalapango, Coxcacoaco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica, Coatepec, San Francisco, La Compañía y Amecameca.

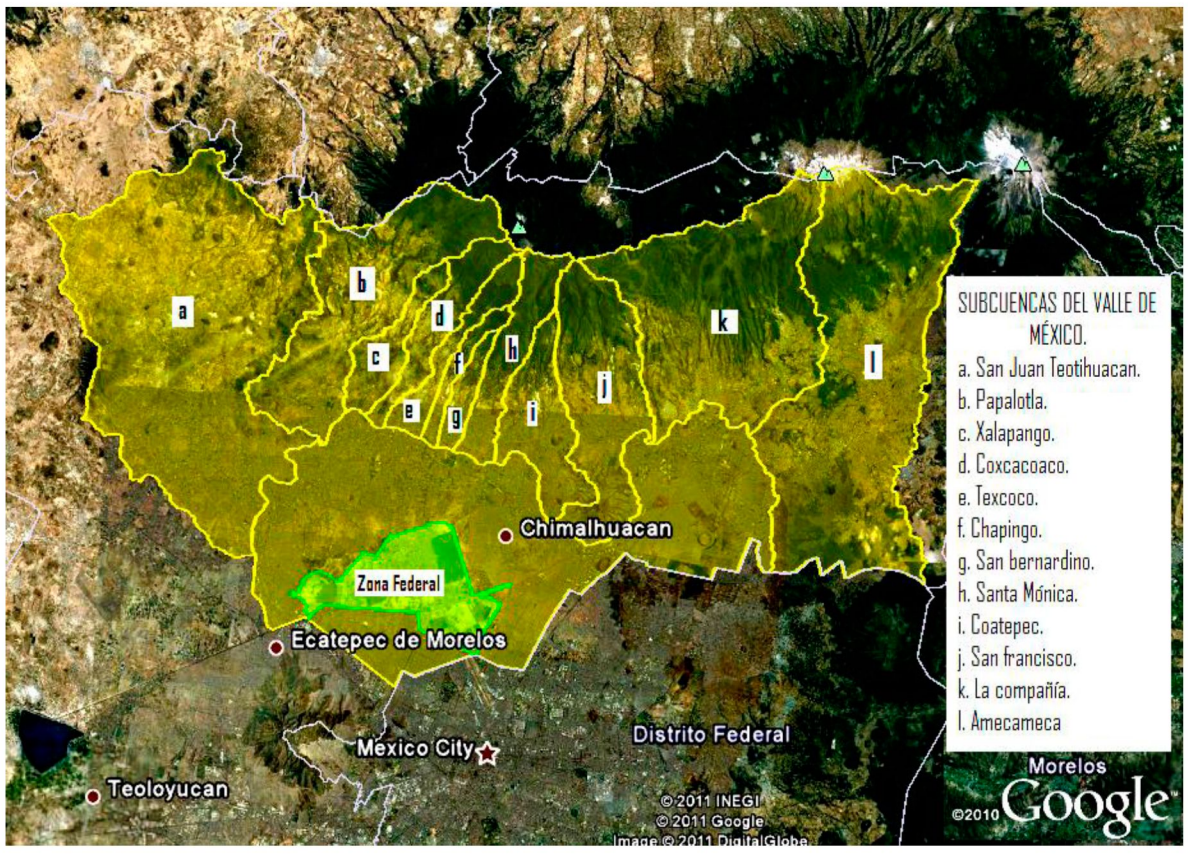


Figura 3. Subcuencas de valle de México.

La Zona Federal del Lago de Texcoco se encuentra en la Zona Hidrológica VII e incluye los ríos que descargan al oriente de la zona federal, sin contar al río San Juan Teotihuacán. Estos ríos son: Papalotla con sus dos brazos Santa Rosa y San Bartolo, Xalapango, Coxcacoaco, Texcoco, San Bernardino, Chapingo, Coatepec y Santa Mónica. También descargan los ríos de la Compañía y Churubusco, provenientes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. (Muciñio, 2001).

En las montañas, al Sur, SE y SO de la Cuenca, los valores de la evaporación son más bajos. En su parte N y NE la evaporación sobrepasa a la precipitación pluvial en la cuenca y puede llegar inclusive a valores de 1.800-2.200 mm en el Lago de Texcoco.

Los meses con promedio de humedad relativa más baja son enero, febrero, marzo, abril y mayo. En marzo por ejemplo se registra una humedad relativa promedio de 45%. De junio en adelante aumenta la humedad y en septiembre llega alcanzar un promedio de 75%.

Vientos.

En la segunda mitad de la época de secas, enormes cortinas de polvo se levantan en el área de Texcoco y viajan distancias considerables a cierta altura, antes de

volver a depositarse. Los vientos más frecuentes se dan de las 12 a las 16 horas y soplan del NE, aunque en marzo y abril se presentan vientos del SW y SE y durante la época de lluvias en el lago, por lo regular soplan del NE.

2. 2 Aspectos Abióticos.

El Sistema Hidroecológico Lago de Texcoco se ubica en el Estado de México, incluyendo los Municipios de Ecatepec, Atenco, Chimalhuacán, Texcoco y Netzahualcóyotl. Dichos municipios se ubican en lo que se conoce como el Valle de México.

El Sistema Hidroecológico Lago de Texcoco es alimentado por distintos afluentes, destacando los siguientes (figura 4):

- Río Churubusco: Es el más importante, siendo además el de mayor caudal del sistema; sus aguas ingresan por diferentes sistemas de bombeo y proviene del sur y sureste de la Cuenca y es que aporta todo el volumen de aguas residuales y pluviales a la laguna de Regulación "El Fusible".
- Río La Compañía: Conduce aguas provenientes del sureste del Valle, del Dren Xochiaca de Ciudad Netzahualcóyotl y de los drenajes de Chimalhuacán I y II.
- Río Los Remedios: Se localiza al norte de la zona del Lago. Presenta un flujo irregular y sus aguas provienen del poniente; actualmente el tramo comprendido entre Av. Central y el Gran Canal de Desagüe descarga a éste último y el tramo comprendido entre Av. Central y Canal de Sales es un brazo muerto sin flujo alguno.
- Río San Juan Teotihuacán: Su cauce natural llega a la Zona Federal del Lago por el noreste; durante la época de estiaje sus aguas son casi nulas, en parte por las bajas precipitaciones en su cuenca y en parte porque son aprovechadas en el riego de zonas ejidales contiguas.
- Río Papalotla: Es el más caudaloso de la zona oriente y llega a la Zona Federal por los brazos del Santa Rosa y el San Bartolo.
- Río Xalapango: Proviene de la porción noreste y vierte sus aguas a la Laguna del mismo nombre, ubicada dentro de la Zona Federal.
- Río Coxcacoaco: Corre paralelo al Río Xalapango y vierten sus aguas en la Laguna de Xalapango.
- Río Texcoco: En la actualidad funciona como drenaje sanitario de la zona conurbana de Texcoco.
- Río San Bernardino: Su cauce es paralelo al río Texcoco.
- Río Chapingo: Conduce el exceso de las aguas de riego utilizadas en la Zona de San Bernardino y las pluviales de su cuenca.
- Río Coatepec: Vierte sus aguas en la zona agrícola de Chimalhuacán.
- Río Santa Mónica: Se incorpora a la aguas del Río Coatepec y es utilizado en el riego en la zona agrícola de Chimalhuacán.

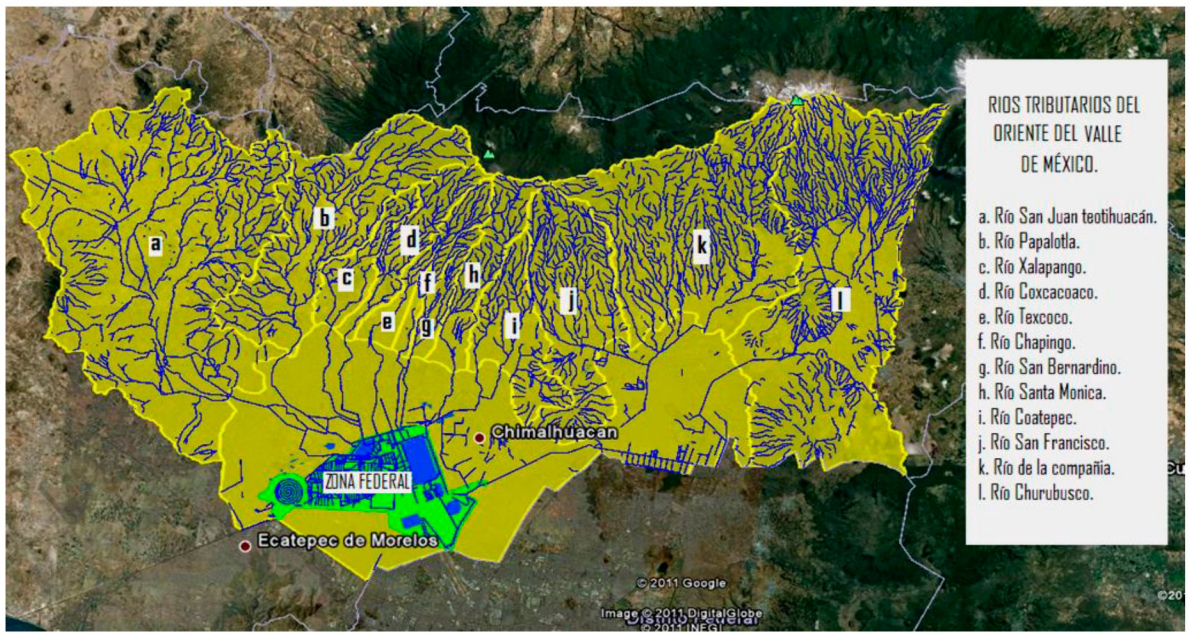


Figura 4. Ríos tributarios oriente del valle de México

Entre los cuerpos de agua que se localizan dentro del área de influencia de la zona de interés, se encuentran los reportados por Murillo (1991); estos cuerpos son cuerpos de agua artificiales, creados para el control de las avenidas.

Estos embalses tienen carácter permanente, con variaciones estacionales, excepto el Lago Churubusco y Laguna Xalapango, que realizan la regulación de avenidas, de aguas residuales el primero y de aguas-pluviales el segundo. (CONAGUA, 2008).

2. 3 Descripción fisiográfica y recursos naturales.

La Subcuenca Oriental correspondiente al Lago de Texcoco estuvo expuesta a la tala inmoderada de sus bosques, al sobrepastoreo y al uso agrícola inadecuado de terrenos con pendientes pronunciadas. Esto propició la pérdida de la capa fértil de suelo al ser arrastrada hacia las partes bajas, lo cual provocó además el azolve de las obras hidráulicas.

Por otro lado, el afloramiento del tepetate en miles de hectáreas, con la pérdida total de la vegetación, incrementó el efecto torrencial de las corrientes, aumentaron los picos de las avenidas y redujo la infiltración del agua en el terreno, además de disminuir la recarga de los acuíferos.

Los suelos de la cuenca presentan fuertes variaciones de acuerdo con la altitud, ya que hay diferentes tipos de materiales geológicos en la zona. Conforme a la clasificación FAOUNESCO (1975), citada por el INEGI en 1982, las unidades de suelos en las tres zonas son:

- Zona norte. Los principales suelos son los vertisoles y feozem (suelos cafés), localizados hasta el área próxima a los suelos salados del lago de Texcoco. Estas unidades de suelos ocupan 50% de la zona. En la parte media y alta se encuentran litosoles y cambisoles en 40% y 10% de faozem.
- Zona oriente. Las unidades predominantes son los vertisoles en la parte baja con 20% del área. En la parte media, los litosoles y feozem con 40%, y en la parte alta los litosoles regosoles, cambisoles y andosoles, que ocupan 40% de la zona.
- Zona sureste. En la parte baja hacia el ex Lago de Texcoco, y en la parte media se encuentran feozem háplicos y regosoles en 30% del área, mientras que en la parte alta de montaña hay litosoles y cambisoles en 50 y 65% respectivamente.

Topografía.

La topografía varía de acuerdo con la altitud ya que en las áreas bajas con cotas de 2.300 a 2.700 msnm, se presentan pendientes que varían entre 1 y 10%. En la parte media, las pendientes son de 10 a 20%, y en la parte alta son mayores a 20%, con un relieve que puede ser plano o abrupto, con valles, lomeríos y picos (figura 5).

Vegetación.

De acuerdo a la clasificación que Rzedowski hace para las comunidades vegetales de la República Mexicana, en la Zona Federal del Lago de Texcoco pueden observarse dos tipos de vegetación: la vegetación halófila y la vegetación acuática y subacuática (Rzedowski, 1978).

- *Vegetación halófila.* Es la mejor distribuida en la Zona Federal del Lago de Texcoco, es una comunidad sumamente agresiva y de acuerdo con Rzedowski (1957), es la primera colonizadora de los terrenos emergidos del Lago de Texcoco. Su gran tolerancia a la elevada salinidad de los suelos y a las frecuentes inundaciones, se debe básicamente a las adaptaciones que la especie dominante *Distichlis spicata* (L.) (pasto salado), presenta a estos factores.

- Vegetación acuática y subacuática. En este tipo de vegetación, se integran las comunidades vegetales cuya composición florística está representada por especies ligadas al medio acuático, o bien a suelos saturados permanentemente con agua. En general se encuentran dispersas y con una

distribución limitada, siendo los tulares las agrupaciones más conspicuas con *Scirpus lacustris* (L.) y *Typha angustiflora* (L.) como especies dominantes.

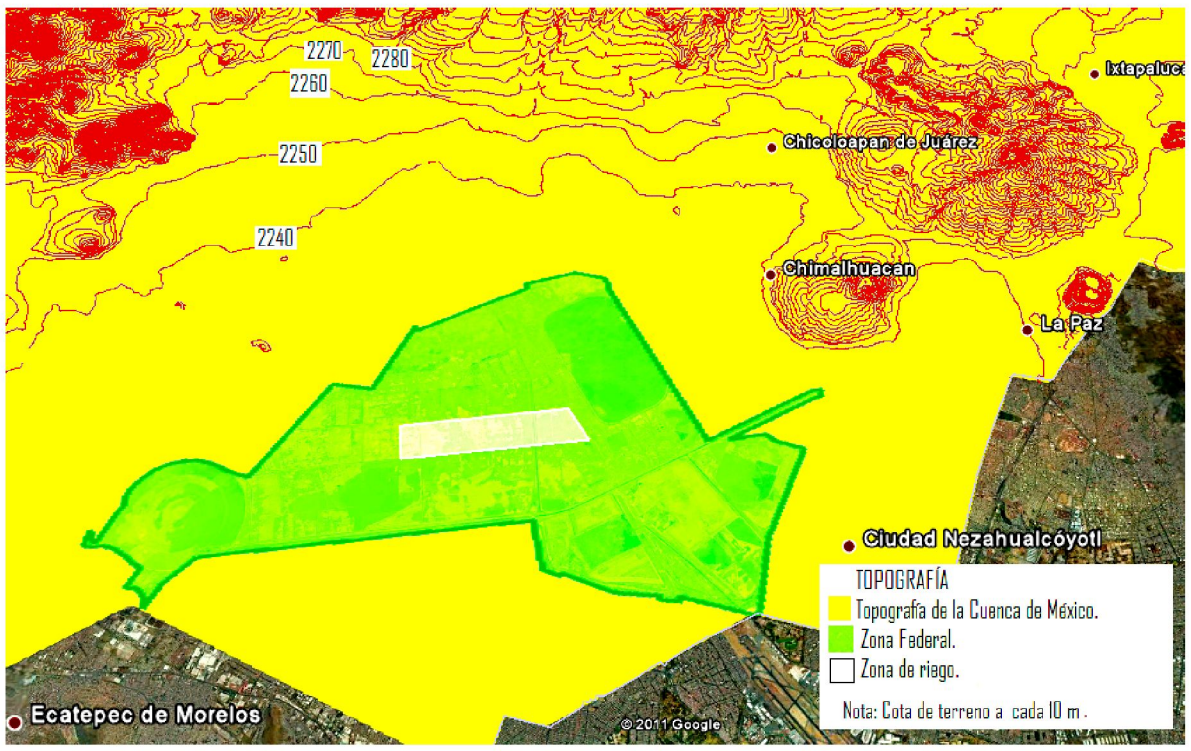


Figura 5. Topografía de la zona Federal.

La vegetación principal en la zona baja de la cuenca corresponde a cultivos de cereales y leguminosas con algunos pastizales donde aflora el tepetate; en las zonas media y alta existen los zacatones, bosques de encino y de oyamel, nopaleras, magueyales y bosques de pino, así como áreas con cultivos de maíz, frijol, cebada y trigo. (Huesca, 1999).

La vegetación nativa propia del ex Lago de Texcoco, corresponde a algunos "manchones" de pasto salado ("Dystychlis Spicate") y arboles "Tamarix" que han logrado desarrollarse de manera silvestre y en ocasiones por plantaciones propias de la C.N.A. con resultados parciales por falta de agua oportuna en época de lluvias ó carencia total de agua especialmente en estiaje (figura 6).

Precisamente este proyecto de **riego por goteo,** pretende solucionar una aplicación técnica de agua en las demandas requeridas por las plantas, permitiendo su cabal desarrollo, cubriendo eficazmente parte del área problema que actualmente genera tolvaneras tan perjudiciales en la contaminación ambiental del Valle de México.

Figura 6. Pasto salado (“Dystychlis Spicate”) y arboles “Tamarix.

Suelo.

Los suelos del Lago de Texcoco están formados por la acumulación de azolves provenientes de la parte alta de la cuenca oriental del Valle de México, entre los que se encuentra una capa de ceniza volcánica. Presentan características físicas y químicas que los hacen especiales, por lo que las actividades de tipo agrícola o el desarrollo de vegetación se reduce a especies halófitas. Tabla 6.

Tabla 6. Comparación de las características físicas y químicas de un suelo común con las del suelo del Lago de Texcoco.

Característica	Suelo normal	Suelo del lago de Texcoco
Conductividad eléctrica (mmhos/cm a 25°C)	0 – 4	8 – 120
Sodio intercambiable (%)	0 – 15	20 – 99
Potencial de hidrógeno	6,5 – 7,5	8,5 – 11
Conductividad hidráulica (cm/h)	2,0 – 12,0	0,1 – 2,0

Fuente: Proyecto Lago de Texcoco, Rescate Hidroecológico, G. Cruickshank , 2001

Una de las características físicas del suelo del lago de Texcoco que repercute en las actividades de riego y agricultura, es la presencia de arcillas expansivas (montmorillonita) y la capa de ceniza volcánica altamente hidratada (alófana). Este tipo de materiales pueden tener hasta 40% de agua. Sin embargo una vez deshidratados, no vuelven a retener la misma cantidad de agua, es decir, sufren

una fuerte disminución de su volumen, lo que ocasiona pérdidas de agua y provoca la formación de grandes grietas que se manifiestan durante el riego.

Para los trabajos de recuperación, después de probar con diversas especies vegetales, se seleccionó un pasto salado nativo de la zona (*Distichils spicata*) y una especie forestal arbórea del género *Tamarix sp.*; ambas tienen la característica de ser halófitas, y resultan más apropiadas para plantarlas en el suelo del ex lago.

Los avances de los programas de sembrado de pasto y forestación permitieron controlar las tolvaneras que se generaban en la zona, para lo cual se cumplió uno de los objetivos más importantes de este Proyecto. Sin embargo, hay que considerar que para sostener y mejorar la situación, es indispensable proseguir con las actividades de replantación, riego y drenaje en los terrenos de la Zona Federal del Lago de Texcoco. (Ducks, 2005).

Mecánica de suelos.

Según el Dr. Nabor Carrillo, el Lago de Texcoco era el paraíso de los especialistas en mecánica de suelos; ya que los suelos del ex Lago son casi únicos en el mundo por sus características fisicoquímicas, gran compresibilidad, alto contenido de agua, plasticidad, baja resistencia al esfuerzo cortante, impermeabilidad y la alta salinidad-sodicidad que se presenta en una gran extensión y hasta profundidades mayores a los 180 metros, con aguas cuyo nivel de salinidad es doble que la del agua de mar.

La Comisión Nacional del Agua, está proporcionando un estudio de mecánica de suelos realizado a terrenos del ex lago de Texcoco por el Ing. Civil y M. C. Agustín Deméneghi Colina en el que presenta diagrama de presión total a más de 20 m. de profundidad, diagramas de presión de poro y efectivas, falla de fondo por subpresión, capacidad de carga por resistencia al corte y otros aspectos técnicos, que servirán de apoyo para un mejor diseño del cárcamo de bombeo de éste proyecto.

Uso del suelo.

El uso de suelo en la región es principalmente agrícola y comprende la mayor superficie en el área y representa el 42.6% del territorio; A este le sigue en extensión e importancia el suelo de vocación forestal, con 35.9% y el pecuario con 11.3%. Cabe destacar la presencia de suelo erosionado (Figura 1) así como algunos cuerpos de agua, los cuales comprenden el 6.6% y el 1.62%, respectivamente. Se puede suponer que la tendencia del cambio del uso del suelo

ha sido de agrícola a urbano, y de forestal a agrícola-pecuario, como se muestra en el Cuadro siguiente. Tabla 7.

Tabla 7. Tipos de uso de suelo.

Uso del Suelo Superficie	(Km2)	Porcentaje
Agricultura	309.99	42.6%
Forestal	261.08	35.9%
Pecuario	82.16	11.3%
Erosión	48.07	6.6%
Asentamientos Humanos	14.28	2.0%
Cuerpo de agua	11.72	1.6%
TOTAL	727.3	100.0%

Fuente: Instituto Nacional de Ecología (2000) Carta Forestal Nacional

Fauna del Lago de Texcoco.

Lamentablemente, las condiciones de degradación del ex lago llevaron a reducir en número a muchas especies de aves nativas de la zona, sin embargo, uno de los indicadores que se tienen sobre el éxito de la recuperación ecológica del lago, lo constituye el regreso de cientos de especies de aves migratorias, lo que le ha convertido en el reducto avifáunico más importante del Valle de México. (Ducks, 2005).

Durante la temporada de otoño a invierno se observa la mayor cantidad de aves que llegan del norte del continente entre patos, garzas, pelícanos y aves de ribera o chichicuilotes. Antes de 1982 se estimaba un arribo de hasta 75 mil aves, hoy en día a partir de la construcción del Lago Nabor Carrillo, se registra un promedio anual de 300 mil.

La diversidad de especies registrada hasta el momento es de 134, de las cuales 74 son de ambientes acuáticos; destacan por su abundancia las variedades relativas a los patos y a las aves de ribera, a las garzas y otras que son típicas de ambientes marinos como gaviotas y pelícanos blancos. Las 60 especies restantes habitan bosques y pastizales.

En primavera, en las áreas con vegetación acuática se observan nidos de gallina de agua (Fulica americana), galleteras (Gallinula chloropus) y zambullidores (Podiceps nigricollis).

Las poblaciones de patos que se reproducen en la zona son las cercetas de alas azules (Anas discors), cercetas de alas café (Anas cyanoptera), el pato tepellate (Oxyura jamricensis), y el pato mexicano (Anas platyrhnchos diazi). Es importante destacar que esta última población se ha logrado proteger, lo que es un éxito, ya

que los expertos la consideraban en grave peligro de extinción, inclusive a nivel mundial. Ahora el ex Lago de Texcoco se encarga de ofrecerles un hábitat potencial para su desarrollo (figura 7).

Figura 7. Aves en el lago de Texcoco

De la fauna ictiológica nativa con la que contaba este Lago, únicamente subsiste el "pescadito amarillo", *Gyrardinichtis viviparus.* Además de esta especie, existen diferentes variedades de carpa y tilapia como especies introducidas con fines de cultivo y para los embalses artificiales. Sobre los anfibios, se identifican sapos *(Bufo* sp), ajolotes *(Ambistoma)* y algunas especies de ranas *(Rana* sp.). Sobre los reptiles, se reporta que no son muy abundantes, existen culebras de agua y culebra ranera (Thamnophis sp.) y algunas lagartijas (Ducks, 2002).

En 1986, Huerta reporta dentro de la zona federal 12 especies de mamíferos, pertenecientes a 12 géneros, 9 familias y 5 órdenes. Las especies más abundantes son pequeños mamíferos, como ratones de la familia Cricetidae y los insectívoros. También son relevantes las comunidades de mamíferos de tamaño pequeño y medio que habitan en el pastizal. Las de mayor abundancia son las especies de roedores Microtus mexicanus y Peromyscus maniculatus. La tuza del género Papogeomys; la comadreja de cola negra Mustela frenata; ardillas terrestres Spermophilus mexicanus; conejos Sylvilagus floridanus y la liebre de cola negra.

El grupo de las aves, es el más numeroso y representativo, además de ser el grupo más estudiado del área. Con base en los datos de monitoreo de la Gerencia del Lago de Texcoco, este grupo está compuesto por 134 especies, de las cuales el 85% son migratorias; y 74 especies corresponden a ambientes acuáticos,

pertenecientes a 12 familias: Prodicipediade, Phalacrocoracidae, Anatidae, Rallidae, Pelecanidae, Laridae. Rvnchopidae, Ardeidae, Threskiomitidae, Recurvirostidae, Charadriidae y Scolopaciade.

Características Físicas e Hidrogeológicas.

La Cuenca del Valle de México se localiza en la parte central del Cinturón Volcánico Transmexicano y tiene un área aproximada de 9000 kilómetros cuadrados. El valle, situado a una altitud cercana a los 2,400 metros sobre el nivel del mar, es el más alto de la región y se encuentra rodeado por montañas que alcanzan grandes. La temperatura promedio anual es de 15 grados centígrados (alrededor de 60 grados Farenheit).

Esta cuenca es una depresión cerrada de manera natural, que a fines del siglo XVIII fue modificada artificialmente para controlar las inundaciones en la ciudad. Las fuentes de recarga del agua subterránea en la cuenca se derivan, en gran medida, de las precipitaciones infiltradas y de la nieve derretida en las montañas y cerros que la rodean; este flujo se desplaza en forma de una corriente subterránea hacia las zonas menos elevadas. En su estado natural, la cuenca tenía una serie de lagos, desde los de agua dulce en el extremo superior, hasta los salados del extremo más bajo, en los que se concentraba la sal debido a la evaporación. La corriente de agua subterránea originaba numerosos manantiales al pie de las montañas, así como pozos en el valle. (Muciño, 2001)

Geológicamente, el área sur de la Sierra Guadalupe es la porción mejor investigada de la Cuenca de México. A esta área, que abarca la Ciudad de México, suele denominársele Valle de México, o porción sur de la cuenca, ya que está parcialmente dividida por varias montañas de menor elevación. De igual manera, al sistema acuífero con frecuencia se le llama Acuífero de la Ciudad de México.

Los depósitos de arcillas lacustres superficiales (por ejemplo, la capa de arcilla existente tanto en el fondo del lago antiguo como en el del actual) cubren el 23 por ciento de las elevaciones menos pronunciadas del Valle de México. Los depósitos aparecen en formaciones divididas, por lo que se conocen como "capa dura". Compuesta principalmente de sedimentos y arena, la capa dura se localiza entre los 10 y los 40 metros de profundidad y sólo tiene unos cuantos metros de espesor. A las capas de arcillas lacustres superficiales que alcanzan una profundidad de 100 metros se les denomina acuitardo, y son considerablemente menos permeables que la capa dura o los sedimentos aluviales subyacentes. En el siglo XIX, al explotarse el agua del subsuelo por primera vez, la capa dura dio origen a los primeros pozos artesianos.

El relleno aluvial se encuentra por debajo de las arcillas lacustres y tiene un espesor de 100 a 500 metros. Este material está interestratificado con depósitos de basalto, tanto del Pleistoceno como recientes; juntos, abarcan la porción

superior del acuífero principal en explotación. Otra unidad inferior del acuífero, compuesta por depósitos volcánicos estratificados que tienen de 100 a 600 metros de espesor, alcanza una profundidad que va de los 500 hasta los 1000 metros, aproximadamente. Esta unidad más profunda está limitada por un depósito de arcillas lacustres del Plioceno.

Tres principales zonas hidrológicas han sido definidas para el Valle de México: la zona lacustre, arriba descrita, el piedemonte o zona de transición y la zona montañosa. La zona lacustre corresponde a las elevaciones de menor altura. La región piedemonte se encuentra por lo general entre el lecho de los antiguos lagos y las montañas de mayor pendiente. Aquí, las capas de arcilla lacustre se intercalan con las de sedimento y arena; en las áreas más cercanas a la base de las montañas, el piedemonte está compuesto en gran medida por basalto fracturado de flujos volcánicos.

La formación de basalto es altamente permeable, con una buena capacidad de almacenamiento, y es considerada como el componente principal del acuífero en explotación; se encuentra expuesta cerca de la porción superior del piedemonte y se extiende por debajo de los depósitos aluviales del valle. El piedemonte, conocido también como zona de transición, es importante para la recarga natural del acuífero. (CONAGUA, 2008).

Las montañas que circundan la Cuenca de México son de origen volcánico. La Sierra Nevada se encuentra hacia el este, mientras que la Sierra de las Cruces se localiza hacia el oeste. La Sierra Chichinautzin, en el sur, forma la cadena más reciente. Su erupción ocurrió hace aproximadamente 600,000 años, bloqueando lo que antes fue un drenaje hacia el sur y cerrando definitivamente la cuenca. La Sierra Chichinautzin es la zona de recarga natural del acuífero de la ZMVM, debido a la alta permeabilidad de su roca de basalto. Los grandes manantiales de Xochimilco son un punto de descarga del flujo subterráneo; aquí se localizan algunos de los pozos más productivos del área. Debido a que toda la cuenca se encuentra rodeada por montañas, probablemente existan otras zonas de recarga del acuífero.

Históricamente, el principal acuífero abastecedor de agua estuvo sujeto a la presión artesiana, de manera que todos los pozos del fondo del valle llevaban el agua a la superficie sin necesidad de bombeo. Los gradientes hidráulicos naturales provocaban que el agua ascendiera sobre los acuíferos arcillosos. La proliferación de pozos en los últimos cien años ha cambiado las condiciones hidrológicas naturales. Ahora, los gradientes y el flujo en las capas superiores de los depósitos se encuentran, generalmente revertidos, hacia las zonas de mayor extracción.

2. 4 Aspectos sociales.

Población y características socioeconómicas.

La población urbana inició su acelerado crecimiento a principios del presente siglo debido al desplazamiento rural hacia la capital del país.

En 1900 había aproximadamente 471 mil habitantes, que representaba el 4 por ciento del total de la nación, que era de 11 millones 775 mil pobladores. El fenómeno de crecimiento se volvió explosivo a partir de 1950, comprendiendo a los 27 municipios del estado de México conurbados con el Distrito Federal, formando lo que se conoce como Zona Metropolitana de la Ciudad de México, en la que se concentra el 18.5 por ciento del total nacional, que era de 81 millones 133 mil 800 habitantes.

La tasa poblacional de crecimiento registrado en las décadas de los años 40 a los 60 fue del orden del 5.05 por ciento anual. Según los resultados del XI Censo General de Población y Vivienda de 1990, en la zona metropolitana de la Ciudad de México se tenía una población total de 15 millones 47 mil 685 habitantes, lo que correspondió a un incremento medio anual de 2.72 por ciento respecto de los datos de 1970. (CONAGUA, 1999).

En cuanto al aumento demográfico de los municipios más importantes del Estado de México que rodean a la cuenca del ex Lago de Texcoco, éste ha sido explosivo y anárquico. En las dos últimas décadas, algunos municipios como Ecatepec y Netzahualcóyotl alcanzaron tasas de crecimiento de 7.48 y 7.69 por ciento, respectivamente. En Texcoco y Chimalhuacán también se observaron cifras de crecimiento muy aceleradas. Este alarmante crecimiento poblacional es consecuencia de la inmigración de considerables núcleos campesinos a la zona conurbada, con la consiguiente proliferación de asentamientos irregulares, tugurios y cinturones de miseria, que se acentúan por la escasez de vivienda y servicios, generando amenazas de invasiones a las zonas federales y baldíos.

En esos asentamientos irregulares, la extrema pobreza, el desempleo, la falta de servicios, la insalubridad, etcétera, son aspectos que crean una situación conflictiva que puede llegar a ser incontrolables. Por otra parte, se destaca que la población económicamente activa se concentra en el sector terciario en el que obtienen generalmente percepciones menores al salario mínimo.

La concentración de la población en la capital del país y su zona conurbada es consecuencia, entre otras razones, del esquema centralizado de desarrollo que ha adoptado durante todo este siglo (figura 8). La cobertura de servicios públicos, así como las oportunidades de trabajo y educación, son de las más amplias en el país.

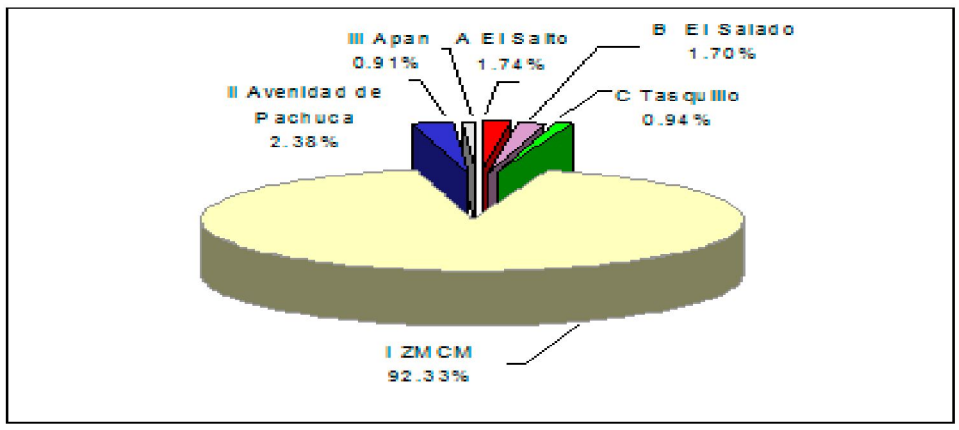


Figura 8. Distribución de la población en las seis zonas de la Región XIII.

Fuente: Desarrollo hidráulico de la región XIII, Valle de México, 1999

El conteo de 1995 para la Región es de 18'432, 234 habitantes, en tanto que, de acuerdo a las tendencias de crecimiento, los pronósticos de población indican que para los años 2000, 2010 y 2020 se alcanzarán 19.78, 22.26 y 24.61 millones de habitantes. (Figura 9)

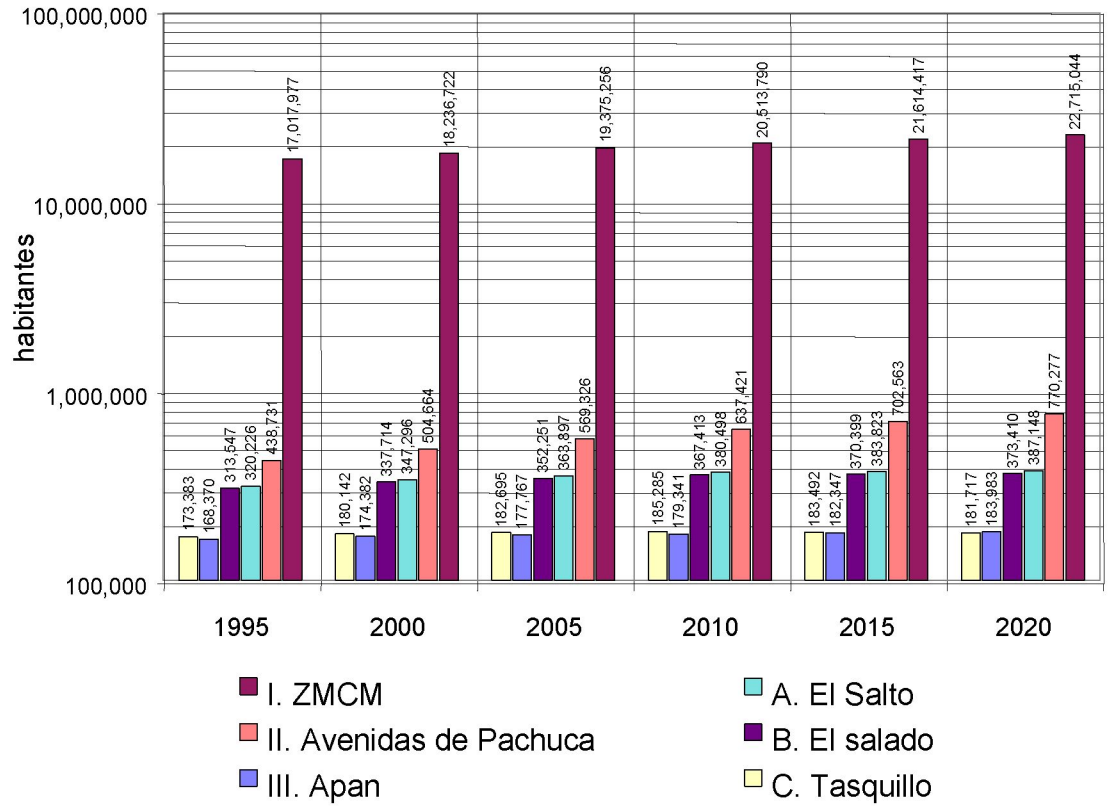


Figura 9. Proyección demográfica del período 1995 – 2020 en la Región XIII –Escala logarítmica –

Fuente: Desarrollo hidráulico de la región XIII, Valle de México, 1999

Estas proyecciones juegan un papel determinante, ya que determinan los escenarios de partida. Tabla 8.

Otros aspectos que se suman a la problemática regional y que completan el esquema general al que debe enfrentarse la planeación estratégica del manejo del agua son:

Las deficientes políticas y programas de ordenamiento territorial. En 1900 la población de esta Región representaba apenas el 4% de la población nacional, en tanto que en la actualidad llega al 20.3%. Las políticas de desarrollo regional y nacional no han logrado consolidar y desalentar la inmigración hacia la ZMCM. Aún cuando las tasas de crecimiento han descendido de un 4.5% en los años setenta a 1.8% en los noventa, hay algunos municipios conurbados a la ZMCM que siguen creciendo a los mismos ritmos de hace veinte años. (CONAGUA, 1999).

Tabla 8. Proyección demográfica del período 1995 – 2020 en la Región XIII

		Habitantes					
Subregión	**Zona**	**1995**	**2000**	**2005**	**2010**	**2015**	**2020**
Valle de México							
	I. ZMCM	17,017,97	18,236,72	19,375,25	20,513,79	21,614,41	22,715,04
	II. Av. de Pachuca	438,731	504,664	569,326	637,421	702,563	770,277
	III. Apan	168,370	174,382	177,767	179,341	182,347	183,983
	Total	**17,625,07**	**18,915,76**	**20,122,34**	**21,330,55**	**22,499,32**	**23,669,30**
Tula							
	A. El Salto	320,226	347,296	363,897	380,498	383,823	387,148
	B. El	313,547	337,714	352,251	367,413	370,399	373,410
	C.	173,383	180,142	182,695	185,285	183,492	181,717
	Total	**807,156**	**865,152**	**898,843**	**933,196**	**937,714**	**942,275**
Región XIII	**Total**	**18,432,23**	**19,780,92**	**21,021,19**	**22,263,74**	**23,437,04**	**24,611,57**

Fuente: Desarrollo hidráulico de la región XIII, Valle de México, 1999

En el nivel local tampoco ha existido una acción integral adecuada de regulación de los usos del suelo y protección de recursos naturales. Lejos de existir programas efectivos de reforestación y manejo de cuencas, continúa un proceso intensivo de deforestación, invasión y disposición de desechos sólidos en cauces y barrancas.

2.5 Aspectos productivos y económicos.

Infraestructura del Lago de Texcoco.

En la Zona Federal del Lago de Texcoco se cuenta además con la siguiente infraestructura e instalaciones:

- Cauces rectificados para el control de las aguas residuales; las más importantes son: el Dren General de Aguas del Valle de México, los dos Brazos del río Churubusco, y el río de la Compañía.
- Lagos. De aguas residuales para control de picos de caudal, Churubusco y Regulación Horaria. De agua combinada Recreativo y Laguna de Xalapango. De agua residual tratada, el Lago Nabor Carrillo.
- Sistema de pozos para abastecimiento de agua potable (Ramal Peñón–Texcoco).
- Plantas de tratamiento. Se ubican tres sistemas en operación para el tratamiento de agua residual y se encuentra en proceso de construcción otra planta más. También se construye una planta para remover fierro y manganeso, que cuando entre en operación se tratará el agua del Ramal Peñón–Texcoco.
- Desde el año 2000, funciona en la Zona Federal el Centro Mexicano de Capacitación en Agua Potable y Saneamiento.
- En la Zona Federal, el Gobierno del Distrito Federal, deposita residuos sólidos de parte de la Ciudad de México, en un área denominada Relleno Sanitario Bordo Poniente.
- La Zona Federal se comunica con la Ciudad de México a través de la Autopista Peñón- Texcoco, cuyas direcciones van de oriente a poniente y viceversa. (CONAGUA, 1999).

Población económicamente activa del Municipio de Texcoco.

De acuerdo con datos de la Dirección de Desarrollo Económico del Municipio de Texcoco, la población en edad de trabajar es de 124.220 habitantes, de la cual 50.185 (40,4%) son considerados como Población Económicamente Activa. De esta población, 97,3% se encuentra ocupada y se distribuye de la siguiente manera:

El 20,5% se dedica a la industria manufacturera, 17% a servicios comunales y sociales, y 14% al comercio. En conjunto, estas tres actividades concentran 51,5% del total de la población ocupada. Tabla 9.

La actividad agrícola en este Municipio se desarrolla en un total de 10.780 ha, que representan 1,2% con respecto al estatal. El maíz es el principal cultivo, con 4.790,7 ha cosechadas, que representa 48,5% con respecto al total cosechado en el municipio.

Entre las principales especies pecuarias predomina el ganado bovino con 18.008 cabezas; siguen en orden de importancia el ganado porcino con 15.406; ovino con 11.967; el equino con 4.084 y el caprino con 2.862 cabezas.

Las actividades industriales, de servicios y comerciales se detallan a continuación.

Tabla 9. Población ocupada en el Municipio de Texcoco según rama de actividad.

Rama de actividad	Número absoluto	Porcentaje (%)
Agricultura, ganadería, caza y pesca	6.348	13,0
Minería	196	0,4
Extracción de petróleo y gas	146	0,3
Industria manufacturera	10.010	20,5
Electricidad y agua	537	1,1
Construcción	3.418	7,0
Comercio	6.836	14,0
Transportes y comunicaciones	2.344	4,8
Servicios financieros	439	0,9
Administración pública y defensa	2.100	4,3
Servicios comunales y sociales	8.302	17,0
Servicios profesionales y técnicos	928	1,9
Servicios de restaurantes y hoteles	1.318	2,7
Servicios personales y mantenimiento	416	9,2
No especificado	1.416	2,9
TOTAL	**48.830**	**100,0**

Fuente: Proyecto Lago de Texcoco, Rescate Hidroecológico, G. Cruickshank , 2001

Para el desarrollo de la actividad industrial, el Municipio cuenta con 374 establecimientos industriales, que representan 1,6% del total del Estado de México. Tabla 10, 11 y 12.

El Municipio de Texcoco cuenta con un total de 107,2 kilómetros de carreteras, de las cuales 99,4 km se encuentran pavimentadas y 7,8 km son revestidas, lo cual permite una estrecha comunicación con el resto del Estado.

Hay dos administraciones de servicio postal y dos agencias, dos administraciones de telégrafos y 36.608 aparatos telefónicos con 22.482 líneas.

Existen en el Municipio 226 escuelas, de las cuales 68 son de nivel preescolar, 81 primaria, 43 media básica, 19 media superior, 4 superior y 11 inicial, especial y capacitación para el trabajo, las que dan servicio a un total de 52.455 alumnos, atendidos por 3.481 maestros.

En cuanto al sector salud, existe un total de 20 unidades médicas, distribuidas en las principales localidades del Municipio: 1 hospital general, 2 clínicas, 16 consultorios y 1 clínica hospital. El personal médico que brinda atención a la comunidad suma un total de 310 personas: 130 médicos y 180 enfermeras.

Tabla 10. Número de establecimientos manufactureros en el Municipio de Texcoco

Rama de actividad	Número absoluto	Porcentaje (%)
Fabricación de alimentos	149	39,8
Elaboración de bebidas	9	2,4
Industria textil	10	2,7
Fabricación de prendas de vestir	20	5,3
Fabricación de calzado e industria de cuero	3	0,8
Industria y producción de madera y corcho	18	4,8
Fabricación y reparación de muebles	10	2,7
Accesorios	3	0,8
Industria del papel	20	5,3
Industria editorial, de impresión y conexas	11	3,0
Industria química	50	13,4
Fabricación de productos de minerales no metálicos	57	15,3
Fabricación de productos metálicos	10	2,7
Fabricación, ensamble y reparación de maquinaria, equipo y sus partes	4	1,0
Otras industrias manufactureras		
TOTAL	**374**	**100,0**

Fuente: Proyecto Lago de Texcoco, Rescate Hidroecológico, G. Cruickshank , 2001

Tabla 11. Para el desarrollo del comercio el Municipio tiene un total de 2.209 establecimientos.

Tipo de comercio	Número absoluto	Porcentaje (%)
Comercio al por mayor	85	3,8
Compra–venta de material de desecho	6	0,2
Comercio de productos no alimenticios al por mayor. Incluye alimento para animales	70	3,2
Comercio de productos alimenticios, bebidas y tabaco al por mayor	9	0,4
Comercian al por menor	2.124	96,2
Comercio de productos alimenticios, bebidas y tabaco, al por menor en establecimientos especializados	1.219	55,2
Comercio de productos alimenticios al por menor en supermercados, tiendas de autoservicio y almacenes	13	0,6
Comercio de productos no alimenticios al por menor en establecimientos especializados	824	37,3
Comercio de productos no alimenticios al por menor, en tiendas departamentales y almacenes	5	0,2
Comercio al por menor de automóviles, incluye llantas y refacciones	59	2,7
Estaciones de gasolina	4	0,2
TOTAL	**2.209**	**100,0**

Fuente: Proyecto Lago de Texcoco, Rescate Hidroecológico, G. Cruickshank , 2001

Tabla 12. Número de establecimientos de servicios en el Municipio de Texcoco.

Servicios	Número absoluto	Porcentaje (%)
Servicios de alquiler y administración de bienes inmuebles	32	2,1
Servicios de alquiler de bienes muebles	44	2,9
Servicios educativos, de investigación, médicos de asistencia social y de asociaciones civiles y religiosas	283	18,7
Restaurantes y hoteles	356	23,5
Servicios de esparcimiento, culturales, recreativos y deportivos	72	4,8
Servicios profesionales, técnicos especializados y personales. Incluye los prestamos a las empresas	325	21,5
Servicios de reparación y mantenimiento	377	24,9
Servicios relacionados con la agricultura, ganadería, construcción, transportes, financieros y comercio	24	1,6
TOTAL	**1.513**	**100,0**

Fuente: Proyecto Lago de Texcoco, Rescate Hidroecológico, G. Cruickshank , 2001

Actividad agrícola de la cuenca del Valle de México.

Administrativamente, en la Cuenca del Valle de México existe un Distritos de Riego (73 La Concepción). Adicionalmente, existe un decreto para establecer el Distrito de Riego de Los Insurgentes con 24.000 ha. En su área de influencia se encuentran 32 aprovechamientos dispersos, de los cuales 31 son unidades de riego de agua residual superficial y 146 pozos de agua subterránea, además de unas 700 ha adicionales susceptibles de riego con agua de la Laguna de Zumpango. (Muciñio, 2001).

Tomando en cuenta lo anterior, existe una superficie total de aproximadamente 14.800 ha de riego para fines agrícolas, más las tierras de temporal. La problemática fundamental se relaciona con la disponibilidad de agua y la variación mensual de la misma.

En ese sentido, el segundo trimestre del año es crítico ya que se presenta el período de estiaje y por otra parte, los productores demandan volúmenes importantes para preparar sus tierras de cultivo.

El sector agrícola se caracteriza entre otras situaciones por los suelos de mala calidad y baja productividad, y por una débil estructura organizativa.

Abastecimiento de agua y saneamiento en la Región Valle de México.

La disponibilidad natural media de agua en la región se estima en 3.300 millones de m3 y la disponibilidad natural media per cápita en la región es la más baja del país con 170 m3/hab/año, en tanto que la media nacional es de casi 5.000 m3/hab/año.

La cobertura media de servicios de agua potable en la región es alta (96%) en relación con la media nacional de 87%, principalmente por el peso ponderado que tiene la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Sin embargo, para comunidades rurales de la cuenca la cobertura es de 43% y para localidades media urbana de 89% (poblaciones de menos de 50.000 hab).

De la misma manera, la cobertura de alcantarillado en la región es de 90% (la mayor del país), la cobertura media nacional es apenas de 73% En la región existen 41 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, con una capacidad instalada de 8.665 L/s. (CONAGUA, 1999).

Actualmente se están procesando 4.355 L/s que representan 50% de la capacidad instalada y 12,7% de las aguas urbanas generadas. Algunos de los principales centros de población y sus coberturas (reportadas por los propios organismos operadores) se muestran a continuación. Tabla13.

2.6 Descripción del sistema de tratamiento de las aguas residuales.

En esta sección se describe el sistema de Lagunas Facultativas con Recirculación, planta de tratamiento que actualmente se encuentra en operación.

Características de la planta de tratamiento: instalaciones y procesos.

Debido a los grandes volúmenes de aguas que demandaba la recuperación ecológica de la zona del Lago de Texcoco y en vista del gasto medio de aguas residuales disponibles en el lago, resultaba evidente considerar el aprovechamiento de estos volúmenes en las tierras de riego localizadas fuera de la zona, mediante el tratamiento y reúso de esta agua para cubrir las crecientes demandas de aquellas actividades que no requieren agua de calidad potable. Una alternativa de tratamiento que respondía a estas expectativas fue la de lagunas de estabilización.

Las Lagunas Facultativas con Recirculación se diseñaron con base en la experiencia de una planta similar que opera desde 1972 en Tel Aviv, Israel, en la que se tienen en cuenta las condiciones climatológicas específicas del área de Texcoco y la calidad de las aguas residuales del río Churubusco.

Tabla 13. Cobertura de los servicios en los principales centros urbanos de la Región Administrativa Valle de México

Centro urbano (por entidad)	Población (No. habitantes)	Agua potable (%)	Alcantarillado (%)	Saneamiento (%)	Demanda de agua potable (millones de m^3/año)
Distrito Federal					
Ciudad de México	8.591.309	97	97	15	1.090
Hidalgo					
Pachuca	244.688	95	93	0	22
Tula de Allende	86.782	70	60	0	8
Tepegi del Río	67.573	95	70	0	6
Actopán	45.946	98	95	0	4
Ixmiquilpán	75.725	80	83	0	7
México					
Ecatepec de Morelos	1.659.090	91	88	18	151
Nezahualcoyotl	1.164.705	100	99	3	105
Naucalpán de Juárez	825.817	95	85	2	75
Tlalnepantla	690.760	96	96	2	63
Chimalhuacán	558.354	65	75	0	51

Fuente: Proyecto Lago de Texcoco, Rescate Hidroecológico, G. Cruickshank , 2001

La planta de tratamiento tiene forma de semicírculo y una capacidad nominal de 500 Lps dividida en dos módulos de 250 Lps cada uno, los cuales funcionan en paralelo y son independientes entre sí. Cada módulo de la planta tiene la forma de un cuarto de círculo e incluye dos lagunas primarias y una laguna secundaria.

La planta se localiza entre el dren Chimalhuacán I, el lago Nabor Carrillo, la Planta de Tratamiento Lodos Activados y el Dren General del Valle de México (figura 10).

Debido a las características de los suelos de la zona, principalmente en lo referente a la baja capacidad de carga, alto contenido de humedad, carácter salino–sódico y al hecho de la presencia de un acuífero superficial con características salinas muy definidas, no se excavó el terreno sino más bien se construyeron diques con material de préstamo (una arcilla de origen volcánico conocida localmente como tepetate). Los terraplenes forman el diámetro exterior de las lagunas secundarias y las secciones correspondientes a las divisiones interiores de las lagunas primarias.

Las demás divisiones físicas de las lagunas corresponden a estructuras de concreto reforzado, que las separan entre sí y a su vez permiten la conducción del agua. Este es el caso del canal perimetral interior que separa las lagunas primarias de las secundarias, y a su vez opera como conducción del efluente de las lagunas primarias. El canal que corresponde al límite en el diámetro de las lagunas secundarias también funciona como canal de alimentación para las

mismas. Finalmente, el canal central conduce las aguas tratadas hasta el cárcamo de bombeo.

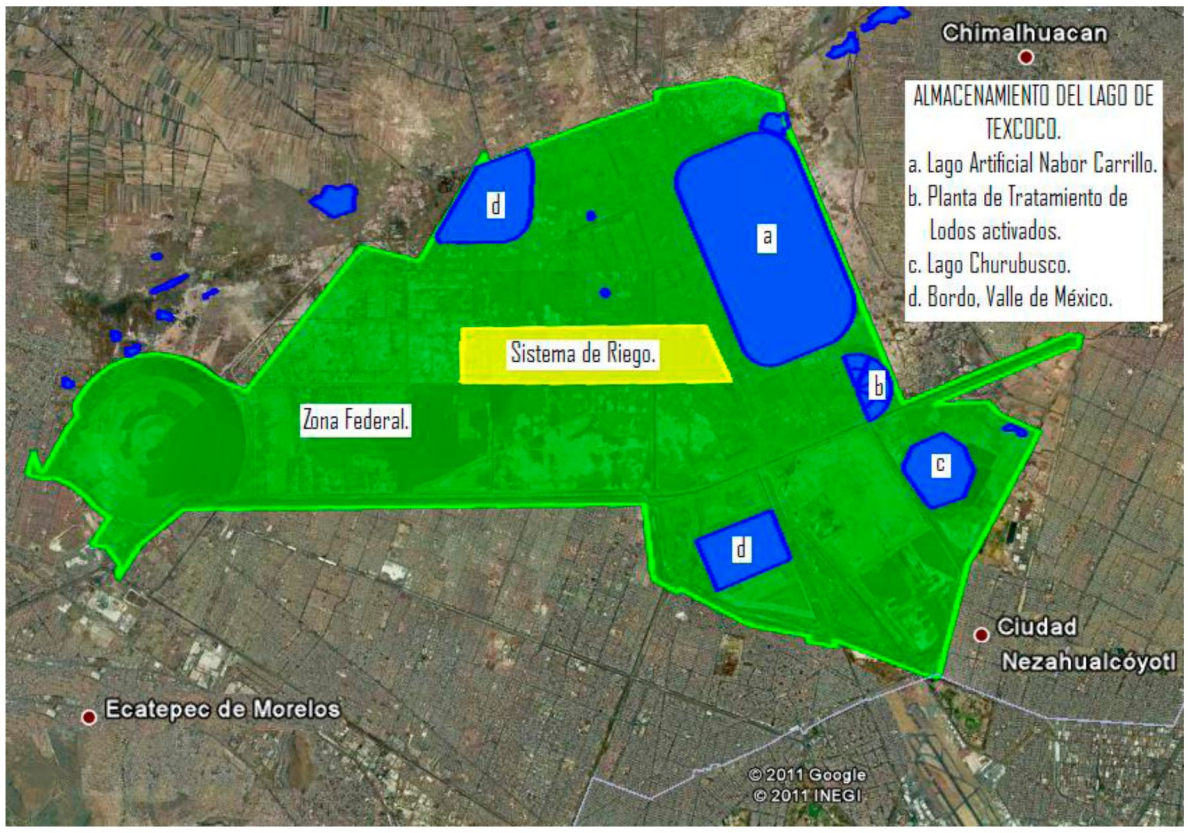


Figura. 10. Almacenamiento del lago de Texcoco.

Los taludes húmedos de los terraplenes se protegieron con concreto para evitar el problema de erosión por oleaje. El fondo de las lagunas no requirió ningún tipo de revestimiento ya que el suelo de la zona es impermeable, constituido por una arcilla. (CONAGUA, 2008).

Las Lagunas Facultativas con Recirculación se diseñaron en 1983. En esa época, el problema fundamental de control de la contaminación se asociaba con la descarga de materia orgánica, sin que se tomara en cuenta el aspecto de calidad microbiológica. Es por ello que el criterio de diseño de la laguna fue la carga orgánica, sin que en el diseño original se hubiera considerado la remoción de coliformes (totales y fecales).

Se seleccionaron las siguientes cargas orgánicas: 400 kg DBO/ha/día para las lagunas primarias y de 150 kg DBO/ha/día en promedio para todas las lagunas.

Se estableció el radio total de las lagunas en 650 m y el radio de las lagunas primarias en 400 m, con tiempo total de residencia hidráulico de 23 días (9 en las

lagunas primarias y 14 en la secundaria). La superficie total es de 66,4 has; cada laguna primaria tiene 6,3 has y cada laguna secundaria tiene 10,3 has.

Se consideró una profundidad de 1,5 m en todas las lagunas. A ésta se agregó un metro de bordo libre, tomando en cuenta la altura máxima posible de las olas que pueden producir los vientos de la zona.

La recirculación de parte del agua tratada se consideró como medida preventiva para evitar la generación de mal olor en el sistema. De acuerdo con esto, es importante aclarar que actualmente la recirculación se ha venido considerando como una medida correctiva, sobre todo en el período de lluvias y en invierno para favorecer la productividad primaria principalmente en las lagunas primarias.

En el diseño original del sistema de recirculación, se tomó en cuenta la información generada en lagunas similares que operaban en Israel y Sudáfrica. Para el diseño de la planta de Texcoco, se tomó en cuenta una tasa de recirculación promedio de 2:1 (para el caudal de diseño). Por lo anterior, las lagunas tienen una capacidad hidráulica de 1,000 Lps en las estructuras de conducción.

Caracterización del crudo y los efluentes: caudales y calidad sanitaria.

El agua residual tratada en las Lagunas Facultativas con Recirculación proviene del suroriente de la ciudad y llega a la Obra de Toma de agua cruda por el cauce denominado Brazo Derecho del Río Churubusco.

Debido a las condiciones de operación de la infraestructura de drenaje de la Ciudad de México, el agua debe ser bombeada para enviarla al río Churusbusco. Por esta razón, el caudal de operación no está sujeto a un régimen de escurrimiento de la cuenca tributaria, y debido al bombeo el rango de conducción se mantiene entre 4,0 y 9,0 m3/s durante el estiaje y en 28,0 m3/s en el periodo de lluvias. (CONAGUA, 1999).

En cuanto a la calidad de las aguas crudas y el efluente de la planta, en la siguiente tabla 14 se presenta los valores promedio.

Indicadores de eficiencia: remociones de materia orgánica, nutrientes y patógenas.

La planta opera con los siguientes porcentajes de eficiencia de remoción:

- Para DBO soluble: 85%
- Para ortofosfatos: 33%
- Para coliformes fecales: 99,73%

Tabla 14. Características del crudo y efluente de las lagunas facultativas.

Parámetro	Crudo	Efluente
DBO_5	140	21
Potencial de hidrógeno	7,8	8,9
Conductividad eléctrica (mmhos/cm^2)	1.950	2.120
Demanda química de oxígeno(s)	340	68
Nitrógeno amoniacal	23	4,5
Cloruros	280	270
Sodio	335	340
Sulfatos	160	120
Boro	1,4	1,24
Cromo	menor a 0,0016	menor a 0,0016
Coliformes fecales (NMP/100ml)	22,6 E + 06	6,1 E + 04

Fuente: Proyecto Lago de Texcoco, Rescate Hidroecológico, G. Cruickshank , 2001

Nota: Todos los parámetros en mg/litro, salvo que se indique lo contrario.

Es importante señalar que recientemente se deterioró el canal de efluente, lo que provocó la mezcla de agua de las lagunas primarias con el efluente. Por ello, el agua descargada a los receptores presenta un incremento en la cuenta de coliformes fecales. Dependiendo de las condiciones de operación hidráulica, el incremento puede ser de hasta 5,3 E + 05 coliformes fecales por cada 100 ml.

Se debe considerar también que el valor de conductividad eléctrica en el efluente tiene su origen en la calidad del agua cruda, la misma que está sujeta a fluctuaciones asociadas con el aporte de agua salobre de la zona.

Disposición final de los efluentes: descarga a ambientes acuáticos y reúso.

A continuación se relacionan los tipos de reúso del efluente de las Lagunas Facultativas con Recirculación. Por la importancia que tiene el Lago Nabor Carrillo en los trabajos de recuperación ambiental, conservación de la fauna silvestre y su uso potencial en la producción de peces, se detallan algunos aspectos relevantes del embalse tabla 15.

El lago Nabor Carrillo es el principal receptor final de las aguas tratadas en las lagunas facultativas y en la planta de lodos activados. Es un embalse artificial que se construyó con la finalidad de almacenar y regular las aguas residuales y los escurrimientos pluviales de los ríos de la cuenca oriental. (Muciñio, 2001).

Lo anterior es un elemento fundamental del programa para restaurar y aprovechar racionalmente los recursos del Lago de Texcoco, a fin de contribuir al abastecimiento de agua de la zona metropolitana y otras poblaciones, así como para brindar un hábitat apropiado para las aves acuáticas migratorias y nativas.

Actualmente y como consecuencia de la diferencia de nivel entre la descarga de los ríos de oriente y el nivel de operación del lago, el principal aporte de agua para el embalse es la descarga de las plantas de tratamiento.

Tabla 15. Caudales de reúso del agua de las lagunas facultativas con recirculación.

Reúso	Durante período de estiaje (m^3/s)	Durante período de lluvia (m^3/s)
Almacenamiento en el Lago Nabor Carrillo, para su posterior extracción y uso en trabajos de colocación de pasto y forestación	0,295	0,490
Riego agrícola en ejidos del Municipio de Texcoco	0,175	0,0
Riego de caminos de operación, áreas de proceso y en etapa de cierre en el Relleno Sanitario Bordo Poniente	0,030	0,010
TOTAL (m^3/s)	**0,500**	**0,500**

Fuente: Proyecto Lago de Texcoco, Rescate Hidroecológico, G. Cruickshank , 2001

Para su construcción se aprovechó la compresibilidad de los suelos arcillosos de la zona. Se perforó una batería de 180 pozos de bombeo a 65 m de profundidad con el fin de extraer agua y provocar el hundimiento del suelo. Mediante bombeo ininterrumpido durante cinco años (1973–1978) se provocó una depresión del suelo de aproximadamente 3,60 m.

Se obtuvieron así 12 millones de metros cúbicos de capacidad de almacenamiento. Posteriormente, se construyó un dique perimetral de baja altura, con una longitud de 11 km, para rodear la zona hundida e incrementar al doble la capacidad inicial. Finalmente, el peso del agua almacenada en el lago produjo un hundimiento adicional de 1,5 m. La capacidad final resultante fue de 36 millones de metros cúbicos de agua, en 920 ha y una profundidad media de 2,3 m.

El agua del lago Nabor Carrillo es reutilizada para riego en los trabajos de recuperación de la zona, principalmente lo referente a lavado de suelo, colocación de pasto y forestación. Además, durante un tiempo se efectuaron bioensayos con tilapia, para evaluar la respuesta de los organismos a las condiciones del medio. Sin embargo, debido a cambios en los programas de la institución, estos bioensayos no se concluyeron.

De acuerdo con un estudio elaborado entre abril de 1999 y febrero de 2000, el valor promedio de la temperatura del agua en el Lago Nabor Carrillo es de 17,8ºC, lo que confiere al embalse un carácter de cuerpo de agua cálida.Los valores mínimo y máximo de abril de 1999 a febrero de 2000 fueron de 11,5ºC y 24,0ºC, respectivamente. Presenta un régimen superficial dividido en dos temporadas; de abril a septiembre con valores de 19,8ºC y de octubre a febrero con valores de 14,5ºC.

Por la importancia que pudiera tener el lago en la producción de peces, a continuación se presentan algunos parámetros de calidad que se deben tener en cuenta para evaluar la factibilidad de desarrollo de esta actividad:

- Oxígeno disuelto. El promedio es de 9,3 mg/L; presenta valores mínimos de 4,7 mg/L y 1,9 mg/L en la parte media y el fondo de la columna de agua respectivamente.
- Conductividad. En promedio 4.941 mScm-1.
- Coliformes fecales no detectados en la mayor parte del embalse. Solamente en la zona donde descargan las plantas de tratamiento, se alcanzan valores de 2,4 E10+05. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que en el lago también descarga la planta de lodos activados y la eficiencia de remoción de patógenos de este sistema no es tan alta como en el caso de lagunas facultativas.
- Sólidos disueltos totales. Entre 1.755 y 2.888 mg/L.
- Cloruros de 880 a 848 mg/L.
- Sulfatos de 211 a 220 mg/L.
- Metales pesados, se encuentran en concentración menor a las establecidas por la normatividad para uso en riego agrícola y conservación de la vida acuática. (Muciñio, 2001).

En segundo término, el agua residual producida por las lagunas facultativas se reúsa para riego agrícola en el ejido San Felipe - Santa Cruz de Abajo.

La mayor demanda de agua para reúso agrícola se presenta durante el período de febrero a junio. Una vez establecido el período de lluvias, los agricultores dejan de necesitar agua tratada. El caudal requerido para esta actividad es muy variable y depende de la cantidad de usuarios que efectúen la solicitud correspondiente.

Durante 1999 y 2001, el caudal suministrado se mantuvo en el rango de 0,050 a 0,250 m3/s según el mes, aunque el promedio fue de 0,175 m3/s.

En menor proporción se encuentra el reúso en un sistema de disposición de residuos sólidos provenientes de un sector de la Ciudad de México, el Relleno Sanitario Bordo Poniente. El agua es transportada hasta el lugar de reúso mediante camiones cisterna de 40 m3 de capacidad, y se utiliza en el proceso de compactación de la cubierta final de residuos, riego de caminos de operación y áreas en proceso de clausura (forestadas y/o pastizadas). En este caso también se presenta variación significativa de la demanda de agua, ya que el mayor volumen reutilizado corresponde a los meses de octubre de un año a junio del siguiente con el valor máximo entre los meses de marzo y junio. En este período el reúso alcanza el valor de 30 LPS.

2.7 Descripción de las actividades de uso de aguas residuales.

Zona agrícola regada con aguas residuales en el Valle de México.

En el Valle de México, la agricultura es una actividad que requiere volúmenes importantes de agua. Sin embargo, 65% de los requerimientos para riego se satisfacen en agua residual sin tratamiento.

La mayor parte de la superficie agrícola del Valle se ubica en el Estado de México, y alcanza la cantidad de 14.830 ha, por lo que se puede estimar que la superficie sujeta a riego con agua residual sin tratamiento es del orden de 9.600 ha.

Los patrones de uso agrícola se caracterizan por el empleo de una lámina anual de 203 cm, muy elevada para los cultivos (Muciñio, 2001).

Sin embargo, la falta de capacidad de regulación, las características de los sistemas de riego y sus condiciones de operación determinan la baja eficiencia en el uso del recurso.

Los cultivos para los que se destina mayor superficie son: maíz para grano, remolacha, avena y maíz forrajero, alfalfa y frijol.

También hay una superficie destinada para las hortalizas, pero no es representativa respecto al total de superficie destinada para los cultivos mencionados.

En los siguientes ítems, solamente se hará mención a lo correspondiente a la zona del Municipio de Texcoco.

Sistema de riego utilizado en la Zona del Lago de Texcoco: infraestructura, caudales y métodos de riego.

En la zona, el sistema de riego con aguas residuales es generalmente por gravedad, por canales rústicos, y en el menor de los casos, las extracciones se ejecutan con bombeo.

No se cuenta con un inventario respecto a la superficie sujeta a riego con agua residual, ya que inclusive para un mismo ejido, una parte puede recibir riego con agua del acuífero y otra con agua residual.

Otras actividades de reúso existentes.

En lo que respecta al reúso de agua residual sin tratamiento, existe en la zona de estudio una planta de tratamiento de la Comisión Federal de Electricidad, que trata agua residual para reúso en la termoeléctrica Valle de México.

Evaluación económica (en US$).

Costos de inversión y operación de las Lagunas Facultativas con Recirculación.

En 1983 se estimó que la planta de Lagunas Facultativas con Recirculación tendría un costo de construcción de aproximadamente US$3 millones. Todos los recursos requeridos fueron aportados por el Gobierno Federal. La supervisión y elaboración del proyecto y la ejecución de los trabajos estuvieron a cargo de la entonces Comisión del Lago de Texcoco. El costo de inversión correspondió exclusivamente a la construcción de la planta. No se incluyó el costo del terreno ya que la Zona Federal del Lago de Texcoco pertenece a la Federación y por lo tanto no fue necesaria erogación alguna para la adquisición. (Muciñio, 2001).

Su costo actual de operación es de 0,99 centavos de dólar americano por m3 de agua tratada, el cual comprende todo el proceso es decir desde el bombeo de agua cruda hasta el bombeo de efluente de las lagunas secundarias ya que no hay reúso de las lagunas primarias. Tabla 16.

Tabla 16. Costo anual de operación para la planta de tratamiento, Lagunas Facultativas con Recirculación (US$).

Rubro	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Costo mensual	Costo anual
Supervisor	Mes	0,3	1.100	330	3.960
Operadores	Mes	12	463	5.556	66.672
Análisis agua	Lote	2	50	100	1.200
Mantenimiento	Jornal (por mes)	10	16	160	1.920
Materiales	Lote	1	1.200	1.200	14.400
Pago de energía eléctrica	Lote	1	5.750	5.750	69.000
				TOTAL	**157.152**

Fuente: Proyecto Lago de Texcoco, Rescate Hidroecológico, G. Cruickshank , 2001

CAPITULO 3 MARCO TEORICO CONCEPTUAL.

3.1 El Riego.

El riego se define como la aplicación de agua en forma artificial, no por el producto de la lluvia, a un determinado terreno con el fin de que este recupere un nivel de humedad que sea aprovechable por las plantas que en él están arraigadas permitiéndoles vivir y desarrollarse.

Cuatro sistemas de riego: el riego por goteo, el riego por aspersión, el riego por microaspersión y el riego californiano. Cada tipo de riego está diseñado para ser ocupado bajo ciertas características climáticas, de tipo de suelo y cultivo.

Tipos de Riego Tecnificado.

Riego californiano.

El sistema de riego californiano consiste básicamente en la conducción y distribución de agua mediante el uso de redes de tuberías desde la fuente hídrica (canal, pozo, embalse, etcétera.) hasta el terreno a regar.

Las tuberías reemplazan a las acequias madres o cabeceras de riego tradicional, son hechas de material tradicional como PVC, aluminio, etc., con características de mayor flexibilidad de asentamiento en el terreno. (Goyal, Martínez y Pagan, 2001)

Este sistema aprovecha la topografía del terreno permitiendo la entrega de agua con presiones reguladas y caudales controlados, orientados hacia los surcos, bordes o platabandas.

Los sistemas de riego californiano se dividen en móviles y fijos. En los sistemas móviles las tuberías son trasladadas dependiendo de la necesidad de riego de los cultivos. Las tuberías poseen sistemas de acople rápido facilitando el ensamble de la línea y viceversa, siendo necesario solo un operador para el sistema. El agua sale por pequeñas compuertas hechas en la tubería al surco o directamente al cultivo.

En los sistemas fijos las tuberías van enterradas, en cada cabecera de huerto existe una válvula que permite la salida de agua al surco. Este sistema es muy aplicado en plantaciones donde los cultivos poseen una vida productiva extensa, como los frutales.

Las principales ventajas del riego californiano son:

- Su eficiencia de aplicación de agua es del orden del 65 %.

- Se elimina el uso de acequias y con ello el crecimiento de malezas.
- Las pérdidas por infiltración, evaporación y evapotranspiración de malezas se reducen a cero en los tramos de conducción.
- El movimiento de maquinaria agrícola y cosecha dentro del potrero se facilita producto de la desaparición de regueros y acequias.
- Comparado con las técnicas de riego tradicional necesita sólo 25 % de mano de obra.
- El sistema de unión de tuberías impide la penetración de raíces, siendo absolutamente estanco, disminuyendo a cero las obturaciones.
- El sistema es de bajo costo económico, debido a que aprovecha los desniveles para su funcionamiento, trabajando a muy bajas presiones, requiriendo de tuberías de bajo espesor.
- Pero también el sistema posee las siguientes desventajas:
- No es posible la aplicación de fertilizantes y pesticidas con el agua de riego.
- Necesita una supervisión continua para evitar anegamientos.
- Para grandes pendientes es necesario el uso de sistemas de válvulas que permitan regular la velocidad y presión del agua, lo que encarece el sistema.
- Su maniobrabilidad disminuye en los cultivos de gran envergadura como el maíz. (Goyal, Martínez y Pagan, 2001)

Riego por Goteo.

El riego por goteo permite aplicar agua filtrada y fertilizantes directamente sobre el sistema radical del cultivo.

Este método elimina la aspersión y el agua que fluye sobre la superficie del suelo; permitiendo que el agua, liberada a baja presión en el punto de emisión, moje el perfil del suelo en una forma predeterminada.

El agua es transportada a través de una extensa red de tuberías hasta cada planta donde abandona la línea por emisores en forma de gotas. Estos emisores son los goteros, los que disipan la presión del sistema por medio de un orificio de pequeño diámetro o por un laberinto de largo recorrido, permitiendo descargar al suelo, desde el sistema, sólo unos pocos litros por hora en cada emisor.

Después de dejar el gotero, el agua se distribuye gracias a su movimiento normal a través de todo el perfil del suelo producto de la gravedad. De esta manera el volumen de suelo que puede ser mojado por cada punto emisor está limitado por las restricciones físicas del suelo como textura y estructura.

Las principales ventajas del riego por goteo son:

- Su eficiencia de riego es la más aita de entre todos los tipos de riego, entre 90 a 95° o. teniendo además una distribución del agua muy uniforme.
- Los intervalos de aplicación de riego se pueden ajustar exactamente al tipo de suelo y cultivo.
- El sistema no necesita supervisión constante.
- El agua se aplica de forma que llegue sólo a las raíces del cultivo evitando el crecimiento de malezas, pérdidas de agua, etcétera.
- Se puede aplicar fertilizantes y pesticidas solubles a través del riego.

Sus desventajas son:

- Su alto costo de inversión ya que se requiere de mínimo un emisor por planta, además de complejos sistemas de control y abastecimiento.
- El sistema debe poseer un eficiente sistema de filtrado, evitando taponamientos en los goteros lo que provoca entregas irregulares de caudal.

Goteros.

Los goteros son los dispositivos mediante los cuales el agua pasa de la red de tuberías al suelo y su función es entregar caudales en forma lenta 3: uniforme.

Los goteros están diseñados para entregar un caudal que varía entre 1 a 10 litros hora, dependiendo de las medidas de paso de agua del gotero. (Liotta, 2000).

Su funcionamiento radica en hacer pasar el agua, desde el sistema al suelo, a través de pequeños orificios ó laberintos de largos recorridos, lo que provoca una pérdida de carga, producto del roce, haciendo que la presión a la salida del gotero tenga un valor cercano a cero.

En el mercado existe una gran variedad de goteros, los modelos más usados son: los goteros de largo recorrido, los goteros de orificio y las cintas de goteros.

Entre los goteros de largo recorrido están:

- Los goteros de microtubo; consisten en un tubo de polietileno, de pequeño diámetro, entre 0 6 a 2 mm. y de longitud variable, el que se inserta directamente al lateral de riego. Posee la ventaja de su bajo costo, pero las desventajas de ser muy sensible a los cambios de temperatura y presión

afectando con ello la uniformidad en la entrega de caudal, propenso a las obturaciones y depender el caudal de salida del largo del microtubo.

- Los goteros helicoidales, los que consisten en una variación del microtubo: es como si este se enrollara alrededor de un cilindro, con lo que se consigue goteros más compactos. (Liotta, 2000).

- Los goteros de laberinto, son el último tipo en la evolución histórica de los goteros de largo recorrido. En ellos se obliga al agua a recorrer una trayectoria tortuosa con el fin de producir un alta pérdida de carga, con lo que son muy poco sensibles a la variación de temperatura y presión y a las obturaciones (figura. 11)

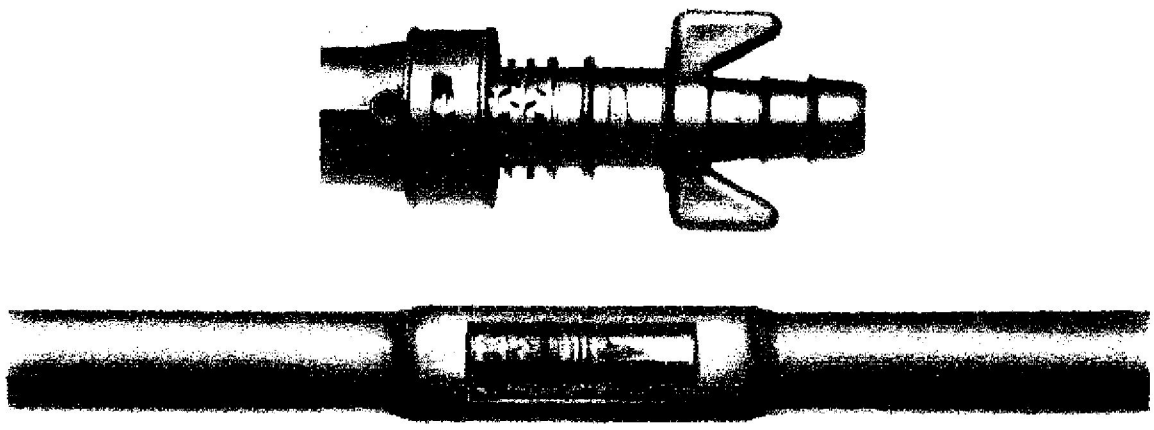


Figura 11. Gotero de laberinto insertado.

Fuente: Manual de Diseño de riego Tecnificado , 2001

Entre los goteros de orificio están los goteros de botón autocompensantes, los que poseen un mecanismo que responde a las variaciones de presión. Este mecanismo consiste en una membrana de caucho, que se deforma bajo la acción de la diferencia de presión del agua antes y después de la membrana, manteniendo el caudal constante aunque varíe la presión de entrada (figura 12).

Además de ser más caro, su principal inconveniente es que el material de la membrana experimenta envejecimiento bajo al acción combinada de la variación de temperatura y presión y de los agentes químicos como los abonos, ácidos, etcétera. Que puede llevar el agua de riego

Su uso se justifica en terrenos muy accidentados

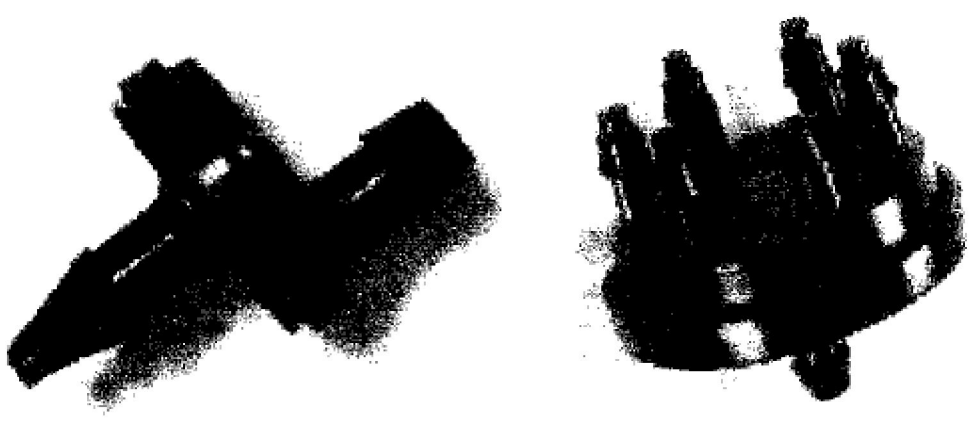


Figura 12. Goteros de botón para insertar.

Fuente: Manual de Diseño de riego Tecnificado, 2001

Las cintas de riego son tuberías provistas de puntos de emisión muy próximos, lo que la hacen muy adecuadas para el riego de cultivos en línea tipo hortalizas.

Consisten en dos conductos paralelos, uno principal, del que pasa agua al secundario a través de un orificio que provoca una primera pérdida de carga, y el conducto secundario, del que el agua sale al exterior por un segundo orificio. Se comercializan en rollos (figura 13).

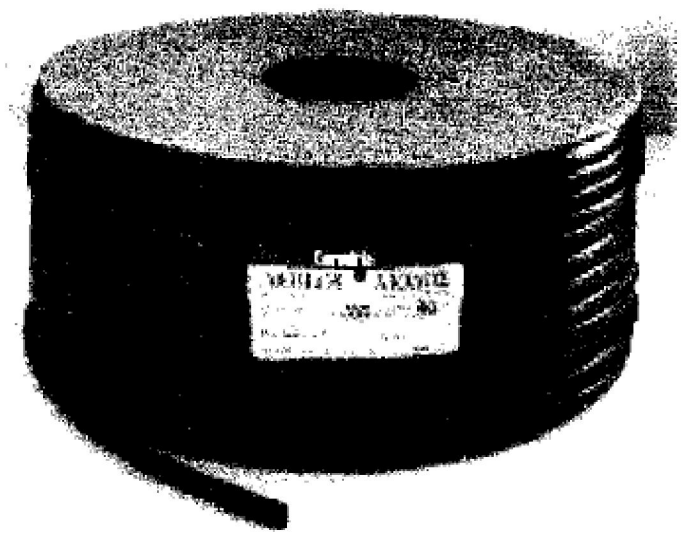


Figura 13 Cinta de riego utilizada en cultivo y en rollo para su comercialización.

Fuente: Manual de Diseño de riego Tecnificado, 2001

Riego por Aspersión.

El riego por aspersión se caracteriza por aplicar el agua en forma de lluvia, para obtener este resultado se hace pasar el agua de riego a través de pequeños orificios, necesitando para ello de considerables presiones, obtenidas por equipos de bombeo o por grandes desniveles.

Debido a la flexibilidad de su uso y el eficiente control en la aplicación del agua, este método permite el riego de una amplia gama de suelos que no pueden ser regados adecuada y eficientemente con métodos tradicionales, tal es el caso de suelos muy arenosos o muy arcillosos, de alta o baja velocidad de infiltración y con pendientes pronunciadas.

Este sistema de riego posee las siguientes ventajas:

- Alta eficiencia de aplicación del agua, 80%, y uniformidad en su penetración en el perfil del suelo.
- Utilizable en suelos de cualquier pendiente con peligro muy remoto de erosión y sin necesidad de nivelación de terreno.
- Sin limitaciones de uso según el tipo de suelo.
- Aventaja muy superiormente a los métodos superficiales en la aplicación de agua para la germinación de semillas.
- Facilita el control de la lámina de riego, lo que permite regar en forma adecuada y satisfacer los requerimientos de lavado.
- Se puede incorporar en el riego fertilizantes y sustancias de uso fitosanitario.
- La mano de obra de operación se reduce al mínimo, disminuyendo más en el caso de contar con automatización. (Liotta, 2000).

Aspersores.

Este sistema de riego debe su nombre al emisor que provoca la característica de una llovizna, este emisor es el aspersor.

Los aspersores son toberas provistas de un mecanismo que les permite rotar sobre su eje utilizando para esto la fuerza del agua. Para su funcionamiento necesitan de ciertas presiones que se hacen mayores a medida que sea necesario que aumente su caudal y alcance o área de mojado. Tanto el caudal como el alcance dependen del diámetro de la boquilla de salida del aspersor. Para una misma boquilla variando la presión de trabajo se puede variar el alcance del chorro de agua junto con el caudal. Cuando se requiere de alcances o caudales diferentes se debe reemplazar la boquilla por otra de diferente diámetro. Los

aspersores pueden tener una, dos y tres boquillas, las que varían su ángulo de salida cubriendo todo el radio de riego.

Los aspersores se fabrican en dos tipos: fijos y rotatorios, estos últimos pueden ser de círculo completo ó sectorizado. La rotación del aspersor se produce por el impacto de un martillo desplazado por el chorro de agua que golpea rítmicamente un soporte previsto para ello. El giro se consigue también por un mecanismo de turbina, o simplemente por efecto de reacción.

En el riego por aspersión se han empleado una gran diversidad de tipos de aspersores, los que poseen diferente tamaño y presión de trabajo, dando como resultado diferentes precipitaciones, radio de alcance y distribución de la lluvia.

Los aspersores se clasifican de acuerdo a su presión de trabajo en los siguientes tipos:

- Aspersor de baja presión: de 1 a 2 bar, especialmente diseñado para riego de árboles frutales, por el hecho de poseer la boquilla un bajo ángulo de salida, o para cultivos anuales o permanentes.
- Aspersor de presión intermedia: entre 2 y 4 bar. Están diseñados con una o dos toberas y se adoptan a todo tipo de cultivo y suelo. El diámetro de círculo humedecido varía entre 21 y 39 metros. (Gaete, 2001).
- Aspersor de alta presión: entre 4 y 8 bar, llamados también gigantes; especialmente diseñados para riego de cultivos de elevado tamaño como maíz, caña de azúcar, etc. y de alta densidad como praderas, plantaciones de alfalfa, etcétera. El diámetro de círculo humedecido varía entre 60 y 150 metros.

Riego por Microaspersión.

El sistema de riego por microaspersión y microjet, consiste básicamente en la aplicación del agua de riego como una lluvia de gotas finas a baja altura y en forma localizada, mediante el uso de emisores llamados microaspersores y microjets.

Aunque a simple vista no existen diferencias físicas entre microaspersores y microjet, su cometido difiere uno del otro. El microaspersor realiza un movimiento rotatorio con lo que el chorro de agua cubre todo el circulo de humectación, en cambio en el microjet el chorro de agua es fijo o de abanico.

Actualmente existen en el mercado microaspersores que se pueden comportar como microjets, para ello basta con cambiar el tipo de boquilla, haciéndolos muy

versátiles, adaptables prácticamente a toda condición de campo que pueda hallarse en huertos, cultivos de jardín e invernaderos.

Las ventajas de estos tipos de riego son:

- Su uso es muy adecuado en suelos muy ligeros (arenosos) donde el riego por goteo no satisface las necesidades del cultivo en cuanto a extensión del área humedecida, producto de la percolación.
- Los microaspersores son menos propensos a las obturaciones, comparados con los goteros, por poseer mayor diámetro de paso y más alta velocidad del agua.
- Permite un lavado del suelo más eficaz que el goteo, para prevenir la acumulación de sales.
- Se pueden aplicar caudales importantes a baja presión, disminuyendo el costo del sistema.
- Posee una eficiencia del 85%, por aplicarse el agua en forma localizada sobre la zona radical del cultivo,
- Pueden ser aplicados fertilizantes y pesticidas en los volúmenes de riego.
- Permite la inspección periódica del emisor, previniendo anomalías en su funcionamiento.

A la vez posee desventajas:

- Presenta un alto costo de inversión por requerirse de un emisor por planta.
- Puede presentar problemas fítosanitarios producto del agua pulverizada.

3.2 Componentes de un sistema de riego tecnificado.

Los elementos que componen un sistema de riego tecnificado son muy variados, existiendo en el comercio una gran gama de elementos de diferentes valores y calidades. Estos elementos deben cumplir con ciertas normas de fabricación que acrediten su resistencia y durabilidad.

3.2.1 Tuberías.

Las tuberías usualmente empleadas en conducciones de agua pueden ser de los siguientes materiales: PVC (policloruro de vinilo), PE (polietileno), fibrocemento, hormigón, tundición, aluminio y acero.

El tipo de tubería más usada en los Sistemas de Riego Tecnificado (que llamaremos SRT) son las de PVC y PE, teniendo características de mayor resistencia mecánica las de PVC con relación a las de PE. Otra tubería muy usada

es la de aluminio, debido a su poco peso y su fácil sistema de acople tiene gran aceptación en los sistemas de riego por aspersión móvil.

Como los SRT operan a bajas presiones (presión máxima para riego por aspersión 100 m.c.a.) en comparación con otros sistemas, la tubería de PVC y PE satisfacen dichas demandas. En contraste a estas ventajas el aluminio es un material relativamente caro, existiendo en tubería de PVC sistemas de acople rápido idénticos al de las tuberías de aluminio siendo estas de un costo más bajo.

Las tuberías de hormigón, fibrocemento, fundición y acero se emplean para conducir grandes caudales y elevadas presiones.

Tuberías PVC.

La gama de características y propiedades de los plásticos es probablemente mayor que la existente entre los diferentes metales.

Entre los plásticos más comunes (PVC, ABS, PE. EXPOXY), hay grandes diferencias en sus propiedades físicas y químicas, dando lugar esto a diversos tipos y grados para cada plástico. El PVC tiene cuatro tipos, los cuales a su vez pueden tener varios grados, de este forma el Tipo I tiene excelente resistencia a la tracción y buena resistencia química aunque su resistencia al impacto es menor a la del Tipo II, éste a su vez no tiene buena resistencia a la tracción y a los agentes químicos (corrosión) como el Tipo I, pero presenta mayor resistencia al impacto. (Osorio y francisco, 1999).

De todas estas variedades el PVC Tipo I. Grado I, es el que reúne las características físicas y químicas más adecuadas para la fabricación de tuberías para abastecimiento de agua.

La aceptación de las tuberías de PVC se debe a sus ventajas económicas y técnicas, algunas de estas propiedades son:

- Gran resistencia a la corrosión.
- Alta resistencia química.
- Alta resistencia al envejecimiento.
- Bajo coeficiente de elasticidad.
- Bajo coeficiente de fricción.
- Bajo peso.
- Fácil instalación.
- Gran resistencia al golpe de ariete.

Todos los materiales de PVC tienen ciertas limitaciones, a de mayor consideración son;

- La resistencia al impacto se reduce a temperatura cercana o inferior a 0°C.
- La tubería PVC tipo I, grado I, no debe quedar expuesta a los rayos solares por períodos prolongados, ya que estos pueden afectar sus propiedades mecánicas.

Además de dividirse en tipos y grados, la tubería de PVC se divide en clases, las cuales indican la presión de trabajo máximo y la presión mínima de ruptura. Tabla 17.

Tabla 17. Presión de Trabajo y Presión de Ruptura en Tubos de PVC VÍNILIT Según Clase.

Clase	Presión de Mínima Ruptura	Presión maxima de trabajo
16	68 kg/cm2 (680 m c a)	16 kg/cm2 (160 m.c.a.)
10	51 kg/cm2 (510 m.c.a.)	10 kg cm2 (100 m.c.a.)
6	28 kg/cm2 (280 m.c.a.)	6 kg/cm2 (60 m.c.a.)
4	22 kg/cm2 ('220 m.c.a.)	4 kg/cm2 (40 m.c.a.)

Fuente: Manual de Diseño de riego Tecnificado, 2001

El uso más común de las tuberías de PVC es la conducción de agua, tanto en la succión como en la impulsión Dentro de la impulsión la tubería o también llamada línea, se divide en línea principal, secundaria y ramales, Frecuentemente la línea principal y las secundarias son en PVC. Siendo la primera de un diámetro mayor que las secundarias. Los ramales son casi exclusivamente de PE por conducir caudales a bajas presiones.

Las tuberías de PVC y los accesorios deben llevar una inscripción indicando como mínimo:

- Designación comercial.
- Siglas PVC.
- Diámetro nominal en mm.
- Presión nominal o Clase.
- Referencia a la norma de fabricación.

Tuberías de PE.

El enorme impulso de lo SRT se debe en gran parte al desarrollo de las tuberías de PE, las que presentan dos ventajas respecto a la tubería de PVC:

- Se puede instalar al aire libre.
- Es flexible y menos frágil.

También posee sus desventajas:

- La tubería de PE es de mayor costo que la tubería de PVC, ya que el PE posee menor resistencia a la tracción y para un mismo diámetro y presión nominal se necesita un espesor mayor de tubería implicando más cantidad de material en su fabricación.
- Los accesorios de PE tienen mayor costo que los de PVC por la misma causa anterior.
- La presión de trabajo de la tubería de PE se reduce al aumentar la temperatura.

Comercialmente se fabrican tres tipos de tubos de polietileno:

- Tubo de polietileno de baja densidad, definido por una densidad sin pigmentar igual o inferior a 0.930 kg/m3.
- Tubo de polietileno de media densidad, con densidad sin pigmentar entre 0.931 y 0.940 kgm3.
- Tubo de polietileno de alta densidad, con densidad sin pigmentar mayor que 0.940 kg/m3. (Osorio y francisco, 1999).

De los tres tipos, el más utilizado en SRT es el de baja densidad usado comúnmente en los ramales por su mayor flexibilidad.

Las tuberías se venden en rollos de longitud variable según el diámetro y existe gran variedad de accesorios.

Los tubos de PE deben llevar una inscripción indeleble indicando:

- Identificación del fabricante,
- Diámetro nominal.
- Espesor nominal,
- Presión nominal.
- Año de fabricación,
- Referencia a la norma de fabricación.

Tubería de Fibrocemento.

Los elementos usados en la fabricación de las tuberías de fibrocemento son el cemento Portland. Asbesto, fibras sintéticas y agua. Las fibras utilizadas poseen gran resistencia a la tracción (4000 a 5000 kg cm2), gran flexibilidad- resistencia a la corrosión y ataques químicos. Estas tuberías se diseñan para presiones de trabajo correspondiente a la mitad de las presiones de prueba, correspondiendo 1/4 ó 1/3 de las presiones de rupturas finales. En la gran generalidad de los casos la tubería de fibrocemento tiene una durabilidad y vida útil indefinida por ser sus componentes inorgánicos y no metálicos.

En el caso de usarse en suelos o aguas agresivas al cemento su durabilidad puede garantizarse con una sencilla protección de base bituminosa.

3.2.2 Equipo de Impulsión.

El equipo de impulsión juega un papel muy importante en los SRT. Ya que entrega la energía necesaria para que el sistema funcione. Está compuesto de una bomba, la mayoría de las veces centrífuga, y un motor que la hace trabajar.

Motor.

Los motores pueden ser de explosión, a gasolina o diesel, y eléctricos. El motor a explosión transforma la energía calórica, producida por la combustión del carburante, en energía mecánica; en cambio el motor eléctrico transforma la energía eléctrica en energía mecánica. Esta energía es transmitida a la bomba mediante sistemas de acople y transmisión. (Osorio y Tapia, 1999).

Donde exista tendido de energía eléctrica con la potencia necesaria y donde la bomba este instalada sin necesidad de moverla constantemente se recomienda el uso de motores eléctricos.

El uso de motores de explosión es necesario en el caso de que no exista tendido eléctrico o si existe no posea la potencia necesaria para el sistema, o en el caso en que el equipo de bombeo este en constante rotación por el predio.

Bombas Centrífugas.

Las bombas centrífugas son las más utilizadas en los sistemas de riego, existen infinidad de modelos, los que dependen de la cantidad de agua a bombear por unidad de tiempo, la presión necesaria para hacer funcionar el sistema de riego o altura a elevar el agua y las características físicas del terreno donde se instala el equipo.

Todas las bombas poseen una cuna de funcionamiento llamada cuna característica de la bomba, la que se construye de acuerdo a dos variables la altura de impulsión (H) y el caudal (Q). Para cada valor de la altura corresponde un valor de caudal y viceversa. A medida que el caudal aumenta la altura decrece.

Fittings.

Se entiende por fittings a los accesorios usados para unir tuberías en virtud de la geometría de la instalación.

Los fittings se fabrican en diversos materiales (PVC, PE, bronce, aluminio, acero, fundición, hormigón, etc.), teniendo gran cantidad de formas y dimensiones. Para mayor información vasta recurrir a un catálogo especializado, donde se encuentran sus características físicas (diámetros, largos, pesos, etcétera.).

3.2.3 Equipos de Control y Medida.

Válvulas.

Las válvulas son dispositivos de cierre que permiten regular el paso de agua por las tuberías, construyéndose en los más variados materiales (bronce, plástico, acero, fundición, etcétera).

Existen dos grupos de válvulas: las manuales y las automáticas, estas dos últimas se dividen en dos subgrupos: válvulas hidráulicas y electroválvulas.

Las válvulas manuales son accionadas en forma manual, regulando el caudal de acuerdo a la abertura de la misma. Entre ellas se distinguen las válvulas de bola, de compuerta, etcétera.

Las válvulas automáticas funcionan en abierto o cerrado, previa regulación de la abertura de la válvula en forma manual. (Osorio y Tapia, 1999).

El accionamiento es mediante una válvula piloto que libera la presión hacia la atmósfera, acumulada dentro de la válvula, haciendo que ésta se abra o se cierre. La respuesta de la válvula piloto ocurre por diferencia de presiones dentro de la válvula en el caso hidráulico y por impulsos eléctricos enviados desde un centro de control en la electroválvula.

Válvula de Pie.

La válvula de pie es indispensable en toda instalación de bombeo, se coloca al comienzo de la línea de succión y se abre en el momento en que la bomba comienza a aspirar el líquido en forma automática, ya que posee una compuerta flotante en forma de disco que sube y abre el sistema al ser arrastrada por el flujo

de agua producto del bombeo, una vez detenida la bomba su cierre es inmediato debido a que la compuerta es empujada por el peso del agua acumulada en la tubería impidiendo que la línea y la bomba se descebe.

Válvula de Retención.

La válvula de retención es usada como dispositivo de seguridad, al detenerse una bomba en forma instantánea, producto de fallo del motor o del suministro de energía, se genera una onda de choque dentro de la tubería, produciéndose una sobre presión que puede llegar a tres veces el valor de la presión nominal llamada Golpe de Ariete, esta sobre presión en caso de llegar a la bomba produce daños severos en los elementos de estanqueidad como prensa estopas y sello mecánico. (Osorio y Tapia, 1999). El funcionamiento de la válvula es automático, abriéndose en el momento de pasar agua a la línea de impulsión y cerrándose en el momento de detenerse la bomba, funcionando en forma idéntica que la válvula de pie. Se recomienda su uso en instalaciones con presiones de trabajo elevadas (20 m.c.a. o más).

Medidor.

El medidor es un aparato destinado a medir las cantidades de agua circulante. El control que efectúa no está afectado por variaciones de caudal, siempre que no sobrepasen el nominal máximo para el que ha sido construido (figura 14).

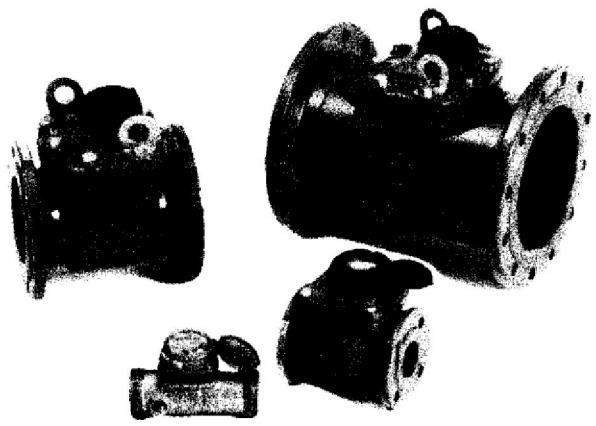


Figura 14. Medidores de diferente calibre.

Fuente: Manual de Diseño de riego Tecnificado , 2001

El medidor más usado es el constituido por una turbina que, intercalada en el flujo de agua, va dando vueltas en número proporcional a la cantidad de agua. Mediante una transmisión mecánica, como engranajes, el giro de la turbina acciona un integrador que traduce sobre esferas visibles desde el exterior, las

cantidades en metros cúbicos. Todo el conjunto descrito forma un solo cuerpo que se instala en serie en el circuito o línea.

Existen también medidores de transmisión eléctrica cuyo elemento detector está insertado en el flujo.

Rotámetro.

Los rotámetros son los aparatos destinados a medir el caudal o valor instantáneo del flujo en m^3/h

Consiste en un tubo montado en posición vertical donde el agua circula de abajo hacia arriba, con un cuerpo en libre suspensión el cual se ve arrastrado por el flujo hacia la parte alta del tubo.

Usualmente el tubo es de cristal graduado en metros cúbicos hora, a través del cual es visible el cuerpo en suspensión. Este lleva una señal de referencia y esta señal es la que se valora en una escala graduada.

Manómetro.

El manómetro es un aparato destinado a medir la presión en un punto del circuito.

Generalmente se construye con un muelle tubular el cual está comunicado por un extremo al circuito de agua, y cerrado por el otro extremo. La presión del agua deforma el muelle tubular y esta deformación, recogida por un dispositivo mecánico, mueve una aguja, que señala sobre una esfera el valor de la presión en kg cm^2 o lb. $pulg^2$.

Se construyen en diversidad de tamaños y escalas. La elección del modelo adecuado depende de la presión a medir y de la precisión que se desee en la lectura. Su montaje requiere abrir el circuito de agua acoplando un dispositivo tubular adecuado al hilo del manómetro

3.3.4 Filtros.

Para separar la arena del agua se utilizan filtros hidrociclones, para eliminar la arcilla y la materia orgánica se usan filtros de arena. Para agua proveniente de pozo se utilizan filtros de malla o anillas.

Filtros para Prefiltrado.

El filtro de grava utilizado para el filtrado del agua de riego consiste en un recipiente comúnmente cilíndrico, de cierta capacidad (500 a 1000 litros), que

contiene grava o piedra de diferentes calibres, las que atrapan impurezas del tipo mediano-grueso entre sus poros. El calibre de la grava fluctúa entre la ½" y las 2".

Su funcionamiento es por gravedad y se estima que la perdida de carga que se produce al circular el agua por el filtro es de 1 m.c.a.

Decantadores.

Los decantadores son una solución sencilla y económica para la eliminación de sólidos en suspensión (arena, limo, arcilla, etc.) y de algunos precipitados químicos, como el hierro, que se forman al airearse el agua, problema más frecuente cuando ésta es de origen subterráneo (figura 15).

Para diseñar un decantador en un caso particular, se requiere conocer la velocidad de sedimentación, diámetro de las partículas, etc. Como estos datos son poco accesibles se tiene que:

$$L = 5\ a \quad \text{.....Ecuación 1}$$

$$a > 0.0045\ \sqrt{Q} \quad \text{.....Ecuación 2}$$

Donde:

- L = Largo decantador en metros.
- a = Ancho decantador en metros.
- Q Caudal en litros hora.
- h = altura varía entre 0.8 y 1.5 metros.

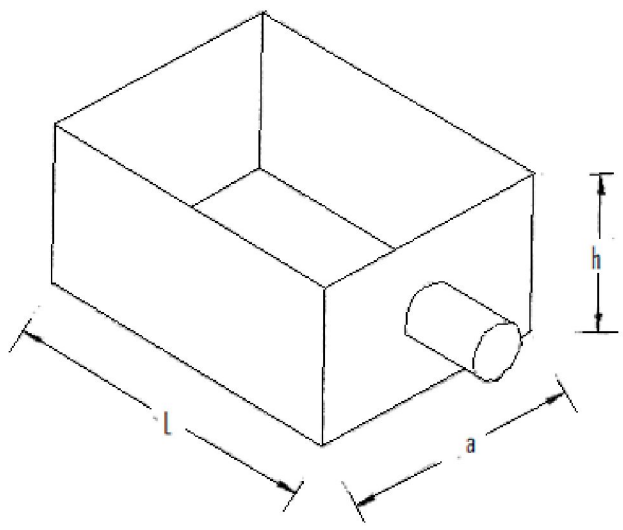


Figura 15. Decantador.

Fuente: Manual de Diseño de riego Tecnificado , 2001

Tipos de Filtros.

Después del prefiltrado del agua se procede a eliminar las partículas minerales y orgánicas de bajo calibre contenidas aún en el agua mediante diferentes tipos de filtros.

Hidrociclón.

El hidrociclón es un aparato sin elementos móviles, que permite eliminar las partículas de densidad superior a 1.5 y tamaños mayores a 74 mieras (aproximadamente 200 mesh) (figura 16).

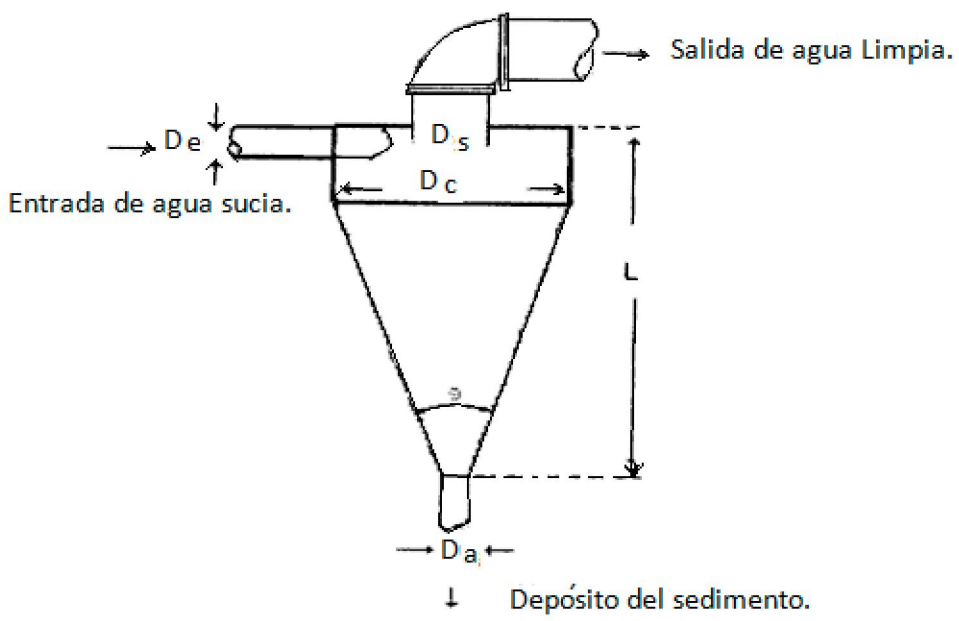


Fig. 16. Hidrociclón.

Fuente: Manual de Diseño de riego Tecnificado, 2001

El agua cargada de impurezas entra en el hidrociclón tangencialmente a la parte superior cilíndrica, lo que provoca un torbellino vorticial descendente, llamado torbellino principal. La fuerza centrifuga generada en este torbellino proyecta las partículas sólidas contra las paredes de la parte cónica, por lo cuál descienden hasta el tubo inferior, que las conduce al depósito de sedimentos. Cuando este se encuentra lleno se abre, en forma manual o automática, una válvula y se eliminan los sedimentos. (Gaete, 2001)

Por su parte el agua, que también ha descendido con el torbellino principal, al aproximarse al vértice del cono forma un torbellino ascendente que se denomina

secundario y que gira en el mismo sentido que el primario, elevando el agua libre de partículas sólidas, que sale por el tubo superior.

Las dimensiones del hidrociclón deben cumplir las siguientes relaciones:

- L = 5 a 8 veces De.
- De = 0.15 a 0.33 veces De.
- Ds = 0.15 a 0.30 veces De.
- Da = 0.15 a 0.20 veces De.
- θ <45°.

Filtro de Arena.

Los filtros de arena consisten en tanques metálicos o de poliéster, en cuyo interior se coloca una gruesa capa de arena a través de la cuál circula el agua a filtrar.

El agua entra en el filtro por la tubería superior y se distribuye en el interior del tanque por medio de un deflector que tiene por objeto evitar que el chorro de agua incidente sobre la arena la remueva, La salida del agua filtrada es por la tubería inferior, esta se prolonga en el interior del tanque en unos colectores perforados y revestidos de malla para evitar el arrastre de la arena.

El tanque dispone de dos amplias bocas, una para la carga y otra para la descarga de la arena. El depósito lleva un purgador para eliminar la eliminación de aire. La tubería de entrada suele llevar una derivación para eliminar el agua sucia durante la limpieza por el contra lavado.

El filtrado se realiza a través de una capa de arena cuyo espesor 110 debe ser menor a 50 cm.

La arena a utilizar puede ser rodada, de río o mar, o procedente de chancado, presentando esta última el inconveniente de contener a veces demasiado polvo. Debe poseer la particularidad de no subdividirse. Con el objeto de que con el tiempo no se desintegre con el uso, y resistente al ataque de ácidos. El material más usado es la arena silícea.

Filtro de Malla.

Los filtros de malla están formados por un cartucho en cuyo interior van uno o más cilindros concéntricos de mallas. El agua penetra al filtro hacia el interior del cilindro de malla por uno de sus extremos, allí es forzada a escapar por la periferia del cilindro, pasando a través de los orificios de la malla, reteniendo ésta las impurezas. Este tipo de filtros realiza una retención superficial, lo que hace que su

colmado sea mucho más rápido. Por esta razón se suelen utilizar en aguas no muy sucias que contengan partículas de tipo inorgánico, o como elementos de seguridad después de hidrociclones, filtros de arena y equipos de fertirrigación.

La superficie de malla se calcula en función del caudal, incrementado en un 20% como seguridad, según las siguientes tablas 18, 19 y 20:

Tabla 18. Malla de Acero Recomendada según Diámetro del Emisor.

Diámetro del gotero (mm)	Característica de la Malla	
	Orificio menor que (micras)	N° de mesh
1.50	214	65
1.25	178	80
1.00	143	115
0.90	128	115
0.80	114	150
0.70	100	170
0.50	86	200
0.50	71	250

Fuente: Manual de Diseño de riego Tecnificado, 2001

Tabla 19. Velocidad real recomendada en filtros de malla según Orificio de Malla y Calidad del Agua.

Tamaño del orificio (micras)	Clase de agua	V (m/s)
300 a 125	Limpia	0.4 a 0.9
300 a 125	Con algas	0.4 a 0.6
125 a 75	Cualquiera	0.4 a 0.6

Fuente: Manual de Diseño de riego Tecnificado, 2001

Tabla 20. Caudal Máximo en Filtros de Malla según Velocidad del Agua (Según Riegos Localizados de Alta Frecuencia, F. Pizarro, 1990)

V (m/s)	m3/h por m2 de área total
0.4	446
0.6	670
0.9	1.004

Donde : $S > \frac{1.2 * Qe}{Qt}$ .....Ecuación 3.

- S = Superficie del filtro de malla.
- Qe = Caudal a la entrada del filtro (dato).
- Qt = Caudal según tabla (con diámetro orificio se conoce valor mieras en la Tabla con mieras y clase de agua se conoce velocidad del agua en la Tabla y con la velocidad del agua finalmente se conoce el caudal máximo en la Tabla.

Fuente: Manual de Diseño de riego Tecnificado , 2001

Filtro de Anillas.

En estos filtros el elemento filtrante es un conjunto de anillas ranuradas que se comprimen unas contra otras al roscar la carcasa, formando un cilindro de filtrado. El grado de filtrado depende del número de ranuras existentes en las anillas. La pérdida de carga cuando están limpios es del orden de 1 a 3 m.c.a. Tabla 21.

Tabla 21 Código de colores para Filtros de Anillas EIN-TAL

Color	Mesh	Micras	Utilización
Oliva	30	500	Aspersión, filtración gruesa
Naranja	40	400	Aspersión, filtración gruesa
Amarilla	50	300	Aspersión, difusión, filtración semigruesa.
Celeste	75	200	Difusión, microaspers., filtración media.
Gris	85	175	Microaspersión, filtración media.
Verde	100	150	Microasper., filtración media fina.
Azul	120	125	Goteo, filtración media fina.
Roja	150	100	Goteo, filtración fina.
Marrón	200	75	Cinta, goteros, filtración fina.
Negra	300	50	Filtración muy fina.
Verde claro	750	20	Tratamientos primarios de aguas.
Rosa	1500	10	Tratamientos de agua, filtración ultrafina.
Verde mar	3000	5	Aguas potables, filtrac. ultrafina.

Fuente: Manual de Diseño de riego Tecnificado , 2001

3.3.5 Fertirrigación.

El gran auge de los SRT se debe en gran parte a una nueva forma de cultivo, la fertirrigación. Mediante ella es posible aplicar no sólo agua y fertilizantes en forma directa a la planta sino que también herbicidas, fungicidas e insecticidas. Estos

agregados son aplicados en forma eficiente, controlándose su cantidad y tiempo de aplicación. (Osorio, 1999)

Equipos de Fertirrigación. Tanque de Abonado.

El tanque de abonado consiste en un depósito herméticamente cerrado, conectado en paralelo a la red de riego.

Se fabrican en plástico reforzado o en metal, con volúmenes que van desde los 20 a 200 litros de capacidad y en cuyo interior se coloca el abono. El tanque posee dos tomas, una de entrada y otra de salida, las que se conectan a la red en dos puntos próximos, estando separados por una válvula, cuyo objeto es crear una diferencia de presión para que parte del agua de riego circule por el tanque. Con esto se persigue que el agua se mezcle con el abono abandonando el tanque por la toma de salida

Inyector Venturi.

Un inyector Venturi es fundamentalmente un tubo por el que circula agua, provisto de un estrechamiento en el que, por el efecto Venturi, se produce una disminución de presión del sistema.

En la zona de estrechamiento lleva conectada una tubería cuyo otro extremo se introduce en un depósito con la solución a inyectar, a presión atmosférica.

La depresión provoca la succión del líquido y su incorporación a la red. Se coloca en paralelo con la tubería de riego, en ésta una válvula produce una diferencia de presión, que dirige parte del agua al circuito del inyector. Se puede aprovechar cualquier elemento que cree pérdida de carga como filtros, válvulas, etcétera.

Dosificador de Abono.

Son mecanismos que toman el abono de un depósito a presión atmosférica y lo inyectan a la red a una presión superior. Su accionamiento puede ser eléctrico, hidráulico o por motor a combustión.

Dosificador Eléctrico.

Son generalmente bombas de pistón o membrana, accionadas por un motor eléctrico. Los caudales varían según los modelos, desde 20 hasta más de 600 litros hora. El caudal puede ser regulado modificando la carrera del pistón o vástago de la membrana lo que es su principal ventaja. Su inconveniente es la necesidad de suministro eléctrico y su alto valor. Sus presiones de trabajo varían entre 4 y 12 bar.

Dosificador Hidráulico.

Un dosificador hidráulico es una bomba constituida por una pequeña cámara que alternativamente se llena y vacía accionada por la presión de la red de riego. Cuando la cámara se llena, el dosificador succiona abono de un depósito y cuando se vacía lo inyecta en la red.

El dosificador se coloca en paralelo con la tubería, preferiblemente entre dos puntos donde exista una cierta diferencia de presión (regulador de presión, filtro, válvula, etc.). Se necesita una presión mínima de trabajo de 2 bar, lo que puede ser un inconveniente para riegos de muy baja presión.

El circuito que proporciona el agua a presión para accionar el dosificador continua en una tubería de drenaje, por lo que se pierde un volumen de agua de aproximadamente el doble del fertilizante inyectado

Por cada carrera del pistón, este inyecta un volumen constante, pero variando el ritmo de carrera se puede modificar el volumen. Para ello se regula la válvula del circuito de accionamiento, cuanto más abierto esté mayor es la presión y más rápido el ritmo de carrera. (Gaete, 2001)

Lámina Neta (L.N.).

Se refiere a. la cantidad de agua a aplicar por unidad de superficie durante un periodo de riego, Se calcula de la siguiente manera:

$$L.N. = \frac{(C.C. - P.M.P)}{100} * D.A. * C.R. * P.R. * 1000\ (mm) \quad \text{.....Ecuación 4.}$$

Donde:

(C.C. - P.M.P.) = Agua útil

D. A,= Densidad aparente del suelo.

C. R.= Criterio de riego (0.6 a 0.4).

P. R,= Profundidad de las raíces del cultivo en metros.

Fuente: Manual de Obras Menores de Riego, Comisión Nacional de Riego. 1996.

Requerimiento Bruto de Agua (R.B.).

Se llama requerimiento bruto a la cantidad de agua consumida por los cultivos o que se ha evaporado durante intervalo de tiempo. Se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Requerimiento Bruto} = \frac{\text{Uso Consumo Cultivo}}{\mu} \quad (\text{mm/día}) \quad \text{.....Ecuación 5.}$$

Donde:

Uso Consumo Cultivo =K.e * Evb (mm/día)

μ = Rendimiento total del tipo de riego tecnificado a usar.

Fuente: Manual de Obras Menores de Riego, Comisión Nacional de Riego. 1996.

Velocidad de Infiltración.

La velocidad de infiltración influye en la elección del tipo de riego ya que para suelos con diferente textura como arena y arcilla, un mismo método de riego no da los mismos resultados, este es el caso del goteo donde se produce percolación en un suelo arenoso debiéndose reemplazar el tipo de riego por la microaspersión

3.3.6 Elección de Tuberías, pérdidas de Carga, perdidas secundarias, perdidas de goteros, perdidas en equipo de Impulsión, presión requerida, consumo de combustible y lubricante.

Cálculo de Pérdidas de Carga en Tuberías.

Existen diversas fórmulas para calcular la pérdida de carga de un fluido, pero la más versátil es la de Hazen-Williams, por ser aplicable a diferentes tipos de tuberías. Esta fórmula depende de cuatro factores: el caudal, el diámetro interior de la tubería, el largo total de tubería y la constante fijada por el material de la tubería. (Gaete, 2001)

Formula de Hazen-Williams para Diferentes Tuberías.

$$Hf = \frac{10.665 * L * Q\text{^}1.852}{C\text{^}1.852 * D\text{^}4.869} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots Ecuación\ 6.$$

Donde:

Q = Caudal en metros^3 segundo (incógnita).

D = Diámetro interior de tubería en metros (dato).

L=largo total de tubería en metros (dato).

C =Constante que depende del material de la tubería (dato).

Hf=Pérdida de carga en m.c.a.

Tabla 22. Valor de C para Diferentes Materiales De Tuberías (VINILT)

Material	Constante C	Material	Constante C
PVC	150	Acero Nuevo	120
PE	150	Acero usado	110
Fibrocemento	140	Fundición Nueva	100
Hormigón	128	Fundición Usada	85

Fuente: Manual de Diseño de riego Tecnificado.

En los SRT la línea de impulsión se divide en línea principal, secundaria y ramal. El cálculo de la pérdida de carga total se puede hacer en forma individual para cada línea y sub-línea o en forma general dejándola expresada en función del caudal.

$$Hf\ (línea\ principal) = \frac{10.665 * L(largo\ linea\ principal) * Q\text{^}1.852}{C\text{^}1.852 * D\text{^}\ 4.869(diámetro\ línea\ principal)}$$

……Ecuación 7.

$$Hf\ (línea\ secundaria) = \frac{10.665 * L(largo\ linea\ secundaria) * Q\text{^}1.852}{C\text{^}1.852 * D\text{^}\ 4.869\ (diámetro\ línea\ secundaria)}$$

……Ecuación 8.

$$Hf\ (ramal) = \frac{10.665 * L(largo\ ramal) * Q\text{^}1.852}{C\text{^}1.852 * D\text{^}\ 4.869\ (diámetro\ ramal)}$$

……Ecuación 9.

Donde:

Q = Caudal en metros^3 segundo (incógnita).

D = Diámetro interior de tubería en metros (dato).

L=largo total de tubería en metros (dato).

C =Constante que depende del material de la tubería (dato).

Hf=Pérdida de carga en m.c.a.

La pérdida total en la línea es:

Hf (Total línea) = Hf (línea principal) + Hf (línea secundaria) + Hf (ramal) .....Ecuación 10.

Es importante señalar que se debe elegir el valor L correcto para ser reemplazado en la formula, el que corresponde al tramo más largo de las diferentes secciones.

En el caso que en algún tramo de línea la tubería a parte de cambiar de diámetro cambie de material (cambiando C)

Pérdida de Carga en Fittings.

La pérdida de carga en fittings, conocida también como pérdida secundaria, es producida por el roce producto de la geometría o forma de los fittings por donde circula el agua. (Gaete, 2001)

La ecuación de pérdida de secundaria depende de tres factores: el caudal, el diámetro interior del fittings y una constante que es particular para cada elemento. Al igual que en la ecuación de pérdida de carga de tubería ésta se puede dejar expresada en función del caudal, dejándolo como variable.

Ecuación Fundamental de las Pérdidas Secundarias:

$$Hf = \frac{8 * k * Q\text{^}2}{D\text{^}4 * g * \pi^2} \qquad (metros) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots Ecuación\ 11.$$

Donde:

hf = Pérdida de carga secundaria en m. c. a.

K = Constante del accesorio (dato). Tabla 23.

Q = Caudal en m^3/segundo (incógnita).

g = 9.81 m/seg^2.

D = Diámetro interior del fittings (dato).

Tabla 23 Valores de K para Diferentes Fittings (Según VINILIT)

Fittings		K	Fittings		K
Codo 90°		0.90	V. Comp. 3/4 cerrada		24.00
Tee sin reducción		0.60	V. Comp. 1/2 cerrada		5.60
Codo 45°		0.45	V. Comp. 1/4 cerrada		1.15
Tee con reducción 1/2		0.90	V. Comp. Abierta		0.19
Codo 90° suave		0.75	V Retención		2.50
Tee bifurcación		1.80	Ensanches	d/D-1/4	0.92
Curva 90°		0.60		d/D-1/2	0.56
Válvula pie		2.50		d/D-3/4	0.19
Curva 180°		2.20	V. Globo abierta		10.00
Codo cuadro		1.80	Tubo con borde		0.83
Contracciones	d/D-1/4	0.42	V. Angulo abierta		5.00
	d/D-1/2	0.32	Entradas		0.50
	d/D-3/4	0.19			

Fuente: Manual de Diseño de riego Tecnificado.

Para el cálculo de reducciones o ensanches se debe tomar el valor del diámetro menor. Para electos de cálculo, se procede a efectuar la suma de pérdidas secundarias individuales, encontradas en los tramos donde se efectuó el cálculo de pérdidas de carga para tubería, tanto en la succión como en la impulsión. La pérdida secundaria total del sistema es la suma de todas las pérdidas secundarías que se encuentran en la línea de tubería.

Elección del Diámetro Adecuado en Tuberías y Fittings.

La pérdida de carga, depende de varios factores de entre los que destaca el diámetro de la tubería o fittings (para efectos de cálculo diámetro interior).

En el caso que usemos una tubería de pequeño diámetro para un caudal elevado y una longitud de impulsión considerable, por un lado tendremos un bajo costo en la adquisición de las cañerías, pero dicho diámetro provoca una gran pérdida de carga obligando al uso de equipos de bombeo de gran tamaño y alto costo. A la inversa si el diámetro es mayor, la bomba tiende a ser más pequeña y su costo baja considerablemente, pero el costo de las cañerías se eleva.

Se recomienda que el diámetro de las tuberías sea 1.5 a 2 veces el diámetro de salida de la bomba, dependiendo del largo de la línea.

Pérdida de Carga en Filtros, Válvulas Automáticas, etcétera.

La pérdida de carga producida en los filtros de anillas, de mallas, de arena; en válvulas automáticas, dosificador de abono, medidores, etcétera; es un dato que debe proporcionar el fabricante de dichos productos, donde se especifique la

pérdida de carga producida por el elemento de acuerdo al caudal que circula por él.

Es recomendable por eso adquirir los accesorios que produzcan menor pérdida, ya que esto incide directamente en los costos de operación (energía).

Pérdida de Carga en Emisores.

Se recomienda:

- Elegir un tipo de emisor que cumpla con todos los requerimientos del cultivo, clima, tipo de suelo, etcétera.
- Si se da el caso que exista más de un emisor favorable, elegir el de menor costo conservando la calidad.

Elección de Goteros.

Para la elección de un tipo de gotero se recomienda:

- Goteros autocompensantes para terrenos desnivelados.
- Cinta de riego para cultivos de una temporada (tomates, cebollas, melones, etc.),
- Mangueras de larga duración con goteros insertados para cultivos de vida extensa (viñas, frutales, etc.

Elección de equipo de impulsión.

Para la elección del equipo de bombeo se requiere conocer el caudal total y la presión de operación del sistema. La potencia necesaria para hacer funcionar todo el sistema depende de estos dos factores, donde está implícito el tipo de energía a utilizar. (Gaete, 2001)

Presión requerida.

La presión requerida para que funcione el sistema es equivalente a la suma de: la pérdida de carga primaria producida en líneas principales, líneas secundarias y ramales, la pérdida de carga secundaria producida en fittings, la pérdida de carga según catálogo de filtros, aparatos de control, emisores, etc. y la diferencia de cotas entre la superficie del pozo o canal y el terreno a regar.

P.R. = (Q* P * 1000 * 9.8) / (η* 746) (HP).....Ecuación 12.

Donde:

- Q = Caudal total (m3 / segundo)
- P= Presión total (metros columna de agua)
- η = Rendimiento por efectos de transmisión de potencia.

Obtenida la potencia y conociendo la disponibilidad de energía, se elige el tipo de motor con que opere el sistema.

Para potencias de 0 a 2 HP, se recomienda el uso de motobombas eléctricas monofásicas; para potencias superiores se recomienda el uso de motobombas eléctricas trifásicas, bencineras o petroleras.

Consumo de Combustible y Lubricante.

El consumo de combustible de un motor esta directamente relacionado con la potencia de funcionamiento y el tiempo de trabajo del sistema. El consumo en litros de combustible se calcula de la siguiente manera:

Consumo de Combustible = (P.R. * T.A.R.E. * 0.2) / 0.8 (Litros).....Ecuación 13.

Donde:

- P.R. = Potencia requerida por el sistema en HP.
- T.A.R.E. = Tiempo de aplicación de riego para emisores en horas.

Con los datos anteriores podemos calcular también el Costo de Combustible el que será igual a:

Costo de Combustible = Consumo * Valor combustible.....Ecuación 14.

Para el cálculo de consumo de lubricante, se recomienda que el recambio de este sea cada 50 horas de trabajo del motor.

CAPITULO 3.3 CONFIABILIDAD

Conceptos básicos de la confiabilidad.

INTRODUCCIÓN

La gestión de mantenimiento de quinta generación (terotecnología) implica el desarrollo secuencial de cuatro niveles: instrumental, operacional, táctico y estratégico.

El nivel estratégico está compuesto por metodologías que se desarrollan con el fin de evaluar el grado de éxito alcanzado con las tácticas empleadas; y es en ese contexto donde el análisis de la confiabilidad a partir de sus bases teóricas cobra validez, en la medida que se determine su período de influencia en las decisiones de los planes estratégicos en la gestión de mantenimiento.

La confiabilidad se define como una serie de procesos de mejoramiento continuo, que involucran en forma sistémica, herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control, de la productividad industrial.

INICIO Y EVOLUCIÓN

La complejidad de la vida moderna exige sistemas más confiables. La automatización de sistemas hidráulicos requiere maquinarias de varios tipos que deben funcionar sin fallas, pues una interrupción de su funcionamiento no sólo es extremadamente costosa, sino que puede ser catastrófica. El uso cada vez más creciente de equipos sofisticados en todo tipo de actividades (presas, canales, sistemas de riego, sistema de bombeo, captación, etcetera), hace necesario que ellos posean una alta confiabilidad. (Eugenia, 2005)

La base teórica de la confiabilidad, se empieza a desarrollar en la década de los cincuenta. Inició su estudio el ingeniero sueco, Waloddi Weibull quien la aplicó a la industria metalúrgica.

Los países desarrollados poseían serios problemas de confiabilidad; se calcula que durante la segunda guerra mundial el 60% del equipo aéreo enviado al lejano oriente desde Estados Unidos, llegó dañado y que el 50% de los repuestos estaban inservibles antes de usarse. La Marina de Guerra de los Estados Unidos, en una encuesta realizada en 1,960, encontró que el equipo electrónico de sus barcos estaba inoperante (dañado o en reparación), las dos terceras partes del tiempo. La Fuerza Aérea de ese mismo país reveló que por cada dólar gastado en la compra de equipos electrónicos, necesitaban 10 dólares para el mantenimiento y reparación de los mismos durante 5 años.

Las técnicas estadísticas de confiabilidad a partir de los años sesenta y hasta la fecha, han sido aplicadas en forma creciente a los procesos de producción y a los productos en los países desarrollados. En la actualidad se puede afirmar que tales técnicas se encuentran en su cima de aplicación y constituyen un mecanismo imprescindible para todo sistema hidráulico bien organizado.

VISIÓN DE LA CONFIABILIDAD DENTRO DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.

"la capacidad de una instalación o sistema (integrados por procesos, tecnología y gente), para cumplir su función dentro de sus límites de diseño y bajo un contexto operacional específico"

La confiabilidad lleva implícita la capacidad de la empresa (procesos, tecnología, gente) para cumplir su función o el propósito que se espera de ella, dentro de los límites de diseño y bajo un contexto operacional, siendo el principal factor de éxito la eficacia del mantenimiento.

Es importante puntualizar que en un programa de optimización de confiabilidad operacional, es necesario el análisis de cuatro factores habilitadores: confiabilidad humana, confiabilidad de los procesos, mantenibilidad de los equipos y la confiabilidad de los equipos. La variación en conjunto o individual de cualquiera de estos cuatro parámetros, presentados en la fig.12, afecta el comportamiento global de la confiabilidad operacional de un determinado sistema.

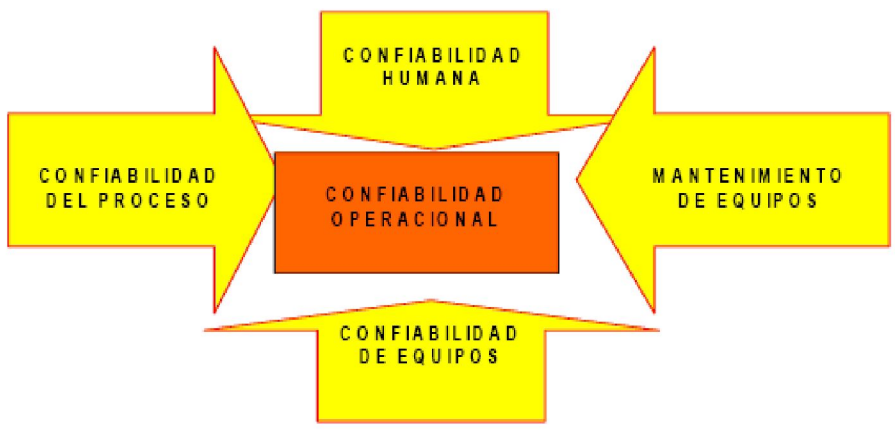


Fig. 17. Los cuatro factores habilitadores de la confiabilidad operacional

Fuente: Optimizar la confiabilidad.

3.3.1 Definición de confiabilidad.

Entre las definiciones de confiabilidad podemos mencionar las siguientes:

- En términos generales, se dice que un producto o servicio confiable es aquel que se puede esperar que realice las funciones para las que fue diseñado, en el momento en el que se le necesite. (Eugenia, 2005).
- La confiabilidad de un equipo, componente o sistema, es la probabilidad de que desempeñe satisfactoriamente las funciones para las que fue diseñado, durante el período de tiempo especificado y bajo condiciones de operación dadas. (INGAR, 2006)

- La confiabilidad es una propiedad que se extiende en el tiempo y está determinada por el diseño, las características de calidad mantenidas durante el proceso de producción y las condiciones de operación. (Mendenhall, Wackerly, Sheraffer, 2005)

TIPOS DE CONFIABILIDAD.

La confiabilidad del equipo o del sistema se basa en dos factores: confiabilidad intrínseca y confiabilidad operativa. La confiabilidad intrínseca se basa en el diseño y se determina durante la fase de fabricación e instalación. La confiabilidad operativa la determina el usuario y está relacionada con el modo y condiciones con que se opera el equipo.

La confiabilidad total es el producto de estas dos cualidades.

Las siguientes descripciones corresponden a diferentes contextos de la confiabilidad:

- Confiabilidad de fabricación. La fabricación y ensamblaje de piezas defectuosas pueden tener como resultado falta de exactitud dimensional, formas incorrectas de las piezas y ensamblaje pobre.
- Confiabilidad de instalación. La instalación no apropiada tiene como resultado vibraciones excesivas, equipos no nivelados y defectos en cables y tuberías.
- Confiabilidad de diseño. El diseño defectuoso incluye plantillas que no encajan con la forma de las piezas de trabajo, mecanismos defectuosos, vida útil corta de las piezas, selección de piezas equivocadas, sistemas defectuosos de instrumentos de detección, etcétera.
- Confiabilidad de operación y manipulación. Los errores pueden reducir la confiabilidad de operación, estos errores pueden ser de manipulación, preparación y ajuste, estándares operativos incorrectos y deficiencia en el

mantenimiento de las condiciones básicas (limpieza, lubricación y apriete de tornillos).

- Confiabilidad humana. La confiabilidad humana, también conocida como confiabilidad del talento humano, se define como la probabilidad de desempeño eficiente y eficaz de todas las personas, en todos los procesos, sin cometer errores o fallas derivados del conocimiento y actuar humano, durante su competencia laboral, dentro de un entorno organizacional específico.
- Confiabilidad de mantenimiento. La confiabilidad del equipo disminuye también por errores de mantenimiento, tales como sustitución y ensamblaje incorrectos de piezas.

3.3.2 Probabilidad.

La confiabilidad es un valor probabilístico y como tal es una unidad de medida que puede ser usada para evaluar la efectividad de cualquier programa de control (puede ser de calidad, inspección, etc.).

Las mediciones de CM (Confiabilidad Mantenibilidad) se hacen en términos de probabilidad, la cual se define en forma clásica como el resultados de dividir el número de veces de los casos estudiados (intentos o eventos, favorables o no) entre el número total posible de casos (intentos o eventos); en la medida que la cantidad (se recomienda valores superiores a treinta experimentos de intentos o casos posibles sea mayor la probabilidad se vuelve más exacta y cercana al valor real.

3.3.3 Falla.

El concepto inicial dado por Forcadas (1975), define falla como la pérdida de la facultad de un producto o de un componente para realizar una función requerida, por cualquier motivo y en cualquier grado.

La falla se define literalmente como la inhabilidad de un sistema o componente de sistema para desempeñar una función requerida dentro de límites especificados. El criterio de falla depende en gran parte del contexto de uso, y este como tal puede ser subjetivo.

3.3.4 Sistema.

Conjunto de componentes relacionados para lograr una mayor confiabilidad en los sistemas, estos se diseñan de forma tal que los componentes de un sistema fallan independientemente unos de otros.

Los sistemas pueden dividirse en sistemas reparables y no reparables. Se considera un sistema reparable aquel que, después de fallar en realizar al menos una de sus funciones requeridas, puede ser restaurado para realizar todas sus funciones requeridas por cualquier otro método que no sea el reemplazo del sistema entero. Los sistemas no reparables implica un cambio completo

El análisis de sistemas reparables requiere técnicas diferentes a las utilizadas en sistemas no reparables, que se basan en muestras aleatorias. En la práctica se encuentran equipos complejos compuestos de muchos elementos unidos y dependientes unos de otros. Las dos configuraciones más típicas son en serie y en paralelo.

Bajo el punto de vista de confiabilidad, se considera un sistema en serie cuando el fallo de uno de sus elementos con lleva al fallo total del sistema. Por otra parte, se considera en paralelo cuando el sistema funciona siempre que funcione al menos uno de sus componentes. El fallo se producirá cuando se haya desatado en todos sus elementos. (Mendenhall, Wackerly, Scheaffer, 2008).

Curva de davies o curva de la bañera.

La curva de Davies o curva de la bañera es la forma típica de la función de riesgo o tasa de fallas graficadas contra el tiempo de vida de una entidad.

La gráfica decrece al comienzo (región I), debido a las fallas tempranas (también llamada mortalidad infantil); se estabiliza cerca a una constante (región II), a lo largo de su vida útil (también llamada etapa de rodaje) y finalmente se incrementa rápidamente (región III), por el desgaste, envejecimiento o fatiga. La Fig.13 es una representación gráfica de la curva de Davies, en sus tres etapas y su tasa de fallas:

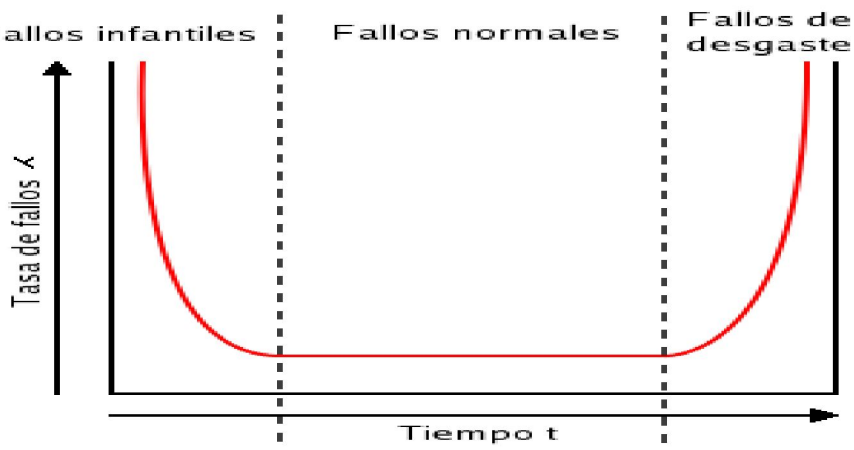


Fig. 13. Curva de la bañera, tasa de fallas vs tiempo.

Se detallan las causas y estrategias de cada etapa en la figura 14:

Etapa	Causas	Estrategias
Mortalidad infantil o rodaje	Defectos de manufactura. Defectos en soldadura. Grietas, mal selección. Partes defectuosas. Mal montaje. Bajo control de calidad. Contaminación. Mal diseño y acabados. Mala reparación. Mantenimiento inadecuado. Entorno de trabajo	Pruebas de arranque. Verificación de diseño y construcción. Pruebas de recepción y aceptación.
Vida normal	Medio ambiente Exceso de carga. Mala operación. Errores humanos. Acciones fortuitas. Cambios operacionales o referencias de producción.	Lubricación y engrase adecuado. Tribología. Vibraciones. Condiciones de operación normales.
Vejez	Fatiga. Corrosión. Fricción. Carga cíclica "vejez". Fallas de los elementos o mecanismos.	Mantenimiento preventivo Vibraciones. Reemplazo de partes. Tecnología. Predictivo. Tero tecnología.

Fig. 14. Etapas, causas y estrategias en mantenimiento.

Fuente: Manual de operación y mantención de equipos de riego presurizado

CALIDAD EN LOS DATOS DE CONFIABILIDAD

La calidad en los datos consiste principalmente en chequear la precisión y la relevancia de éstos, tomados para una determinada aplicación.

Esta calidad en los datos de confiabilidad depende de algunos factores como:

- Cantidad de fallas reportadas, donde se puede preguntar si la totalidad de las fallas presentadas fueron reportadas.
- La coherencia que se presenta en las órdenes de trabajo entre los códigos asignados a los diferentes tipos de causas de reparación.
- La correcta identificación del componente, mecanismo y parte que falló.
- Condiciones ambientales de operación (temperatura, humedad), condiciones de operación (sobrecargas), operación y rutinas de mantenimiento.
- Factores debidos a falencias de diseño.
- Tendencias de comportamiento de componentes.

3.4 Fundamentos matemáticos para el análisis y el cálculo de la confiabilidad.

Introducción.

La aplicación más importante de la estadística de fallas al mantenimiento radica en el suministro de información para los diseñadores e ingenieros de confiabilidad, que les permita determinar con mayor certeza las confiabilidades, disponibilidades y esperanzas de vida para un sistema.

Los estudios pormenorizados de los diferentes métodos, metódicas y metodologías de análisis de la confiabilidad permiten dar cuenta sobre el margen de error obtenido en los modelos matemáticos. Es decir el grado de lejanía de la formulación teórica en comparación a los hechos tangibles.

La ingeniería basada en principios de confiabilidad provee factores para el análisis de las causas de las fallas, por medio de una buena organización de los datos históricos de fallas. Las herramientas de confiabilidad convierten ideas probabilísticas inciertas en métodos determinísticos, los cuales guían las predicciones con el fin de reducir las fallas y los costos de las mismas. (Mendenhall, Wackerly, Scheaffer, 2008).

Metodología para el cálculo de la confiabilidad.

La confiabilidad no es posible medirla en forma instantánea, tal como se hace con la calidad. Un producto puede satisfacer una serie de especificaciones de calidad y, sin embargo, puede ser poco confiable. Toda técnica de medición de la confiabilidad debe basarse en pruebas o ensayos de funcionamiento a través del tiempo y bajo condiciones de operación controladas.

El método más indicado para que se produzcan conclusiones a partir del comportamiento de un sistema reparable y en el caso particular del proceso de obtención de los índices CMD (Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad.), el método puede ser el siguiente:

a. Recopilación y validación de los datos (modos de fallas, tiempos operativos y tiempo fuera de servicio).
b. Análisis de la tendencia de los datos (tendencia creciente, decreciente, constante).
c. Ajuste estadístico.

La confiabilidad se determina bajo un método universalmente aceptado; en cual intervienen diferentes procedimientos estadísticos con el fin de validar los datos iníciales, la correlación de las distribuciones con el comportamiento real y además minimizar el error matemático en las formulaciones necesarias para el cálculo de la confiabilidad. La Fig. 18 corresponde al modelo propuesto para el cálculo de la confiabilidad.

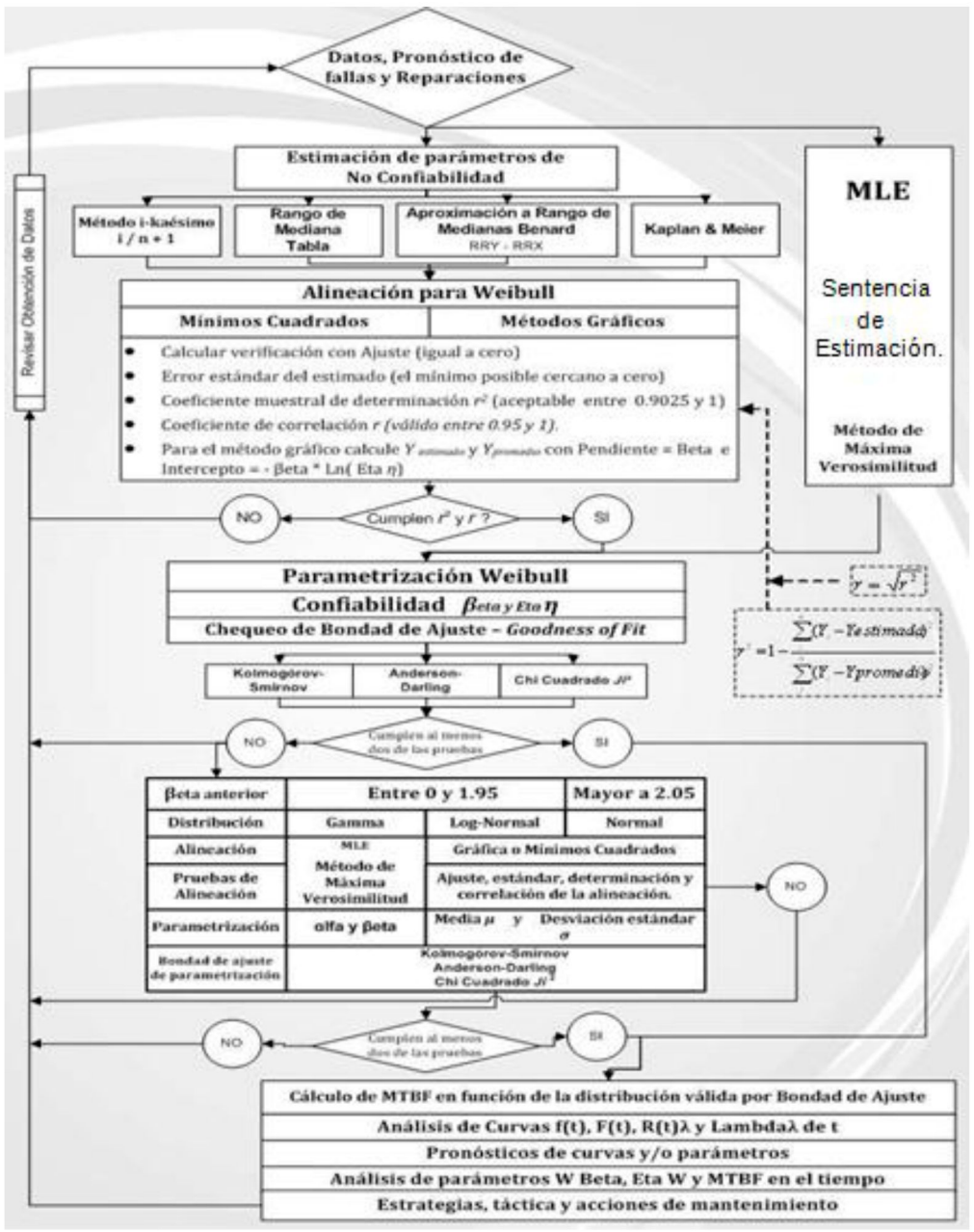


Fig.18. Modelo integral propuesto para la medición de la confiabilidad.

Fuente: Procesos Estocásticos aplicados a la confiabilidad.

Formulación matemática de la confiabilidad.

El desarrollo teórico para los indicadores inmersos en las actividades de mantenimiento establece los diferentes estados y fases que un sistema puede tolerar. Por lo tanto se discrimina el progreso y la consecuencia del ciclo de funcionamiento de los sistemas. Fig. 19.

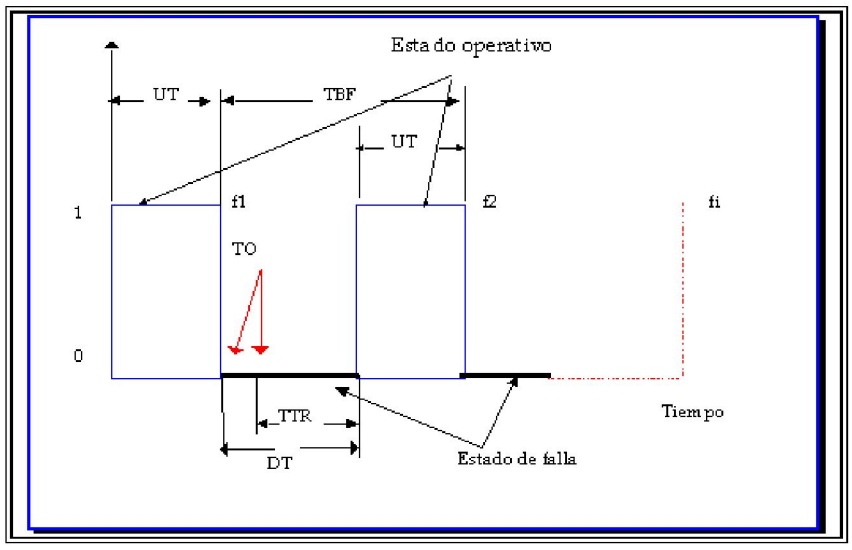


Fig. 19. Distribución de fallas de un equipo.

Dónde:
- 1 : condición operacional del equipo
- 0 : condición no operacional del equipo
- Fi : falla i-ésima
- *UT* : léase en inglés *Up Time* o en español tiempo operativo entre fallas
- *TBF* : léase en inglés *Time Between Failures* o en español tiempo entre fallas
- *DT* : léase en inglés *Down Time* o en español tiempo no operativo
- *TTR* : léase en inglés *Time to Repair* o en español tiempo necesario para reparar
- *TO* : léase en inglés *Time Out* o en español tiempo fuera de control (tiempo difícil de estimar, se relaciona con la logística del mantenimiento: suplidores, transporte, retrasos, ocio)
- n : número de fallas

Función de densidad de probabilidad de fallas.

Las fallas se producen en distintos tiempos o momentos. Por lo tanto, el tiempo en que ocurre una falla es una variable aleatoria. Por este motivo puede expresarse por medio de una función de densidad de probabilidad de fallas. Como toda función de densidad, el área que cubre respecto el eje de abscisas es la unidad.

La función de densidad de falla f (t) (fig. 20) está definida como la derivada de la función de confiabilidad. Esta no es tan efectiva como la función de confiabilidad para comparar dos poblaciones de datos; simboliza la frecuencia relativa de que un elemento alcance un tiempo t de vida.

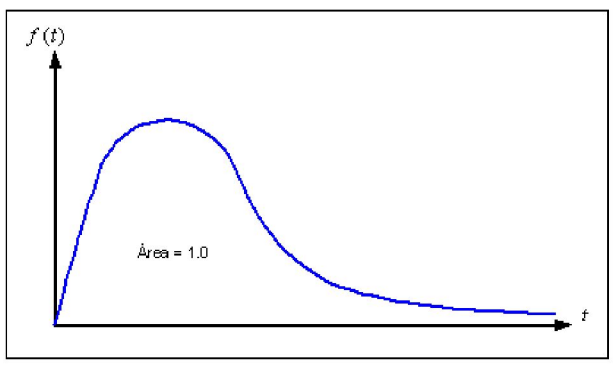


Fig.20. Función de densidad de fallas

Ecuación 15. Definición matemática de la función de densidad de falla y ecuación 16 para condiciones de la función de densidad.

$$f(x) = \frac{1}{N_o} \cdot \frac{\partial N_f}{\partial t} = -\frac{\partial R}{\partial t}$$

N_f : número de falla

N_o : número total de fallas

R : fucnion de confiabilidad

…… Ecuación 15.

$$\int_0^{\infty} f(t) \cdot dt = 1$$

$f(t) \geq 0$ para todo $t \geq 0$

$f(t) = 0$ para todo $t \leq 0$

Donde f(t) es la función de densidad

…… Ecuación 16.

Función de Confiabilidad.

La función de confiabilidad también es conocida como función de supervivencia. Representa la probabilidad de que un componente no haya fallado después de determinado tiempo. Puede interpretarse también, como el porcentaje de componentes que sobrevivirán sin fallar después de un tiempo dado.

La función de supervivencia indica la probabilidad de que un valor X se mayor o igual a un valor Xn; es una función decreciente, corresponde con la curva de confiabilidad R(t) y representa la probabilidad de que un elementos esté funcionando después de un tiempo t (Fig. 21).

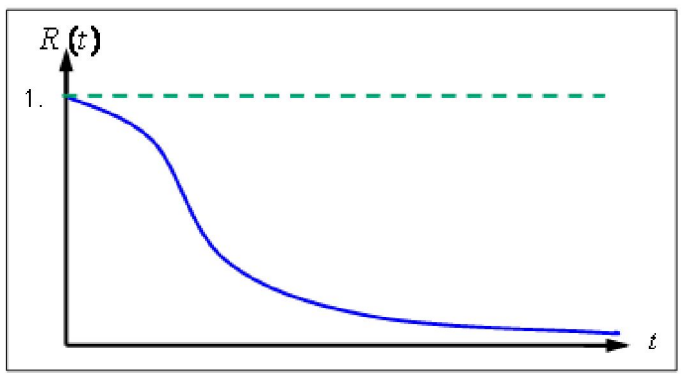


Fig. 21 Curvas de la función de supervivencia o confiabilidad.

Ecuación 17. Definición matemática de la función de confiabilidad o supervivencia.

$$R(x) = P(X \geq x) = \int_{x}^{\infty} f(s) \cdot ds \quad \text{.....Ecuación 17.}$$

Función de no Confiabilidad.

La función de no confiabilidad también es conocida como función de distribución acumulada y se refiere a la probabilidad de que un valor X sea menor o igual a un valor Xn; es una función típicamente encontrada en confiabilidad en la curva de probabilidad acumulada.

Ecuación 18. Definición matemática de la función de no confiabilidad.

$$Q(x) = P(X \leq x) = \int_{0}^{x} f(s) \cdot ds \quad \text{.....Ecuación 18.}$$

Función de tasa de fallas.

Se llama tasa de fallas a la relación entre los componentes o productos fallados en un instante dado y los sobrevivientes en este momento.
Ecuación 19. Tasa de falla de un sistema.

$$\lambda = \frac{Número\ de\ fallas}{\sum UT} \quad \text{.....Ecuación 19.}$$

λ :Tasa de falla del equipo

UT : tiempos de operación

Tiempo medio entre fallas (*MTBF).*

Representa el tiempo promedio durante el cual el componente o sistema funciona sin fallas. Se calcula como la esperanza matemática de la función de densidad de probabilidad de fallas. Una conocida ley estadística enuncia que este valor viene dado, además de su forma convencional, por la integral entre cero e infinito de la función de confiabilidad, por el hecho de que la variable aleatoria es positiva

Ecuación 20. Definición matemática del tiempo medio entre fallas – *MTBF*

$$MTBF = \frac{Tiempo_total_calendario}{número_de_fallas} \quad \text{.....Ecuación 20.}$$

Tiempo para fallar (*MTTF*).

El tiempo medio para fallar, *MTTF (mean time to failure)*, es la medida de la tendencia central o esperanza matemática de la distribución asignada para la variable tiempo para fallar, la cual expresa el tiempo operado y se usa generalmente para elementos no reparables.

Métodos de estimación de parámetros.

En el análisis de los datos de vida y la ingeniería de confiabilidad se deben estimar los valores de la probabilidad de falla, la probabilidad de éxito o confiabilidad, la vida media, los parámetros de una distribución o cualquier otro parámetro aplicable, que son generalmente los interrogantes de los que se parte en los estudios de confiabilidad.

Estimación de la no confiabilidad.

Los métodos gráfico y de mínimos cuadrados requieren la estimación previa de la no confiabilidad; para ello se requiere obtener los porcentajes acumulados para cada tiempo de falla; entre los métodos existentes hay dos cuyo uso se ha masificado para el cálculo de dicha no confiabilidad y son el rango de mediana y el estimador de Kaplan-Meier.

- Rangos de mediana: el rango de medianas (R_M) es usado para obtener un estimado de la no confiabilidad para cada falla. Éste es el valor que la probabilidad real de falla debe tener para la enésima falla, para una muestra de N datos con un nivel de confianza del 50%.

  El rango de mediana puede ser estimado de una manera sencilla pero un poco menos precisa a través de la aproximación de Benard.
  Ecuación 21. Aproximación de Benard para el rango de mediana.

$$R_M = \frac{j - 0.3}{N + 0.4} \quad \text{.....Ecuación 21.}$$

Donde:

R-M : estimador de no confiabilidad del rango de mediana

j : posición del dato ordenada de menor a mayor

N : número total de datos

- Kaplan-Meier: el estimador de Kaplan-Meier (K_M) es un método alternativo al rango de mediana para calcular un estimado de la no confiabilidad que utiliza igualmente el número de datos de la muestra; éste estimador tiene la desventaja de dar en el último valor una no confiabilidad de cero, por lo cual su fórmula se ha modificado para que pueda usarse en los modelos de estimación gráfica y de mínimos cuadrados.

Método gráfico.

El graficado de los datos en papeles especiales de probabilidad es el primero de los métodos y puede ser fácilmente implementado a mano. El método toma la función de distribución acumulada y trata de alinearla empleando una construcción especial en los ejes "x" y "y" del papel.

Método de regresión lineal con mínimos cuadrados.

El método permite realizar un ajuste por medio del análisis matemático de regresión lineal con mínimos cuadrados a una línea recta, donde se trata de estimar los parámetros de la pendiente y el intercepto que minimicen el componente aleatorio de error. (Guarín, 2008).

El método requiere que una línea recta se ajuste a un conjunto de datos de tal manera que la suma de los cuadrados de las distancias de los puntos a la línea de ajuste sea minimizada. Esta minimización puede desarrollarse tanto en el eje vertical como en el eje horizontal.

El método de estimación por mínimos cuadrados permite adicionar otro criterio del ajuste de los datos a la distribución: el coeficiente de correlación, el cual es una medida de qué tan bien el modelo se ajusta en la regresión lineal, e indica la correlación existente entre los datos y el estimador de no confiabilidad (rango de mediana o de Kaplan-Meier). Los valores cercanos a uno o menos uno, presentan una alta correlación, en tanto que los valores cercanos a cero no tienen ninguna correlación con el modelo lineal.

El método es bastante bueno para las distribuciones que pueden ser alineadas; afortunadamente, la mayoría de las distribuciones usadas en el análisis de fallas son de este tipo. Para estas distribuciones los cálculos son relativamente sencillos y poseen una buena bondad de ajuste a través del factor de correlación. Este método es generalmente usado para un conjunto completo de datos y sin ningún tipo de censurado.

Método de máxima verosimilitud.

Desde el punto de vista estadístico, el método de máxima verosimilitud es el método más robusto para la estimación de parámetros. La idea básica de este método es obtener el valor más probable de los parámetros para una distribución dada, a través de la maximización de la función de máxima verosimilitud o la de su logaritmo natural aplicada a la función de densidad cuyos parámetros se van a estimar.

El método de máxima verosimilitud tiene muchas propiedades que lo hacen atractivo; entre ellas están: ser asintóticamente consistente que significa que al aumentar el tamaño de la muestra el valor estimado converge al valor correcto, ser asintóticamente eficiente lo que se refleja en que al aumentar el tamaño de la muestra el valor estimado es más preciso y ser asintóticamente imparcial, es decir, que al aumentar el tamaño de la muestra se espera conseguir en promedio el valor correcto. Sin embargo, el tamaño de la muestra necesaria para alcanzar tales propiedades requieren un valor considerablemente alto de datos J (de entre treinta y cincuenta a más de cien), dependiendo de la aplicación, lo que causa para valores pequeños discrepancias en los análisis.

3.5 Distribuciones teóricas usadas en Confiabilidad.

El estudio de la confiabilidad suele asumir algunas hipótesis fundamentadas en experiencias anteriores que permiten tratamientos analíticos rápidos y a los cuales podemos conferir cierto grado de confianza. (Mendenhall, Wackerly, Scheafer, 2008).

Las hipótesis que se establecen en confiabilidad se refieren a la expresión matemática de la ecuación de densidad de probabilidad de fallas. Son muchas las distribuciones teóricas que han demostrado en determinados casos describir acertadamente los fenómenos implícitos de la confiabilidad.

Las distribuciones más utilizadas para el análisis de la confiabilidad son la exponencial, la normal, la de Weibull, la gamma y log normal, entre otras. Ver Anexo C.

Distribución exponencial.

La distribución exponencial posee una intensidad constante de fallas. Siempre que las fallas sean aleatorias (sucesos fortuitos) y no dependan del tiempo que la unidad lleva funcionando, se puede pensar en una distribución exponencial de fallas. Fig. 22.

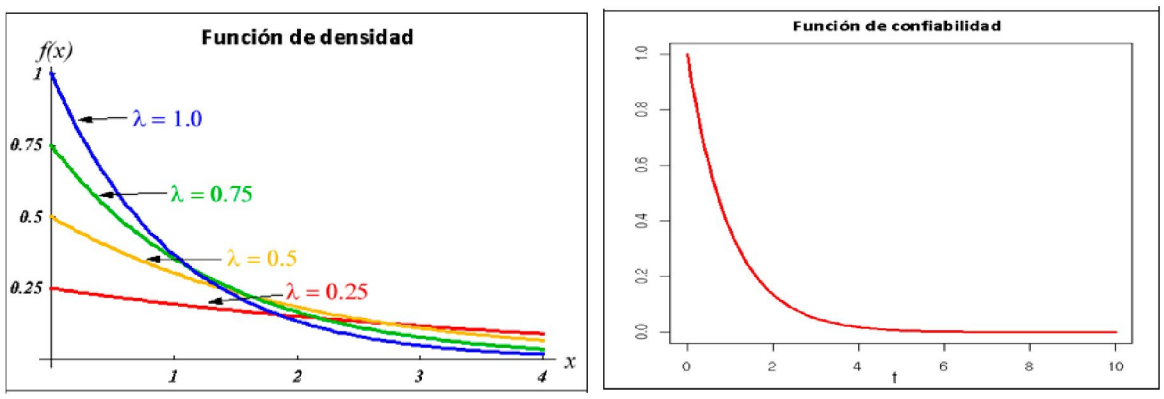
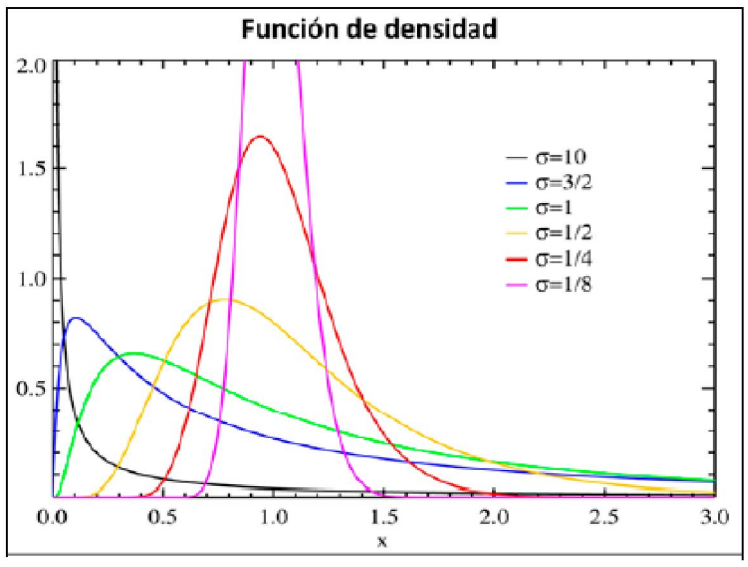


Fig. 22. Gráfica de la función de densidad y de confiabilidad para la distribución exponencial.

Distribución log-normal.

Una variable aleatoria es log normal, si el logaritmo de dicha variable es Normal con media μ y σ desviación estándar. La distribución, puede tomar varias formas pero siempre con tendencia o cola hacia su derecha; la razón para ser menos conocida que la distribución de Weibull, es que su función de confiabilidad no tiene forma cerrada, esto es importante para la estimación de sus parámetros que siempre tienen la tendencia de ser muy altos. Fig. 23.



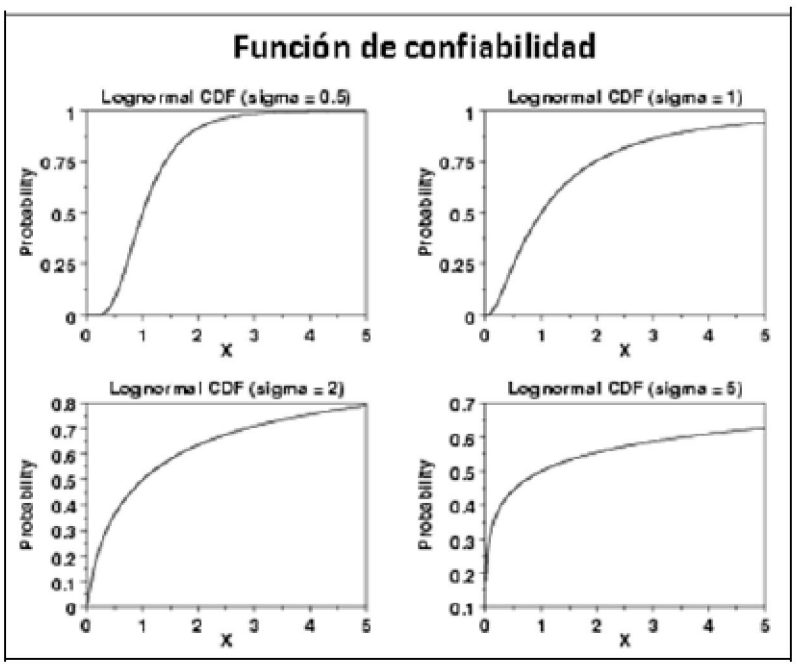
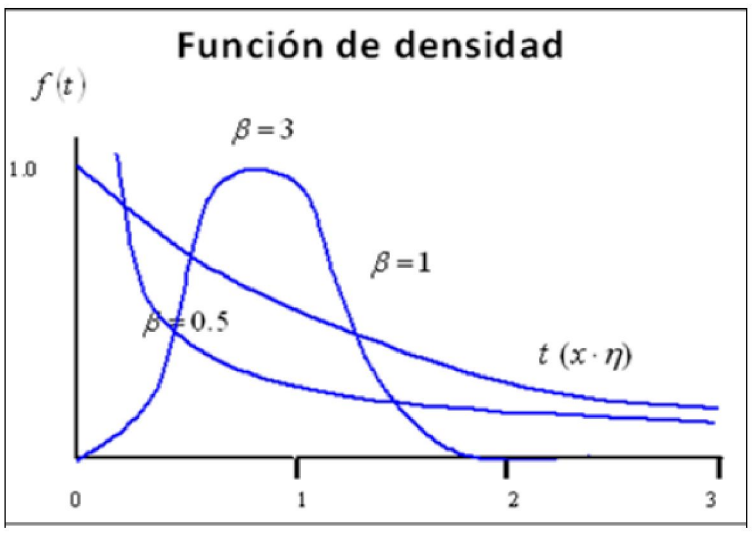


Fig. 23. Gráfica de la función de densidad y de confiabilidad para la distribución lognormal.

Distribución de Weibull.

La distribución de Weibull **(***Waloddi Weibull 1951***),** es usada con frecuencia para representar la vida de los componentes. Fue usada para describir las variaciones en la resistencia a la fatiga del acero, y posteriormente se ha usado para representar la vida de servicio de tubos y otros equipos electrónicos. Fig. 24.



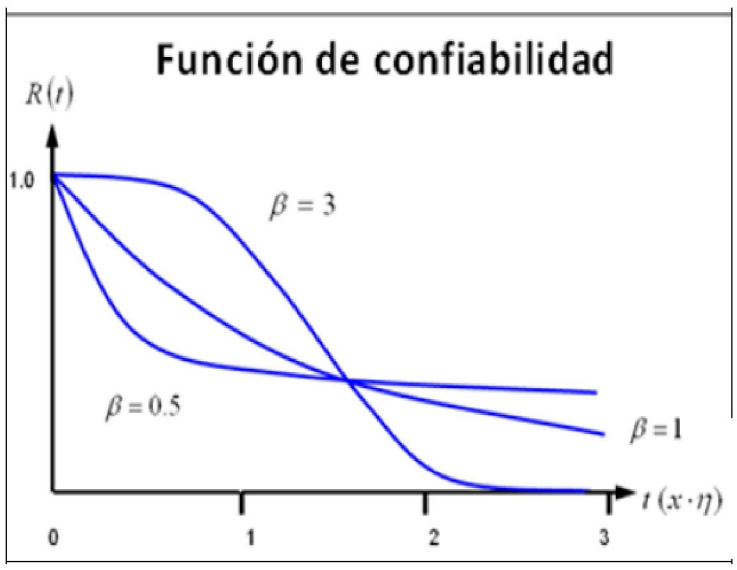
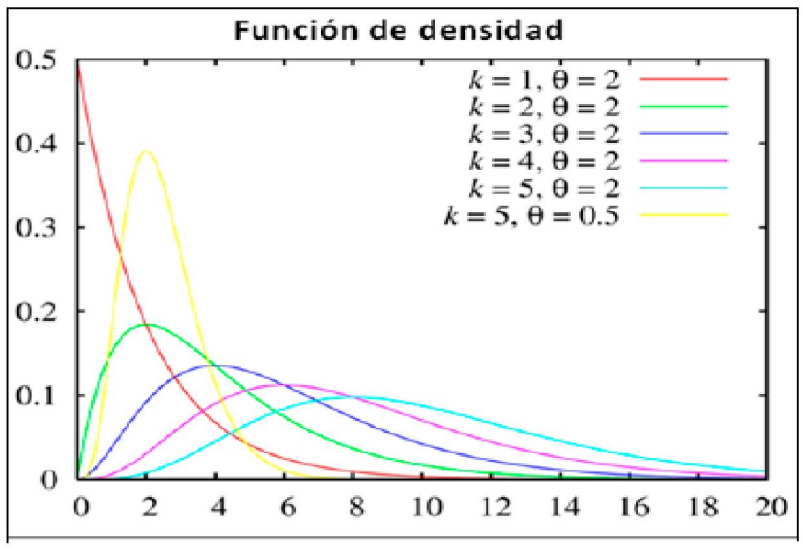


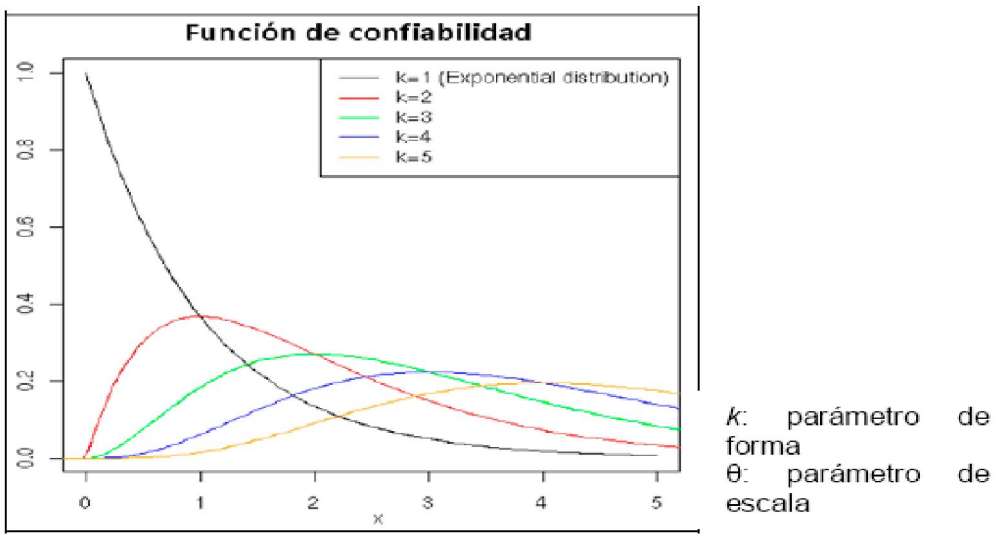
Fig. 24. Gráfica de la función de densidad y de confiabilidad para la distribución de Weibull.

Distribución gamma.

La distribución gama posee dos parámetros que tienen propiedades similares a los de la distribución de Weibull, el parámetro de escala y el parámetro de forma, que pueden ser ajustados a los datos obtenidos con gran flexibilidad. La distribución exponencial es una caso especial de la distribución gamma, cuando $\propto = 1$ .Fig. 25.

La distribución gamma es muy conveniente para caracterizar los tiempos de fallas de equipos durante periodos de rodaje, es también muy adecuada para representar sistemas con componentes en "*stand by.*"





k: parámetro de forma
θ: parámetro de escala

Fig. 25. Gráfica de la función de densidad y de confiabilidad para la distribución gamma.

Otras distribuciones.

- Distribución binomial: es una distribución discreta que se aplica a eventos mutuamente excluyentes como falla o no falla. Permite expresar la probabilidad de tener k veces el evento falla en n ensayos, una vez que se conoce la probabilidad p de una falla.
- Distribución de Poisson: es una distribución discreta, frecuentemente usada en gestión de inventarios. Se usa también, en lugar de la distribución binomial, cuando se manejan probabilidades de falla bajas.
- Distribución beta: es usada principalmente en proceso acotado en dos extremos.
- Distribución de Erlang: es un caso especial de la distribución gamma con parámetro k entero y puede interpretarse como la distribución del tiempo transcurrido entre la primera y la (k+1) ésima falla de un sistema complejo.
- Distribución de Rayleigh: es un caso especial de la distribución de Weibull cuando el parámetro de forma (β) es igual a 2. (Mendenhall, Wackerly, Scheafer, 2008).

Pruebas de bondad de ajuste.

Las pruebas de bondad de ajuste buscan probar una hipótesis según la cual los datos observados corresponden a una distribución seleccionada bajo los parámetros estimados; entre otras pruebas, para juzgar el ajuste de una muestra se incluyen los métodos visuales y pruebas de tendencia.

Para el análisis estadístico de datos se necesita determinar que tan bien se ajustan éstos a una distribución que se supone inicialmente. Estas pruebas

proporcionan un nivel de significancia a la hipótesis nula (que los datos sí se ajustan a la distribución asumida) la cual puede ser rechazada.

Dentro de las pruebas de bondad y ajuste comúnmente realizadas se encuentran la ji - cuadrada (X^2).

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

La ley de probabilidad que rige el comportamiento de un equipo no resulta ser siempre un análisis sencillo; el criterio de Kolmogorov-Smirnov forma parte de las llamadas pruebas de bondad de ajuste y es el criterio más usado para saber si la ley que rige el comportamiento de los datos es la distribución escogida. Este es un método general que puede usarse para verificar la hipótesis sobre distintas distribuciones de probabilidad.

La prueba de K-S (prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov) de una muestra se interesa en el grado de acuerdo entre la distribución de un conjunto de valores de la muestra y alguna distribución teórica específica. Determina si razonablemente puede pensarse que las mediciones muestrales provengan de una población que tenga esa distribución teórica.

Prueba de Anderson-Darling

La prueba de Anderson-Darling se usa para probar si una muestra de datos proviene de una población con una distribución específica. Esta prueba es una modificación de la prueba de Kolmogorov-Smirnov, en la cual se da más peso a los valores extremos o colas. (Mendenhall, Wackerly, Scheafer, 2008).

La prueba de Anderson-Darling hace uso de una distribución específica para calcular los valores críticos, lo cual es una ventaja ya que permite lograr mayor sensibilidad, pero es también una desventaja, ya que el valor crítico debe ser calculado para cada distribución por separado.

Prueba de ji - cuadrada

Se usa para verificar cuál es la ley de probabilidad que rige el comportamiento de un equipo. La prueba puede ser aplicada a cualquier distribución univariante, para la cual se pueda calcular su función de distribución acumulada. La prueba es alternativa a las pruebas de Anderson-Darling y Kolmogorov-Smirnov.La desventaja que posee la prueba es que debe haber muchos datos para el análisis, como mínimo, tener tres celdas o grupos de datos con cinco datos dentro de cada uno, lo que da un total mínimo de quince datos. La prueba de ji - cuadrada posee la ventaja sobre éstos de que puede ser empleada para distribuciones discretas y discretas.

3.6 Procesos estocásticos homogéneos y no homogéneos.

Los procesos estocásticos son, en resumen, la generalización para el caso de varias dimensiones, del concepto de variable aleatoria.

Los modelos basados en procesos estocásticos se deben comprender inicialmente bajo una buena comprensión de la teoría elemental de probabilidades y un adecuado manejo de conceptos matemáticos.

Definición.

Un proceso estocástico es un conjunto de variables aleatorias (X(t), t L N), definidas sobre un espacio de probabilidades y que varían en el transcurso del tiempo, donde; t es la unidad de tiempo y X(t) representa el estado del sistema en el instante t.

La palabra estocástico es sinónimo de aleatorio. Un proceso estocástico es un sistema que se desarrolla en el tiempo mientras que pasa por fluctuaciones al azar. Los valores asumidos por la variable X(t), se llaman estados y el conjunto formado por todos los posibles valores es el espacio de estados del sistema o espacio parametral, se representa por el símbolo S. Los cambios en el valor de X(t) reciben el nombre de transiciones entre estados. (Mendenhall, Wackerly, Scheafer, 2008).

Los modelos estocásticos son aplicables a cualquier sistema que comprenda variabilidad al azar con el transcurso del tiempo. En geofísica se han usado para la predicción de la magnitud de terremotos.

Para ilustrar estos conceptos propone varios receptores de FM y se visualiza el ruido que presentan cuando están desintonizados, se observa que, aunque construidos bajo el mismo diseño y tipo de dispositivos de principio a fin, las señales recogidas son diferentes en su forma de onda (Fig. 26). Es más, cuantos más equipos diferentes se visualizan más formas de onda diferentes se observarían.

Por lo tanto, calificar el ruido de un receptor como una señal sería incorrecto y es más adecuado denominarle proceso ya que se manifiesta con infinitas realizaciones o formas de onda diferentes, cada una de ellas asociada a un experimento, que en el caso reseñado es una medida sobre distintos receptores. A este conjunto de señales obtenidas como resultado de distintos experimentos (cada uno de los receptores) se le denominara proceso aleatorio.

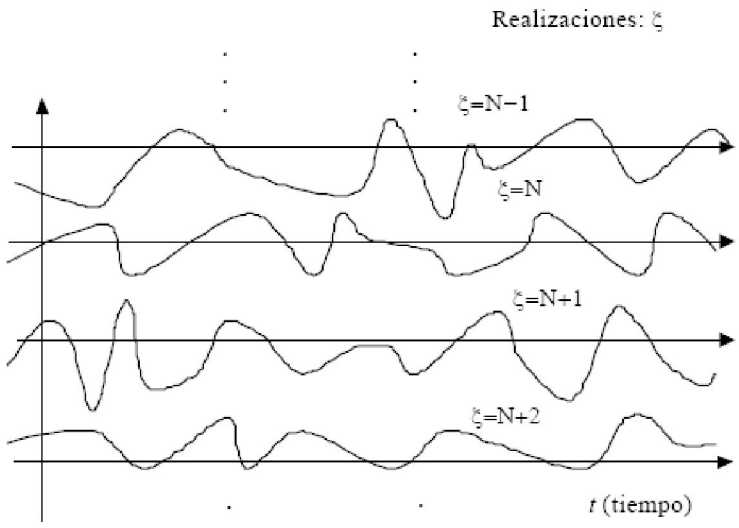


Fig. 26. Proceso aleatorio representado por sus estados.

Fuente: Procesos Estocásticos aplicados a la confiabilidad

La única manera de representar fenómenos aleatorios es usando sus funciones de densidad de probabilidad. De este modo, cuando fijado el tiempo se ha encontrado una variable aleatoria se ha recurrido a representar la f(x,t) de la variable aleatoria. Para determinar estas relaciones, se aplica la teoría de la probabilidad.

- Procesos estocásticos de parámetro discreto: La colección de variables aleatorias representadas por (X(t), t ∈ N) dond: N es un intervalo infinito tal como, N= (0,1,2,3,…), t es la unidad de tiempo y X(t) es la observación en el tiempo t, es un proceso estocástico de parámetro discreto, si t puede tomar solo valores discretos. En el tiempo t=1, la variable aleatoria de lo observados es X(1) y en el tiempo t=2, la variable aleatoria de lo observado es X(2)…

- Procesos estocásticos de parámetro continuo: Si se tiene un intervalo $N = \{t \in \mathbb{R} | 0 \leq t \leq \propto\}$, entonces, X(t) recibe el nombre de proceso estocástico de parámetro continuo.

Espacio de estados del sistema.

La variable aleatoria X(t) se llama estado del sistema, y el conjunto de sus posibles valores forma el espacio de estados del sistema, representando por el símbolo S. Si S está compuesto por un número finito o infinito numerable de estados, se dice que el proceso es discreto en el espacio, pero si por el contrario, S está compuesto por un conjunto continuo de elementos, se dice que el proceso es continuo en el espacio.

Clases de procesos estocásticos.

Los procesos estocásticos se pueden clasificar en cuatro tipos:

a. Procesos estocásticos con parámetro discreto y espacio de estados del sistema discreto. Ejemplo: Cantidad de fallas de una tubería en un mes. Fig. 27.

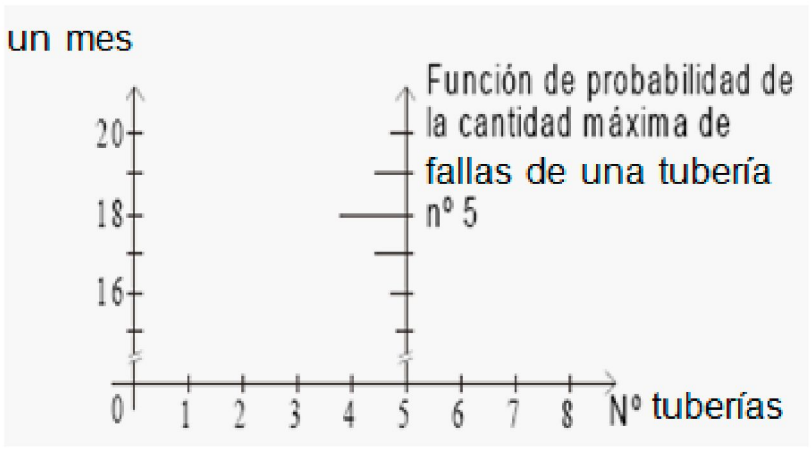


Fig. 27. Proceso discreto de variable discreta.

b. Procesos estocásticos con parámetro continuo y espacio de estados del sistema continuo. Ejemplo: Nivel de tirante en el canal de llamada de un cárcamo de bombeo. Fig. 28. (Ocaña, Valderrama, Granada, 2005).

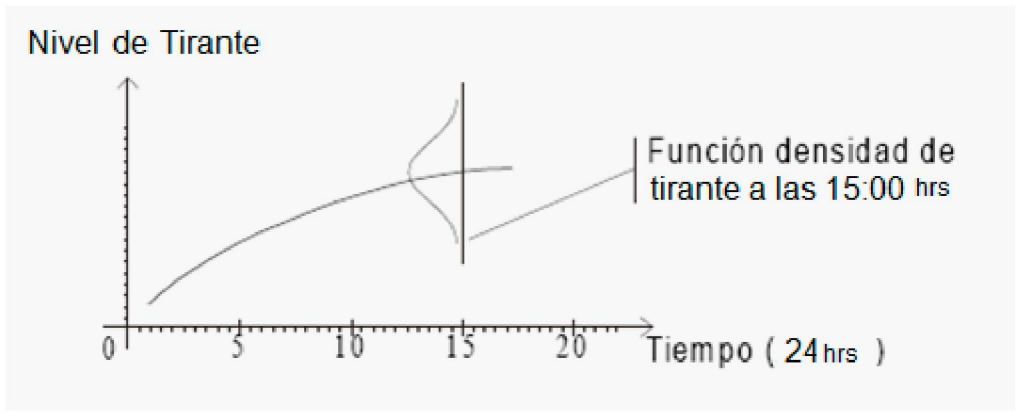


Fig. 28. Proceso continuo de variable continua.

c. Procesos estocásticos con parámetro continuo y espacio de estados del sistema discreto. Ejemplo: temperatura máxima de cada día. Fig. 29.

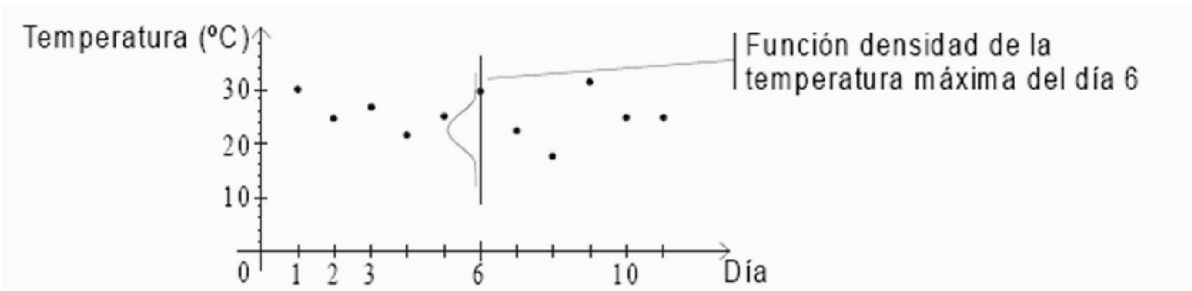


Fig. 29. Proceso discreto de variable continua.

d. Procesos estocásticos con parámetro discreto y espacio de estados del sistema continuo. Ejemplo: la situación de encendido o apagado de una bomba hidráulica. Fig. 30.

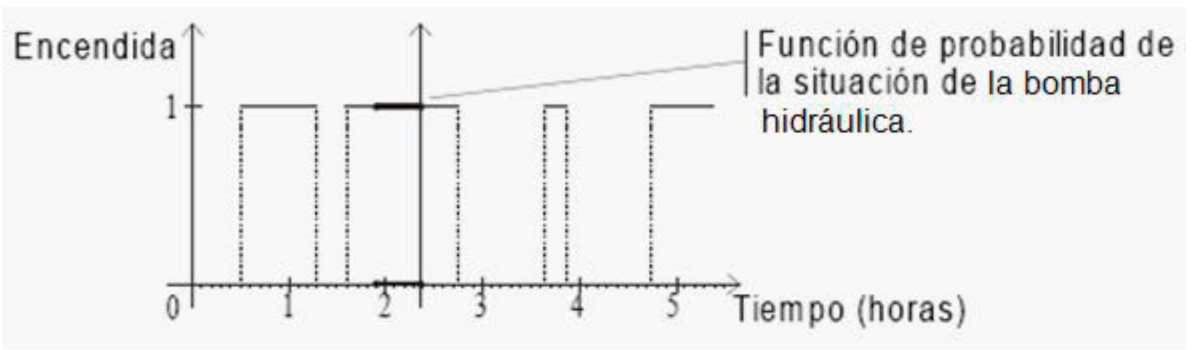


Fig. 30. Proceso continuo de variable discreta.

Por otra parte, el comportamiento de los sistemas reparables se puede ajustar utilizando dos modelos desde el punto de vista estocástico: el proceso homogéneo de Poisson (*HPP* por sus siglas en ingles) y el proceso no homogéneo de Poisson.

Varios escritores sostienen que los métodos de confiabilidad para equipos no reparables, *HPP,* que tradicionalmente se usan, como la distribución de Weibull, no son apropiados para los sistemas reparables y se sugiere ampliar el modelo a través del proceso no homogéneo de Poisson, *NHPP.*

3.7 Procesos estocásticos homogéneos.

Proceso de Poisson homogéneo

El proceso de Poisson consiste en una secuencia de ocurrencias de fallas o averías de un sistema reparable, durante su periodo de funcionamiento. En la Fig. 31 se demuestra, a modo de ejemplo, una secuencia de ocurrencias de fallas; para un determinado periodo de funcionamiento donde t representa el tiempo de vida (edad) del sistema en el momento de la falla. (Ocaña, Valderrama, Granada, 2005).

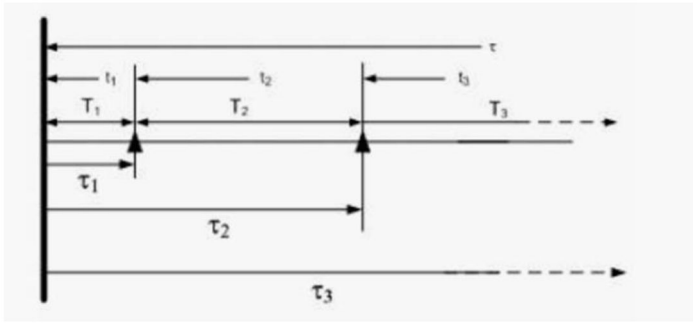


Fig. 31. Ejemplo de proceso estocástico puntual.

Dónde: t_i : tiempo instantáneo i-ésimo
T_i : tiempo total en el intervalo i-ésimo
τ_i : tiempo acumulado i-ésimo

El proceso de Poisson es homogéneo siempre y cuando no sea dependiente del tiempo. Es decir el número de los eventos en un intervalo depende solamente de la longitud del intervalo. La probabilidad de la ocurrencia de los eventos en cualquier período es independiente de lo ocurrido en el período previo. Para este modelo la confiabilidad R(t) se define como:

Ecuación 20. Función de confiablidad para Poisson homogéneo.

$$R(t_1, t_2) = e^{-\lambda(t_1 - t_2)} \ldots\ldots\ldots\ldots Ecuación\ 20$$

Donde: (t_1, t_2) Intervalo de tiempo
λ : tasa de fallas.

Si el sistema reparable presenta una tasa de fallas constante, la confiabilidad para el próximo periodo de utilización es independiente del tiempo de vida durante lo cual el sistema exhibe una tasa de fallas constante. En este contexto se puede

hablar del *MTBF* (*Mean Time Between Failures)* del sistema, siendo el inverso de la tasa de fallas por tanto siguen un proceso de Poisson homogéneo.

El proceso de Poisson también conocido como ley de los sucesos raros es un proceso de sucesos independientes donde:

- El número de sucesos en dos intervalos independientes siempre es independiente
- La probabilidad de que un suceso ocurra en un intervalo es proporcional a la longitud del intervalo
- La probabilidad de que ocurra más de un suceso en un intervalo suficientemente pequeño es despreciable.

Los procesos homogéneos tienen una densidad media λ. Eso significa que la media de los sucesos en un intervalo de tiempo t es λ / t.

El tiempo entre dos sucesos de un proceso de Poisson con intensidad media λ es una variable aleatoria de distribución exponencial con parámetro λ. Se pueden modelar muchos fenómenos como un proceso de Poisson. (Ocaña, Valderrama, Granada, 2005).

El número de sucesos en un intervalo de tiempo dado es una variable aleatoria de distribución de Poisson donde λ es la media de números de sucesos en este intervalo. El tiempo hasta que ocurre el suceso número k en un Proceso de Poisson de intensidad λ es una variable aleatoria con distribución gamma o (lo mismo) con distribución de Erlang con $\theta = 1 / \lambda$.

El proceso de Poisson homogéneo, a pesar de la simplicidad de este modelo, es ampliamente utilizado para el equipo y los sistemas reparables a través de la industria. La justificación proviene, en parte, de la forma de la curva de la bañera. La mayoría de los sistemas (herramientas o equipos complejos) pasan la mayor parte de sus tiempos operativos en el segmento constante de tasa de fallas de la curva de la bañera. El proceso de Poisson homogéneo es el único modelo que se aplica a esa porción de la curva, así que es el modelo más popular para la evaluación de la confiabilidad del sistema y el planeamiento de la prueba de la confiabilidad.

Proceso de Markov. El proceso de Markov recibe su nombre del matemático ruso Andrei Markov, es una serie de eventos, en la cual la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediato anterior.

Un proceso estocástico de parámetro discreto $\{X(t), T = 0,1,2, \ldots\}$, o un proceso estocástico de parámetro contínuo $\{X(t), T > 0\}$, se dice que es un proceso de Markov si, para cualquier conjunto de n puntos de tiempo $t_1 < t_2 < t_3 < \cdots < t_n$ en el conjunto de índices o rango de tiempo del proceso, la distribución condicional de $X(t_n)$, dados los valores de $X(t_1)$, $X(t_2)$, $X(t_3), \ldots, X(t_{n-1})$, depende únicamente de $X(t_{n-1})$, el valor inmediatamente precedente; es decir para cualquier conjunto de números reales $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$,

$$Pr\{X(t_n) \leq x_n | X(t_1) = x_1, \cdots, X(t_{n-1}) = x_{n-1}\} = Pr\{X(t_n) \leq x_n | X(t_{n-1}) = x_{n-1}\}$$

……Ecuación 21.

En el lenguaje coloquial se dice que, dada la condición "presente" del proceso, el "futuro" es independiente del "pasado".

i) La naturaleza del conjunto índice del proceso (parámetro discreto o parámetro continuo); y

ii) La naturaleza del espacio de estados del proceso.

Un número real x se dice que es un estado de un proceso estocástico s$\{X(t), t \in T\}$, si existe un punto t en el tiempo T tal que la $Pr\{x - h < X(t) < x + h\}$, es positiva para cada $h > 0$. El conjunto de posibles estados constituye el espacio de estados del proceso. Si el espacio de estados es discreto, el proceso de Markov se llama una cadena de Markov. (Canavos, 2007).

Un proceso de Markov de parámetro discreto con espacio de estados discreto es llamado una cadena de Markov de parámetro discreto. Una cadena de Markov es finita si el espacio de estados es finito de otra manera es cadena de Markov infinita o enumerable. Ya que el sistema es observado para un conjunto discreto de puntos tiempo, las sucesivas observaciones serán denotadas por $X_0, X_1, X_2, \cdots, X_n \cdots$; $donde\ X_n$ es una variable aleatoria cuyo valor representa el estado del sistema en el enésimo punto tiempo.

La sucesión $\{X_n\}$, se llama una cadena si es cumple que hay únicamente un número finito o contablemente infinito de estados en los cuales el sistema puede ser encontrado en cualquier punto dentro del rango de tiempo dado. La sucesión $\{X_n\}$, es así una cadena de Markov si cada variable aleatoria X_n, es discreta y se cumple lo siguiente: para cualquier entero $m > 2$ y cualquier conjunto de m puntos $n_1 < n_2 < \cdots < n_m$, la distribución condicional de X_n ,- dado valores de $X_{n_1}, X_{n_2}, \cdots, X_{n_{m-1}}$; depende únicamente de $X_{n_{m-1}}$, el valor inmediatamente precedente; esto es:

$$Pr\{X_{n_m} = x_{n_m} | X_1 = x_{n_1}, \cdots, x_{n_{m-1}} = x_{n_{m-1}}\} =$$

$$Pr\{X_{n_m} = x_{n_m} | X_{n_{m-1}} = x_{n_{m-1}}\} \ldots\ldots\ldots Ecuación\ 22.$$

Un proceso de Markov de parámetro contínuo con espacio de estados discreto es llamado una cadena de Markov de parámetro contínuo y espacio de parámetros discreto. Si tanto el espacio de estados como el espacio de parámetros son contínuos, entonces se llama un proceso de Markov de parámetro contínuo.

Una importante generalización de la cadena de Markov que es muy útil en colas es el proceso de semi-Markov (SMP).

Las transiciones en un SMP forma una cadena de Markov discreta pero los tiempos entre transiciones sucesivas son esencialmente variables aleatorias dependientes de ambas el estado, hacia y el estado desde.

Cadenas de Markov.

Considérese una sucesión de variables aleatorias$\{X_n, n = 0,1,2, \cdots | X_n = 0,1,2, \cdots\}$, la cual forma una cadena de Markov con espacio de parámetros discreto; esto es, para toda n:

$$Pr\{X_n = j | X_0 = i_0, X_1 = i_1, \cdots, X_{n-1} = i_{n-1}\} =$$

$$Pr\{X_n = j | X_{n-1} = i_{n-1}\} \ldots\ldots\ldots Ecuación\ 23.$$

Si el valor de la variable aleatoria $X_n\ es\ j$, entonces el sistema se dice que está en el estado j después de n pasos o transiciones. Las probabilidades condicionales $Pr\{X_n = j | X_{n-1} = i\}$ son llamadas las probabilidades de transición por cada paso o solo probabilidades de transición. Si esas probabilidades son independientes de n entonces la cadena se dice que es homogénia y las probabilidades. (Canavos, 2007).

$$Pr\{X_n = j | X_{n-1} = i\} \ldots\ldots.. Ecuación\ 24.$$

Pueden ser escritas como p_{ij}. La matriz formada colocando p_{ij} en el lugar (i, j) es conocida como la matriz de transición o matriz de la cadena.

Para cadenas homogéneas, las probabilidades de transición en el paso m:

$$Pr\{X_{n+m} = j | X_n = i\} \equiv p_{ij}^{(m)} \ldots\ldots.. Ecuación\ 25.$$

Son también independientes de n. La probabilidad no condicional del estado j para el enésimo ensayo se escribe como:

$$Pr\{X_n = j\} \equiv p_j^{(n)} \ldots\ldots Ecuación\ 26.$$

De modo que la distribución inicial se da por: $p_j^{(0)}$.

Desde las leyes básicas de la probabilidad puede mostrarse que la matriz formada por los elementos $\left\{p_{ij}^{(m)}\right\}$, digamos $p^{(m)}$, puede ser hallada por simple multiplicación de $p^{(m-k)}$ por $p^{(k)}$ para cualquier valor de k, $0 < k < m$.

Esta es la matriz equivalente a las ecuaciones de Chapman-Kolmogorov para este proceso de Markov, a saber

$$p_{ij}^{(m)} = \sum_r p_{ir}^{(m-k)}\ p_{rj}^{(k)} \qquad (0 < k < m) \ldots\ldots Ecuación\ 26.$$

Dos estados, $i\ y\ j$, se dice que son comunicados$(i \leftrightarrow j)$ si i es accesible desde j $(j \leftrightarrow i)$ y j es accesible desde i $(i \leftrightarrow j)$. Se dice que una cadena es inrreducible si todos sus estados se comunican, esto es, si existe una n tal que $p_{ij}^{(n)} > 0$ para todas las parejas (i, j).

El período de un estado de retorno k de una cadena es definido como el máximo común divisor (GCD) del conjunto de enteros $\{n\}$ para los cuales $p_{kk}^{(n)} > 0$.

Un estado se dice que es aperiódico si GCD es l, esto es, si su período es l. Una cadena se dice que es aperiódica si cada uno sus estados es aperiódico.

Definimos a $f_{jj}^{(n)}$ como la probabilidad que una cadena, partiendo del estado j vuelva por primera vez a j en n transiciones. Por lo tanto la probabilidad de que la cadena siempre vuelva a j es.

$$f_{jj} = \sum_{n=1}^{\infty} f_{jj}^{(n)} \ldots\ldots Ecuación\ 27.$$

Si $f_{jj} = 1$, entonces se dice que j es un estado recurrente; si $f_{jj} < 1$, entonces j se dice que es un estado transitorio. Cuando $f_{jj} = 1$, entonces:

$$m_{jj} = \sum_{n=1}^{\infty} n f_{jj}^{(n)} \ldots\ldots Ecuación\ 28.$$

Es el tiempo promedio de recurrencia. Si $m_{jj} < \infty$, entonces j es conocido como un estado recurrente positivo, mientras que si $m_{jj} = \infty$, decimos que j es un estado recurrente nulo.

Definimos $f_{ij}^{(n)}; i \neq j$, como la probabilidad de que la primera travesía desde el estado i al estado j ocurra en exactamente n etapas. Entonces la probabilidad de que el estado j siempre sea alcanzado desde i, es:

$$f_{ij} = \sum_{n=1}^{\infty} f_{ij}^{(n)} \ldots\ldots\ldots Ecuación\ 29.$$

El valor esperado de la sucesión $\left\{f_{ij}^{(n)},\ n = 1,2,\cdots\right\}$, de probabilidades de primera travesía para una pareja fija (i,j), $i \neq$, es denotado por m_{ij} y es llamado el tiempo promedio de primera travesía;

Esto es:

$$m_{ij} = \sum_{n=1}^{\infty} n f_{ij}^{(n)} \qquad (i \neq j) \ldots\ldots\ldots Ecuación\ 30.$$

Si $i = j$, entonces m_{ij} se convierte en el tiempo promedio de recurrencia del estado i.

Teoremas importantes relativos a cadenas de Markov.

Teorema 1. Sea, C una cadena irreducible. Entonces C es, o recurrente o transitorio; esto es, o todos los estados son recurrentes o todos son no recurrentes. (Canavos, 2007).

Teorema 2. Sea C irreducible y sea k un estado fijo en C. Entonces C es recurrente si, y solo si, para cada estado j, $j \neq k$, $fjk = 1$

Teorema 3. Una cadena es recurrente si existe una solución, $\{y_i\}$ de las desigualdades

$$\sum_{j=0}^{\infty} p_{ij}\, y_j \leq y_i \qquad (i \neq 0) \ldots\ldots\ldots Ecuación\ 31.$$

Tal que $y_i \to \infty \ \ cuando\ \ i \to \infty$

Teorema 4. Una cadena de Markov irreducible es transitoria si y sólo si, existe una solución no constante acotada de las ecuaciones

$$\sum_{j=0}^{\infty} p_{ij}\, y_j = y_i \qquad (i \neq 0) \ldots\ldots\ldots Ecuación\ 32.$$

Teorema 5. Sea k un estado fijo en una cadena inrreducible, recurrente. Entonces el conjunto de tiempos medios de primer pasaje, $\{m_{jk}\,,\ j \neq k\}$ satisfacen únicamente al sistema de ecuaciones

$$m_{ik} = 1 + \sum p_{ji}\, m_{ik} \qquad (j \neq k) \ldots\ldots Ecuación\ 33.$$

Teorema 6. Si C es una cadena irreducible, recurrente, entonces o todos sus estados son positivos o todos son nulos.

Definiciones

i) Una cadena aperiódica la cual es irreducible y positiva recurrente se dice que es ergódica.

ii) Una distribución de probabilidad $\{\pi_j, j \in C\}$ se llama distribución estacionaria si $\pi_j = \sum_{i=0}^{\infty} \pi_j p_{ij}$ $(j \in C) \ldots\ldots Ecuación\ 34.$

iii) Una cadena de Markov se dice que tiene una distribución limitante si $existe$ una función de probabilidad $\{\pi_j, j \in C\}$ tal que el

$$\lim_{n\to\infty} p_{ij}^{(n)} = \pi_j \qquad (\forall i, j) \ldots\ldots Ecuación\ 35.$$

Proceso de Bernoulli

El proceso de Bernoulli no es otra cosa que la repetición de un ensayo de Bernoulli. En el ejemplo de pieza de soldar se estudia cuantas veces sale defectuosa o en buen estado, o las probabilidades de que ocurra al menos una falla. Es importante que se cumpla que:

a. La probabilidad de éxito permanece constante ensayo tras cada ensayo.
b. Los ensayos deben de ser independientes entre sí.

3.6.2 Procesos estocásticos no homogéneos.

El proceso no homogéneo de Poisson posee ciertas características relevantes en el estudio de la confiabilidad de sistemas reparables. En esta media, se presenta un nuevo concepto entorno a la ocurrencia de fallas, este es la tasa de ocurrencia de fallas en el tiempo o en inglés *Rate of Occurrence of Failures at Time - ROCOF*.

La tasa de ocurrencia de fallas (*ROCOF*), se puede definir como el número de acontecimientos inesperados sobre un rato particular de la operación de un sistema o la frecuencia de ocurrencia con la cual un comportamiento inesperado es probable que ocurra. Por ejemplo, un *ROCOF* de 0.02 = 2/100, significa que 2 fallas son probables de ocurrir en cada 100 unidades de tiempo de operación. Este índice a veces se llama intensidad de caída.

Proceso no homogéneo de Poisson.

El proceso no homogéneo de Poisson, *NHPP* (*Non Homogeneous Poisson Process*), es similar al proceso homogéneo de Poisson con la excepción de que el la tasa de fallas es dependiente del tiempo. Por lo tanto, el proceso es no estacionario porque la tasa de fallas no lo es, ni es independiente ni se distribuye de forma idéntica en el tiempo por lo que:

Ecuación 13. Función de Confiabilidad para Poisson no homogéneo.

$$R(t_1, t_2) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \lambda \cdot (t \cdot dt)} \ldots\ldots\ldots Ecuación\ 34.$$

Donde: t_2, t_1 : Intervalo de tiempo

$\lambda(t)$: tasa de fallas dependiente del tiempo

El proceso no homogéneo de Poisson, como el propio nombre sugiere, son aquellos en que la *ROCOF* (*Rate of Occurence of Failures af Time)* es variable a lo largo del tiempo. La presencia de una secuencia no aleatoria de fallos significa que los tiempos desde el último fallo pueden presentar tendencia para disminuir o aumentar a lo largo del tiempo, correspondiendo respectivamente, a un sistema reparable con una *ROCOF* creciente o decreciente. (Canavos, 2007).

Lo expuesto en el texto anterior sugiere que al modelar el comportamiento operativo de los sistemas reparables, debe validarse la tendencia de los tiempos operativos a partir de un método de análisis de tendencia como por ejemplo la prueba del centroide o la transformada de Laplace.

La importancia del *NHPP* reside en el hecho de que no requiere la condición de incrementos estacionarios. Así, hay la posibilidad que los acontecimientos pueden ser más probables de ocurrir durante intervalos específicos. El *NHPP* tiene memoria. Entonces, es una herramienta adecuada para estudiar los acontecimientos donde puede haber acción del tiempo (como envejecimiento).

El número de accidentes de tránsito en carreteras, se podría considerar como un buen ejemplo de este proceso; ya que la frecuencia del número de accidentes será alta empezando el año, decrecerá y se hará más o menos cíclica a medida

que pasan los días (con mayor frecuencia durante los fines de semana y los puentes festivos) y al final del año la frecuencia volverá a incrementarse.

Para conocer completamente el proceso de Poisson no homogéneo se debe determinar la función de frecuencia o intensidad λ(t), asociada al proceso. A continuación se presenten algunos estimadores para la función de frecuencia:

- Estimador exponencial polinómico: el estimador de la función de intensidad λ(t)= de un *NHPP*, es conocido desde hace muchos años en la literatura estadística. (Canavos, 2007).

Ecuación 35. Estimador exponencial polinómico para *NHPP*

$$\lambda(t) = e^{\alpha_0+\alpha_1 \cdot t+\cdots+\alpha_k \cdot t^k} \ldots\ldots\ldots \text{Ecuación 35.}$$

Los modelos estadísticos para la determinación del grado k del polinomio y los parámetros $\propto_0, \alpha_1, \cdots, \alpha_k$ sólo se conocen en forma exacta par la k=1 y en forma aproximada para k=2.

La determinación de $\propto_0, \alpha_1, \cdots, \alpha_k$ debe utilizar métodos numéricos iterativos y las relaciones obtenidas por la función de máxima verosimilitud. El grado k del polinomio se debe tratar de mantener pequeño, pues de lo contrario se tendrían problemas en el proceso de computo.

- Estimador normal: para este estimador no es necesario utilizar la función de máxima verosimilitud.

Ecuación 36. Estimador normal para *NHPP*

$$\lambda(t) = e^{\alpha_0+\alpha_1 \cdot t+\alpha_2 \cdot t^2}, con\ \alpha < 0 \ldots\ldots\ldots \text{Ecuación 36.}$$

Proceso de Renovación

El proceso de renovación se define como una secuencia de variables aleatorias independientes, no negativas e idénticamente distribuidas $T_1, T_{2,\ldots}$, con función de distribución F_T(t)=P($T_i \leq$ t), para t $\geq$ 0, i=1,2,…; se considera además, que no son todas cero con probabilidad uno. Los eventos observados (fallas o reparaciones) son llamados renovaciones y consideraremos a F_T(t) como la distribución subyacente del proceso de renovación.

Ecuación 37. Tiempo hasta la n-ésima renovación.

$$S_n = T_1 + T_2 + \ldots + T_n = \sum_{i=1}^{n} T_i \ ; \ S_n = S_{n-1} + T_n \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \text{Ecuación 37.}$$

Capitulo 4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La confiabilidad de un sistema, su equipo, sus dispositivos, sus tuberías, etc. para nuestro caso de riego por goteo, están íntimamente ligados a su calidad y en muchos diseños la confiabilidad es una norma que debe cumplirse para que no se ponga en riesgo grandes **recursos materiales o invaluables vidas humanas.** Por estos motivos, la confiabilidad es un tópico importante que el ingeniero diseñador no debería de ignorar.

Los modelos de confiabilidad se usarán para:

- Ayudar a interpretar la confiabilidad de los componentes para establecer sistemas de riego por goteo más fiables;
- Predecir la confiabilidad de diferentes configuraciones del sistema de riego por goteo;
- Identificar tempranamente los puntos débiles del sistema de riego por goteo de tal manera que se puedan hacer cambios menos costosos;
- Determinar las estrategias de control y mantenimiento. (Tejada, 2005).

Tipos de modelos de confiabilidad.

Existen principalmente tres tipos de modelos de confiabilidad, los cuales son:

a) Modelo de Contar Partes
b) Modelo Combinacional
c) Modelo de Espacio de Estado o Markov

a) Modelo de Contar Partes

El modelo de Contar Partes puede dar una primera aproximación de la confiabilidad en un sistema a través del cálculo de su tasa de falla. En este modelo la falla de cualquier componente provocaría la falla del sistema. La tasa de falla es calculada como la suma de todas las tasas de falla de cada componente o parte. El modelo generalmente provee una estimación adecuada de la confiabilidad, sobre todo para el caso de tarjetas electrónicas o pequeñas computadoras. Sin embargo, el modelo no sería útil si el equipo o sistema presenta algunas características de tolerancia á fallas.

Este modelo de predicción es aplicable durante la fase inicial del proyecto, cuando hay insuficiente información como para estimar la confiabilidad del componente.

La expresión matemática general para el cálculo de la tasa de falla del equipamiento es:

$$\lambda_{EQUIP} = \sum_{i=1}^{n} (N\lambda_g \Pi_Q)_i \quad \text{.....Ecuación 38.}$$

Donde:

- λ_{EQUIP}= tasa de falla total del equipo;
- N= Cantidad de componentes del tipo *i*;
- λ_g= tasa de falla genérica del componente del tipo *i;*
- Π_Q=factor de calidad del componente de tipo *i;*
- N= Diferentes tipos de componentes en el equipo.

b) Modelo Combinacional.

El modelo Combinacional incluye a los modelos llamados "árbol de fallas, árbol de éxitos o diagramas de bloques de confiabilidad". Este modelo puede capturar algunos aspectos de tolerancia de fallas en el sistema, pero no aquellos como la reparación y la reconfiguración del sistema.

Análisis de riesgos con Árboles de Fallos

Los árboles de fallos son una representación lógica de las formas en que el estado de los componentes pueden producir el fallo del sistema. Un paso preliminar para construir los árboles de fallos es el desarrollo de diagramas de bloques de funciones de los sistemas.

Diagramas de bloques de funciones.

La forma más directa de representar los componentes de un sistema y sus interrelaciones es elaborar un diagrama de bloques de funciones. El diagrama de bloques de funciones representa con rectángulos cada uno de los componentes de interés de un sistema y representa vínculos entre los componentes mediante líneas. Los componentes de interés generalmente no son todos los componentes del sistema, sino sólo aquellos que tienen **funciones críticas y una probabilidad significativa de fallar.**

Los vínculos que usualmente se representan son los de secuencia (un componente funciona antes que otro), los de dependencia (se requiere que

funcione un componente para que funcione otro), o los de sustituibilidad (la función de un componente puede ser sustituida por la de otro si el primero falla).

Diagrama de bloques de un sistema de riego por goteo.

Elaboraremos el diagrama de bloques de funciones del sistema de riego por goteo del ex lago de Texcoco, en el que los componentes de interés son la captación, la electricidad, el cárcamo de bombeo y, el control y operación. El sistema de riego por goteo cuenta un sistema de captación (canal Texcoco Norte), un sistema eléctrico (transformador 500 KVA), tres bombas en el cárcamo de bombeo si una de ellas deja de funcionar es posible que el sistema siga funcionando con dos y, para el control y operación se requiere de un profesional, un oficial fontanero y dos auxiliares en bomba, cualquiera de los cuales puede operar el sistema. El diagrama de funciones para este sistema se presenta en la Fig. 32.

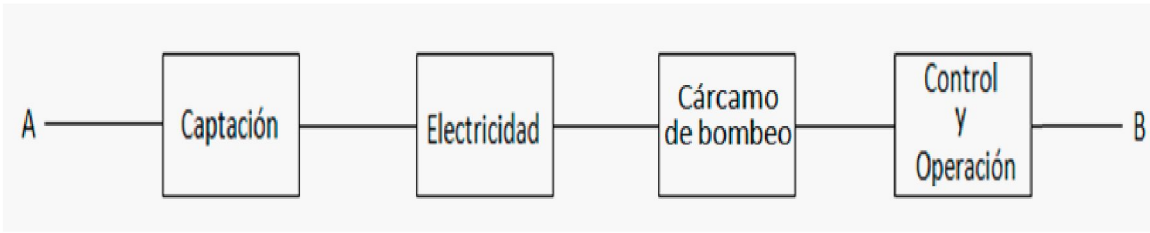


Fig. 32. Diagrama de bloques de funciones del sistema hidráulico de riego por goteo del ex lago de Texcoco.

Nótese que el sistema está diseñado de tal manera que si un subsistema falla el sistema no opera.

En los diagramas siguientes los componentes que pueden sustituir la función de otros están representados como elementos en paralelo y los subsistemas que se requiere que estén funcionando juntos para la operación del sistema están representados como elementos en serie. (Tejada, 2005).

Este diagrama en particular puede interpretarse como un circuito eléctrico en el que se requiere que la corriente fluya desde el punto A hasta el punto B. Mientras haya una ruta no interrumpida, esto es, con componentes funcionando, entre A y B, el sistema funcionará.

En la fig. 33, 34 y 35, se representan los subsistemas de Captación, electricidad y cárcamo de bombeo.

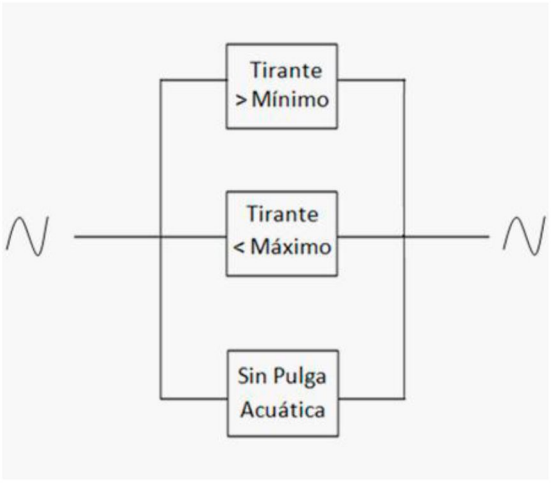


Fig. 33. Diagrama de bloque del sistema de captación.

El subsistema de captación está diseñado en una forma paralela lo cual nos permite conocer los factores que pueden ocurrir para su correcto funcionamiento.

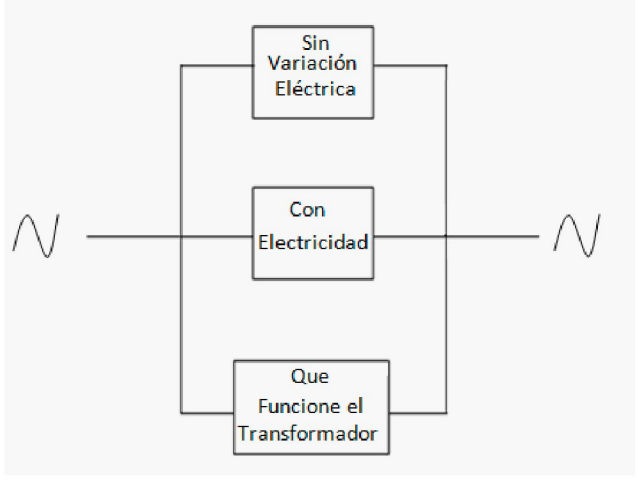


Fig. 34. Diagrama de bloque del sistema eléctrico.

El subsistema eléctrico está diseñado en forma paralela de tal manera que pueden presentarse cualquiera de las tres posibilidades expuesta en la figura 40.

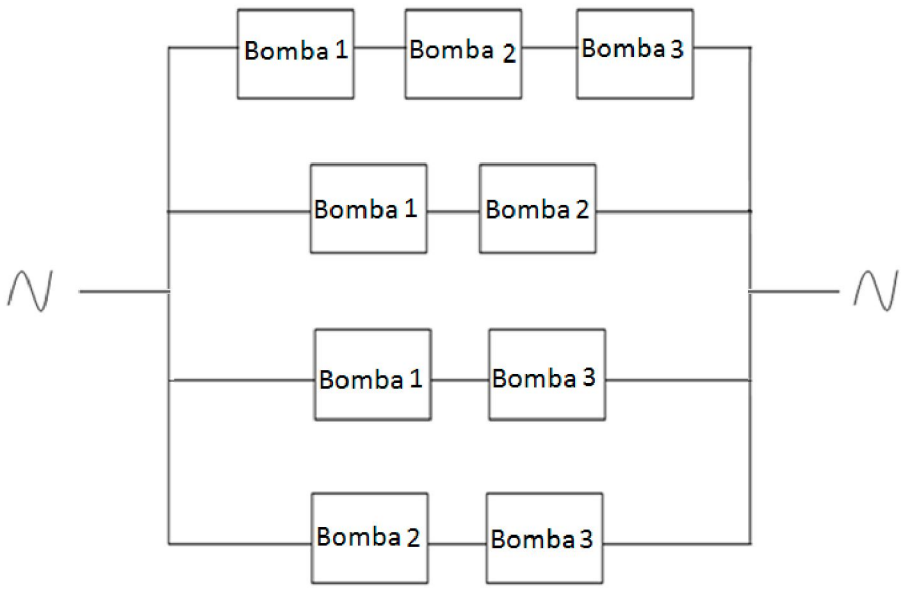


Fig. 35. Diagrama de bloque del sistema del cárcamo de bombeo.

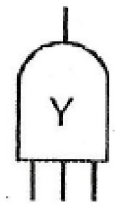
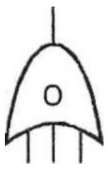
El subsistema cárcamo de bombeo está diseñado de tal manera que si deja de funcionar una de las bombas el sistema sigue funcionando y podemos observar las posibles combinaciones que se pueden presentar.

Componentes y lógica de los árboles de fallos representan un tipo particular de evento incierto: el fallo o funcionamiento de un sistema y sus componentes. El árbol de fallos representa la manera en que se relacionan lógicamente los fallos de los componentes con los fallos del sistema. Otra característica de los árboles de fallos es que los eventos representados son dicotómicos, esto es, tienen sólo dos posibles resultados: fallo o no fallo. (Ley, 2006)

Los árboles de fallos pueden construirse con cuatro símbolos básicos Tabla 24.

Tabla 24. Representa los cuatro símbolos utilizados para la construcción de árboles de fallos

	Evento simple. Este es el fallo de un componente simple que no está formado por otros componentes de interés.
	Evento Intermedio. Este es un evento que ocurre como consecuencia del fallo de uno o más eventos antecedentes. El fallo de un evento intermedio está definido por una o más compuertas lógicas.

	Compuerta lógica Y. Esta compuerta da como resultado un fallo si fallan todos los eventos que lo anteceden directamente. Los eventos antecedentes están conectados a la parte inferior de la compuerta y el evento resultante está conectado a la parte superior de la compuerta.
	Compuerta lógica O. Esta compuerta da como resultado un fallo si uno o más de los eventos que lo anteceden directamente fallan. Los eventos antecedentes están conectados a la parte inferior de la compuerta y el evento resultante está conectado a la parte superior de la compuerta.

Fuente: Análisis de incertidumbre y riesgo para la tomas de decisiones.

En la representación de las compuertas lógicas $Y\ y\ O$, frecuentemente se omite la letra dentro del símbolo.

Para facilitar la descripción de los sistemas se pueden utilizar símbolos adicionales que incluyen eventos condicionantes, eventos externos, compuerta O exclusiva, compuerta Y con prioridad, compuerta "k eventos de n" y compuerta de inhibición (Modarres 1993), pero los símbolos básicos sirven para representar una gran variedad de situaciones.

Cada árbol de fallos se construye para representar el fallo de un solo evento de interés; el fallo de este evento se representará con la letra F (los autores de habla inglesa representan este fallo con la letra T por "top event"). Para construir el árbol de fallos se parte del suceso F y se pregunta qué fallos de subsistemas o componentes se requieren para que suceda F, así como que relación se debe cumplir entre esos fallos.

F representa el suceso del sistema de riego a que falle (no hay riego) y, en base a la descripción que se dio del problema, el sistema de riego fallará si falla el subsistema de captación, si falla el subsistema de electricidad, si falla el subsistema de cárcamo de bombeo o si falla el subsistema de control y operación. Así pues, iniciamos el árbol (que se dibuja habitualmente de arriba a abajo) definiendo el evento de interés F como un evento intermedio cuyo suceso (falla o no falla), está dado por una compuerta O (dado que el sistema de riego falla si uno cualquiera de esos subsistemas falla), a la que están conectados los eventos de cada uno de los cuatro subsistemas mencionados. La parte superior del diagrama sería la mostrada en la fig. 36.

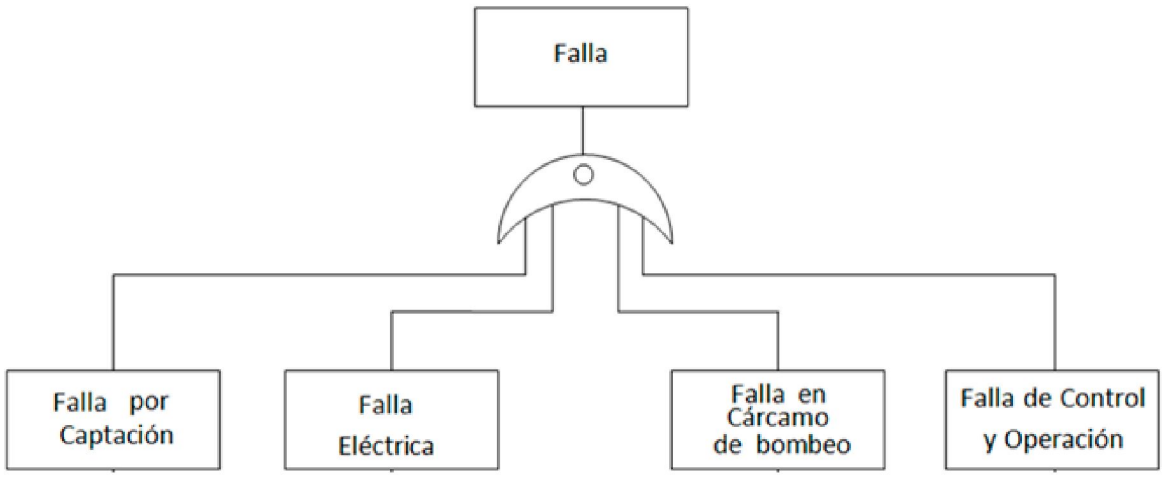


Fig. 36. Inicio del árbol de fallos para el sistema de riego

Árbol de fallos del sistema de riego por goteo.

Se identificó que si falla uno (o más) de los cuatro subsistemas, el sistema falla. Analizaremos ahora las condiciones para que falle cada subsistema.

El subsistema de captación falla cuando hay presencia de pulga acuática, si el tirante es menor a 30cm o si el tirante es mayor al bordo del canal, por lo tanto el fallo de ese sistema es representado por una compuerta lógica Y. El sistema puede fallar si no hay electricidad, si se presenta variación eléctrica o que el transformador no funcione. Similarmente, se determinó que el sistema de riego por goteo puede operar si dos bombas funcionan, por lo tanto para que el subsistema de cárcamo de bombeo falle se requiere el fallo de dos o tres bombas; nuevamente se usará una compuerta Y para representar el fallo de este sistema.; y por último el sistema puede fallar en control y operación si no hay mantenimiento preventivo al equipo, si no se checan lecturas, si no es una gente capacitada, etcétera; una compuerta Y para representar el fallo de este subsistema. El árbol de fallas completo se presenta en la fig. 37.

En la Figura 37 los círculos representan los componentes elementales y se usa la letra D para la Captación, E para la electricidad, A para el cárcamo de bombeo y C para el control y operación. El hecho que la identificación de los componentes esté subrayada se refiere a que el círculo representa la falla de ese componente.

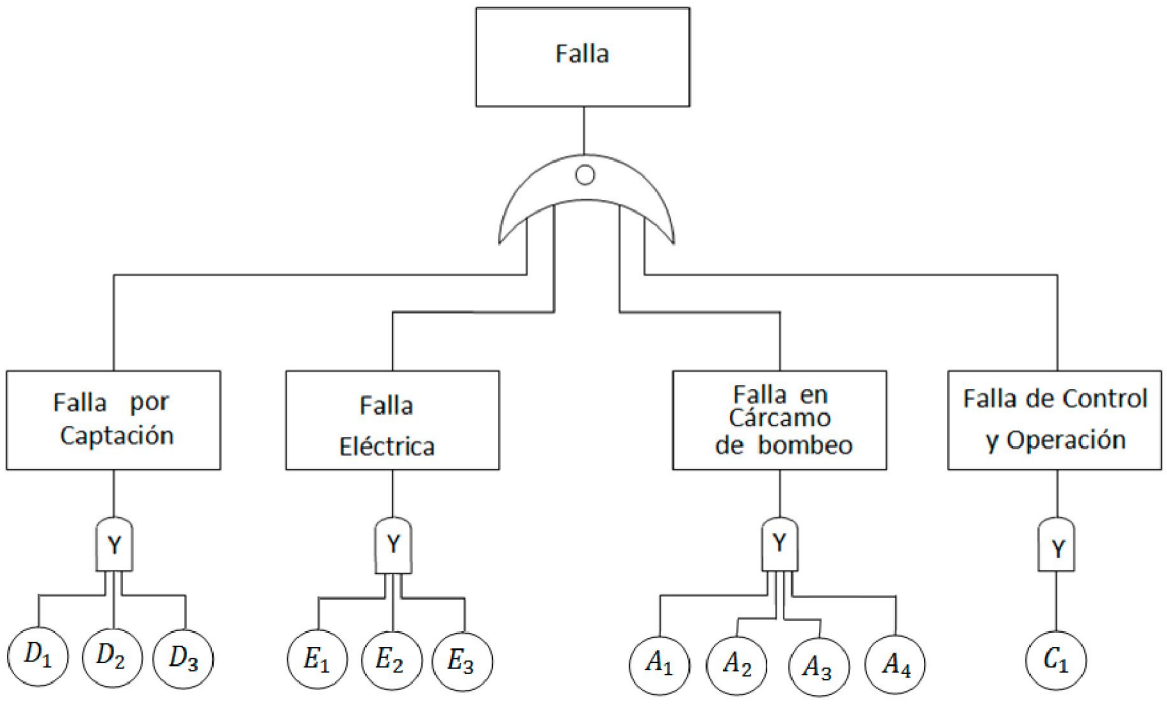


Fig. 37. Árbol de fallas del sistema hidráulico de riego por goteo del ex lago de Texcoco.

Donde:

- D_1 =Tirante mínimo.
- D_2 =Tiranta máximo.
- D_3 = Pulga Acuática.
- E_1 =Sin energía eléctrica.
- E_2 =Con variación eléctrica.
- E_3 =No funciona el transformador.
- A_1 =Bomba 1, 2 y 3.
- A_2 =Bomba 1 y 2.
- A_3 =Bomba 1 y 3.
- A_4 =Bomba 2 y 3.
- C_1 =Control y Operación.

Árboles de éxitos; tiene la misma estructura lógica que los árboles de fallas y la única diferencia es que el evento de interés es el éxito del sistema, su funcionamiento adecuado, en lugar del fallo del mismo. Cambia el propósito de la modelación pero la herramienta de modelación es la misma. (Ley, 2006).

Dualidad árboles de fallos - árboles de éxitos

La estrecha relación entre árboles de fallos y árboles de éxitos se refleja en que el árbol de éxitos de un evento puede obtenerse al transformar el árbol de fallos que representa el fallo del mismo evento mediante el cambio de cada evento de fallo por su correspondiente éxito y sustituyendo cada compuerta lógica Y por una compuerta lógica y viceversa.

c) Modelo de Espacio de Estado o de Markov

Está basado en un modelo de espacio de estado, donde las transiciones entre cada estado se basa en probabilidades, el cual puede capturar muchas características importantes de tolerancia de fallas del sistema que otros no podrían. El modelo es útil para calcular la disponibilidad en sistemas complejos.

Disponibilidad

Disponibilidad es la probabilidad que el sistema funcione durante un período de tiempo especificado. El término de "largo plazo" (estado constante), de la función de disponibilidad es la fracción del tiempo durante la cual el sistema está disponible o en funcionamiento; este período de tiempo, se muestra como la zona constante de la curva de disponibilidad de la figura 38.

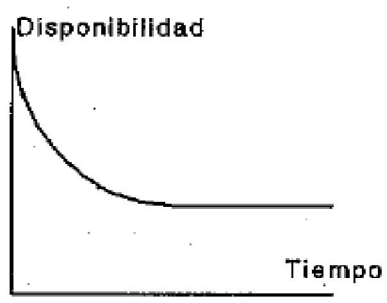


Fig. 38. Curva de disponibilidad.

El cálculo de disponibilidad se torna más importante que el de confiabilidad en los sistemas donde es necesario entregar servicio casi ininterrumpidamente, como por ejemplo, Suministro de agua potable a la ciudad de México. (Tejada, 2005).

Los cálculos de confiabilidad terminan cuando el sistema falla, mientras que los de disponibilidad continúan debido que el sistema es reparado para nuevamente estar disponible; el modelo de Markov es una excelente herramienta para evaluar la disponibilidad en sistemas complejos. Para la mayoría de sistemas, la disponibilidad puede ser calculada en función del *Mean Time Between Failures* (MTBF, Tiempo Medio entre Fallas) y del *Mean Time to Repair* (MTTR, Tiempo Medio de Reparación) utilizando la fórmula siguiente. [Ramakumar, 1993], [Reibman y Veeraraghavam, 1991].

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad \text{.....Ecuación 39.}$$

CAPITULO 5 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO.

Procesamiento de Datos del sistema de riego por goteo.

Se calculará la confiabilidad del sistema, sobre la base de modelos combinacionales.

La figura 39 muestra el diseño del sistema a estudiar, el cual consiste en cuatro grandes subsistemas:

- Subsistema de captación,
- Subsistema eléctrico,
- Subsistema de cárcamo de bombeo,
- Subsistema de control y operación.

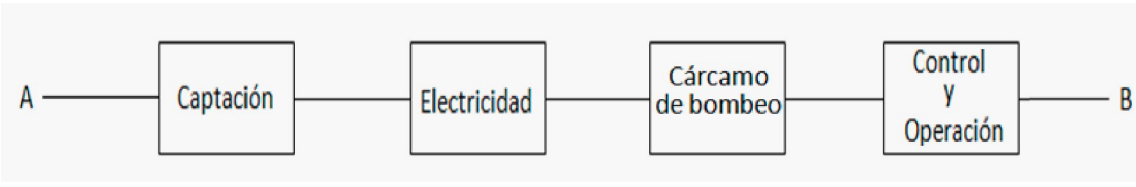


Fig. 39. Diagrama de bloques de funciones del sistema hidráulico de riego por goteo del ex lago de Texcoco.

Al analizar el funcionamiento del sistema de riego se imponen las siguientes condiciones:

- Calidad de agua de riego (aguas negras).
- Subsistema de captación si uno de los tres factores $(D_1,\ D_2,\ \acute{o}\ D_3)$ se presenta dentro del funcionamiento, el sistema se declara inoperable.
- Subsistema eléctrico si uno de los tres factores $(E_1,\ E_2\ \acute{o}\ E_3)$ asignados se presenta dentro del funcionamiento, el sistema se declara inoperable.
- Subsistema del cárcamo de bombeo, si dos de las tres bombas fallan, el sistema se declara inoperable.
- Subsistema de control y operación, si no hay mantenimiento preventivo, si no hay revisión de presiones o si el operador no está capacitado, el sistema no opera.

La tabla 25 muestra la confiabilidad de las componentes los cuales fueron asignadas por la coordinación de CONAGUA encargado de la operación, Control y mantenimiento del sistema de riego por goteo para 600ha, así como de la revisión de bitácora existente de 2008 (Anexo D), la cual fue insuficiente para su

modelación estocástica, por lo que se recurrió a una serie de entrevistas a los trabajadores del lugar.

Tabla 25 Confiabilidad de los componentes.

Componentes del sistema	Confiabilidad
Tirante <30cm.	80%
Tirante >Bordo.	90%
Sin pulga acuática en el canal.	80%
Energía eléctrica.	80%
Sin variación eléctrica.	80%
Transformador 500 Kva.	85%
Bomba 1.	80%
Bomba 2.	80%
Bomba 3.	85%
Control y operación.	95%

Cálculo de la Confiabilidad a través de circuitos combinacionales

Para nuestro análisis se asumirá que:

- Los componentes tienen una tasa de falla constante.
- Todos los componentes fallan independientemente;
- Los equipos no son reparados durante las horas de riego;
- Todos los enlaces son totalmente confiables.

Cálculo de la confiabilidad de los subsistemas.

a) Análisis de la confiabilidad del subsistema de captación.

La confiabilidad de la tabla 26 fue asignada por la coordinación de CONAGUA encargada de la operación, Control y mantenimiento del sistema de riego por goteo, de la revisión de bitácora existente 2008 y de entrevista a los trabajadores del lugar.

Tabla 26. Confiabilidad de los componentes del sistema de captación.

Componentes del sistema	Confiabilidad
Tirante <30cm.	80%
Tirante >Bordo.	90%
Sin pulga acuática en el canal.	80%

Se observó que la captación es un subsistema muy importante para el sistema de riego por goteo, ya que si el tirante es menor a 30 cm en el canal de llamada, el sistema falla; si el tirante rebaza el bordo del canal el sistema deja de operar o si hay presencia de pulga falla el sistema. En la figura 40 y 41 se observa el diagrama de bloques y el diagrama con su confiabilidad.

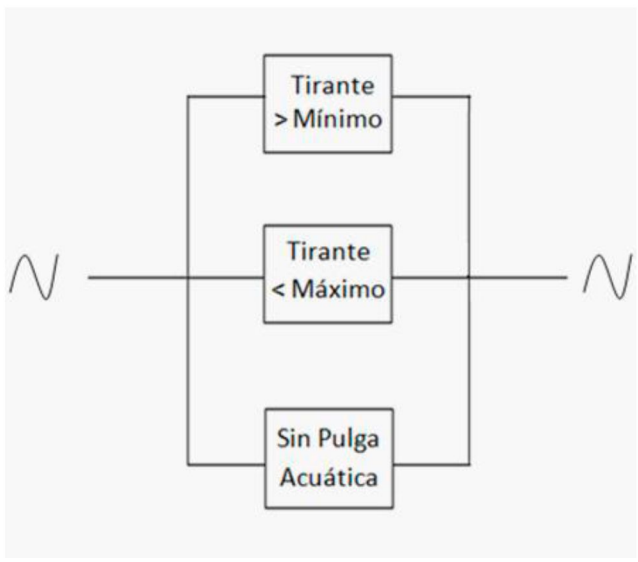


Fig. 40. Diagrama de bloque del sistema de captación.

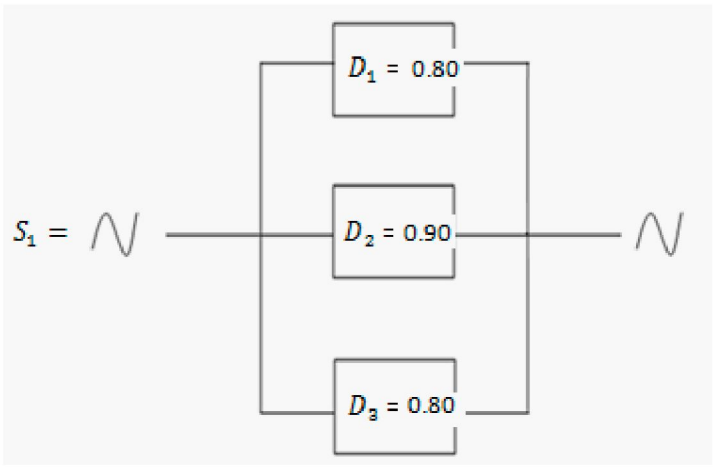


Fig. 41. Diagrama de bloque del sistema de captación con su confiabilidad asignada.

Donde:

- S_1 = Diagrama de bloque del sistema de captación.
- D_1 =Tirante mínimo.
- D_2 =Tiranta máximo.
- D_3 = Pulga Acuática.

Calculo de S_1.

$$P(S_1) = P(D_1 \cup D_2 \cup D_3)$$

$$P(S_1) = 1 - \prod_{i=1}^{3} P(D_i^C)$$

$$P(S_1) = 1 - P(D_1^C \cap D_2^C \cap D_3^C)$$

$$P(S_1) = 1\text{-}(0.20)\ (0.10)\ (0.20)$$

$$P(S_1) = 1\text{-}0.004 = 0.996$$

La confiabilidad del sistema de captación es del 99.60%

b) Análisis de la confiabilidad del subsistema eléctrico.

La confiabilidad de la tabla 27 fue asignada por la coordinación de CONAGUA encargada de la operación, control y mantenimiento del sistema de riego por goteo, de la revisión de bitácora existente 2008 y de entrevista a los trabajadores del lugar.

Tabla 27. Confiabilidad de los componentes del sistema eléctrico.

Componentes del sistema	Confiabilidad
Energía eléctrica.	80%
Sin variación eléctrica.	80%
Transformador 500 Kva.	85%

El subsistema eléctrico es una parte vital para el sistema de riego por goteo, ya que si hay variación eléctrica, no hay energía eléctrica, o en dado caso si el

trasformador no funciona el sistema deja de operar y falla el sistema. En la figura 42 y 43 se observa el diagrama de bloques y el diagrama con su confiabilidad.

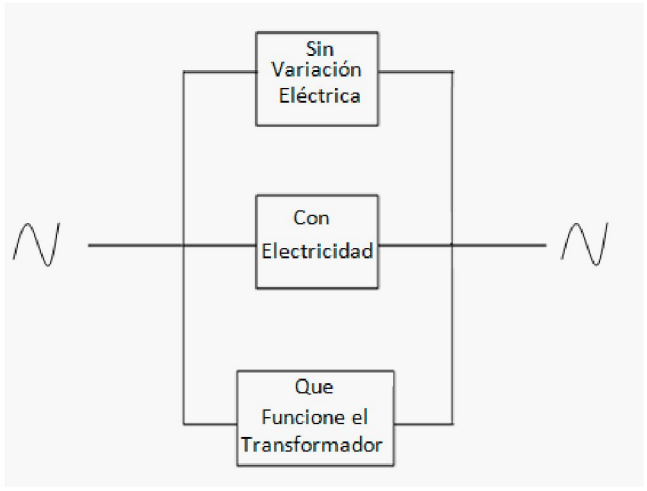


Fig. 42. Diagrama de bloque del sistema eléctrico.

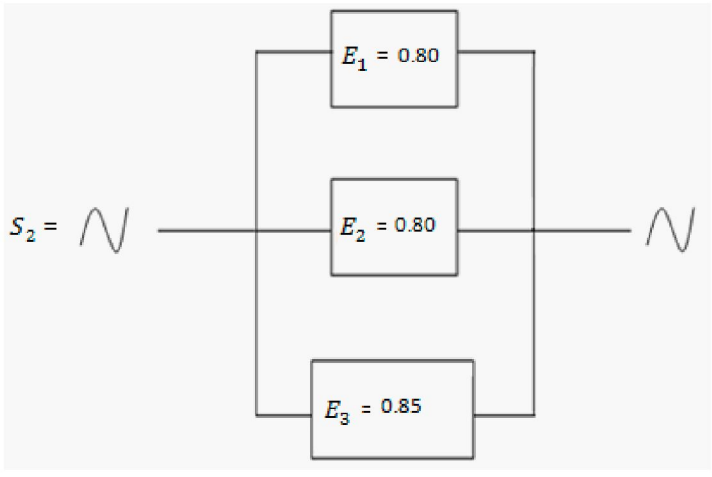


Fig. 43. Diagrama de bloque del sistema eléctrico con su confiabilidad asignada.

Donde:

S_2 = Diagrama de bloque de sistema eléctrico.
E_1 = Con energía eléctrica.
E_2 = Sin variación eléctrica.
E_3 = Funciona el transformador.

Calculo de S_2.

$$P(S_2) = P(E_1 \cup E_2 \cup E_3)$$

$$P(S_2) = 1 - \prod_{i=1}^{3} P(E_i^c)$$

$$P(S_2) = 1 - P(E_1^C \cap E_2^C \cap E_3^C)$$

$P(S_2)$ = 1-(0.20) (0.20) (0.15)

$P(S_2)$ =1-0.006=0.994

La confiabilidad del sistema eléctrico es del 99.40%

c) Análisis de la confiabilidad del sistema del cárcamo de bombeo.

La confiabilidad de la tabla 28 fue asignada por la coordinación de CONAGUA encargada de la operación, control y mantenimiento del sistema de riego por goteo, de la revisión de bitácora existente 2008 y de entrevista a los trabajadores del lugar.

Tabla 28. Confiabilidad del sistema del cárcamo de bombeo:

Componentes del sistema	Confiabilidad
1) Bomba 40 HP	80%
2) Bomba 100 HP	80%
3) Bomba 125 HP	85%

El subsistema cárcamo de bombeo aloja 3 bombas, una de 40 Hp, otra bomba de 100 Hp y una última de 140Hp, las cuales funcionan en conjunto, el sistema puede fallar si por lo menos dejan de funcionar dos o las tres en un caso extraordinario.

El diagrama en la figuras 44 muestra las combinaciones probables que pueden ocurrir en el subsistema cárcamo de bombeo y el diagrama de la figura 45, muestra la confiabilidad de cada componente del subsistema, así como los sistemas en serie que se presentan, con una letra A.

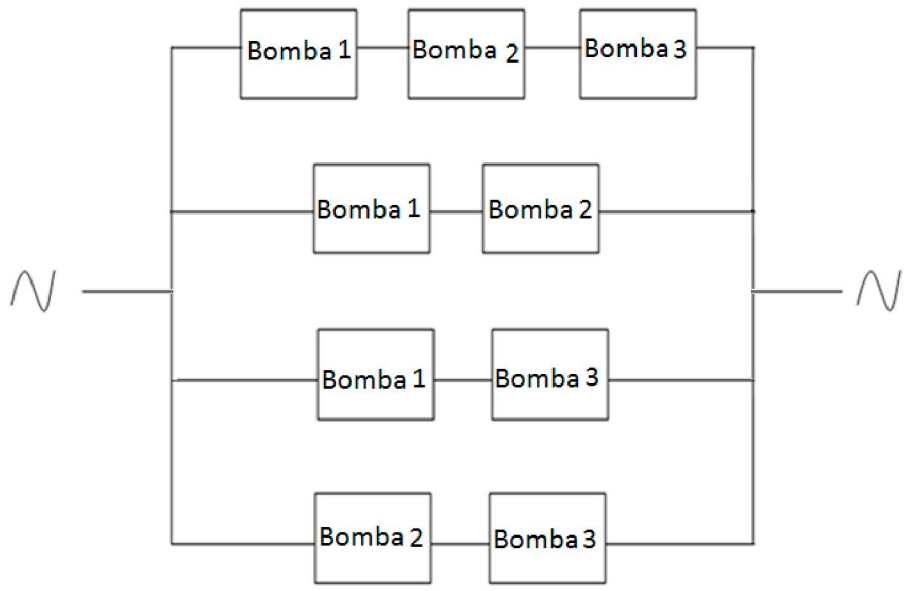


Fig. 44. Diagrama de bloque del sistema del cárcamo de bombeo.

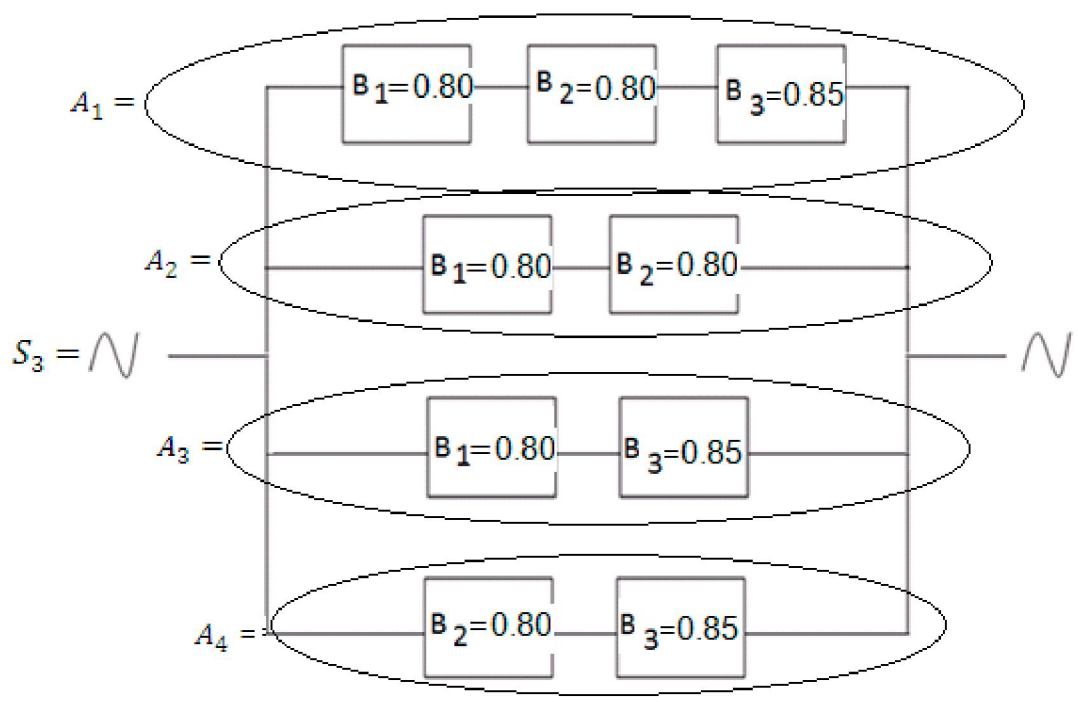


Fig. 45. Diagrama de bloque del sistema del cárcamo de bombeo.

Donde:

$S_3 =$ Diagrama de bloque de sistema eléctrico.
$A_1 =$Bomba 1, 2 y 3.
$A_2 =$Bomba 1 y 2.
$A_3 =$Bomba 1 y 3.
$A_4 =$Bomba 2 y 3.

Cálculo de los sistemas en serie del subsistema cárcamo de bombeo.

Cálculo de la confiabilidad para A_1.

$$P(A_1) = \prod_{i=1}^{3} P(A_i)$$

$$P(A_1) = P(B_1 \cap B_2 \cap B_3)$$

$$P(A_1) = (0.80)\ (0.80)\ (0.85)$$

$$P(A_1) = 0.5400$$

La confiabilidad de A_1 es del 54.00 %

Cálculo de la confiabilidad para A_2.

$$P(A_2) = \prod_{i=1}^{2} P(A_i)$$

$$P(A_2) = P(B_1 \cup B_2)$$

$$P(A_2) = P(B_1^C \cap B_2^C)$$

$$P(A_2) = (0.80)(0.80)$$

$$P(A_2) = 0.6400$$

La confiabilidad de A_2 es del 64.00 %

Cálculo de la confiabilidad para A_3.

$$P(A_3) = \prod_{i=1}^{2} P(A_i)$$

$$A_3 = P(B_1 \cup B_3)$$

$$P(A_3) = (0.80)\ (0.85)$$

$$P(A_3) = 0.6800$$

La confiabilidad de A_3 es del 68.00 %

Cálculo de la confiabilidad para A_4.

$$P(A_3) = \prod_{i=1}^{2} P(A_i)$$

$$A_4 = P(B_2 \cup B_3)$$

$$P(A_4) = P(B_2^C \cap B_3^C)$$

$$P(A_4) = (0.80)\ (0.85)$$

$$P(A_4) = 0.6800$$

La confiabilidad para A_4 es del 68.00 %

Cálculo de la confiabilidad para S_3.

$$S_3 = P(A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4)$$

$$P(S_3) = 1 - \prod_{i=1}^{4} P(A_i^c)$$

$$P(S_3) = 1 - P(A_1^C \cap A_2^C \cap A_3^C \cap A_4^C)$$

$$P(S_3) = 1\text{-}(0.5400)\ (0.6400)\ (0.6800)\ (0.6800)$$

$$P(S_3) = 1\text{-}0.1598 = 0.8402$$

La confiabilidad del cárcamo de bombeo es del 84.02%

d) Análisis de la confiabilidad del sistema de control y mantenimiento.

La confiabilidad de la tabla 29 fue asignada por la coordinación de CONAGUA encargada de la operación, Control y mantenimiento del sistema de riego por goteo, de la revisión de bitácora existente 2008 y de entrevista a los trabajadores del lugar.

Tabla 29 Confiabilidad del sistema de control y mantenimiento.

Subsistema	Confiabilidad
Control y operación	95%

El subsistema de control y operación está a cargo de un profesional, un oficial fontanero, 2 auxiliares en bombeo y dos cabos, los cuales en primera instancia su asignación es revisión visual al equipo y mantenimiento preventivo si lo requiere, al inicio de su operación se debe estabilizar la presión requerida, si no se alcanza lo antes mencionado se procederá a revisar los conductos del sistema de riego hasta encontrar la falla. El oficial, los auxiliares en bombeo, los cabos y 18 ayudantes en temporada de sequia de los cuales se reducen a 9 en temporada de lluvia son los asignados a dar mantenimiento durante todo el año al sistema de riego.

En la figura 45 y 46 se muestra el diagrama de bloque del sistema de control y operación así como el diagrama de confiabilidad asignado. }

Fig. 45. Diagrama de bloque del sistema del cárcamo de bombeo.

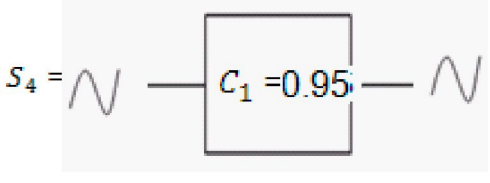


Fig. 46. Diagrama de bloque del subsistema de control y operación asignada.

Donde:

- $C_1 = S_4$ =Control y Operación=0.95

La confiabilidad de S_4 es del 95.00 %

CÁLCULO DE LA CONFIABILIDAD DEL SISTEMA

Ya obtenidos los valores de S_1, S_2, S_3 y S_4 de los subsistemas de captación, eléctrico, cárcamo de bombeo y, control y operación se procede a obtener S que será la confiabilidad de todo el sistema, la tabla 30, muestra las confiabilidades obtenidas.

Tabla 30. Valores obtenidos en los subsistemas captación, electricidad, cárcamo de bombeo y, control y operación.

Subsistemas	Confiabilidad
S_1	99.60%
S_2	99.40%
S_3	84.02%
S_4	95.00%

La figura 47, muestra el diagrama de bloques del sistema de riego por goteo propuesto en el cual se le han agregado las confiabilidades de acuerdo a los valores obtenidos de cada subsistema:

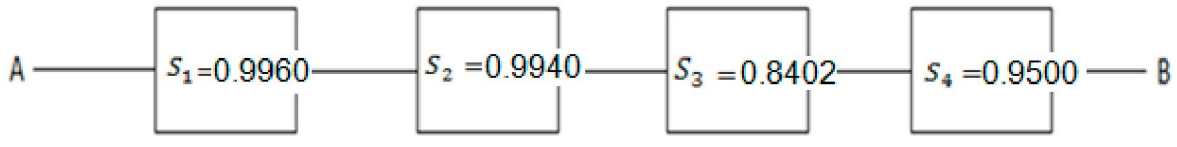


Fig. 47. Diagrama de bloques de funciones del sistema hidráulico con nomenclatura.

Donde:

S = Sistema
S_1 = Subsistema de captación
S_2 = Subsistema eléctrico.
S_3 = Subsistema cárcamo de bombeo.
S_4 = Subsistema de control y operación.

Calculo de Sistema de riego por goteo.

$$P(S) = \prod_{i=1}^{4} P(S_i)$$

$$P(S) = P(S_1 \cap S_2 \cap S_3 \cap S_4)$$

$$P(S) = (0.9960)\ (0.9940)\ (0.8402)\ (0.950000)$$

$$P(S) = 0.7902$$

La confiabilidad del sistema de riego por goteo es de 79.02% ≈ 80.00%.

Aproximadamente la confiabilidad del sistema de riego por goteo del ex lago de Texcoco de pastizales y árboles Tamarix es del **80%.**

CONCLUSIONES.

En el caso del Lago de Texcoco en los años 70, parte de los efectos inmediatos a la desecación que quedó al descubierto un amplio lecho salitroso que combinado con la materia orgánica de las recargas residuales de los ríos Churubusco y la de la Compañía, representa un foco de insalubridad para los habitantes de la región en tiempo de estiaje, cuando tiene lugar los vientos rasantes, que daban origen a las llamadas tolvaneras que invadían la ciudad, provocando enfermedades respiratorias y estomacales.

CONAGUA aprobó en el año 1999 el Fideicomiso Ambiental 1490, un sistema de riego por goteo para mitigar las tolveras con plantaciones de árboles de Tamarix y pastizales

El diseño ejecutivo de las zonas de riego, seleccionó 569 ha en la margen izquierda del Canal Texcoco Norte (un rectángulo de 5,667.33 m. de longitud x 1,004.00 m. de ancho), y 139 ha en la margen derecha, con una figura trapezoidal, incluyendo seis hectáreas vecinas de la carretera de cuota Peñón-Texcoco. Lo anterior hace una superficie total de 708 hectáreas que serian regadas con aguas tratadas provenientes del lago artificial Nabor Carrillo. En el año 2000 se concluyen los trabajos de instalación de todos los componentes del sistema de riego, solo 600 Ha de 708 Ha del proyecto.

Actualmente el sistema de riego por goteo utiliza aguas residuales provenientes del canal Texcoco Norte, con lo cual se ha logrado restaurar 520 Ha de 600 Ha, pasando de zonas áridas a zonas verdes, así como la repoblación de fauna a la zona.

- Mediante la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en nuestro caso de estudio, con datos proporcionados por la coordinación de CONAGUA, se logró la localización del área espacial de la zona federal, de las subcuencas del valle de México, de las zonas hidrológicas, de los cuerpos de agua, de la topografía y de la identificación de el área donde opera el sistema de riego.

En lo referente a la confiabilidad del sistema se concluye lo siguiente:

- La información de bitácoras y registros del sistema son una parte esencial para los cálculos de los análisis de confiabilidad; en nuestro estudio se encontró una escasa información al respecto del sistema de riego por goteo, por lo cual se recurrió a la información proporcionada por la coordinación de CONAGUA encargada del control, operación y mantenimiento del sistema, así como a la entrevista de los integrantes

encargados de el funcionamiento, para la asignación de la confiabilidad a los componente, provocando una deficiencia al estudio.

- El resultado del cálculo de la confiabilidad del sistema hipotético a través de modelos probabilísticos y de lógica combinacional, arrojan como resultado una confiabilidad aproximada de 80% la cual resulto equiparable con otros estudios en los cuales suponen que el porcentaje aproximado de un sistema de riego por goteo en buen funcionamiento para aguas residuales es de 85 %.

- El trabajar con aguas residuales trae consigo elementos agresivos como limos y arenas que dañan los conductos de acero, la presencia de pulga acuática deja sin operación al sistema y se tiene que hacer retrolavado ya que los filtros se ven afectados, así como también la presencia de impurezas tapan los conductos y goteros, dando como resultado una baja la confiabilidad de los componentes del sistema. Nótese que CONAGUA encargada del control, Operación Mantenimiento del sistema de riego no cuenta con estudios de estas aguas residuales utilizadas, pudiendo ser en los elementos agresivos arenas, limos u otro tipo de arcilla y en cuanto a la presencia de microorganismos se puede presentar pulga acuática y microorganismos naturales como Protozoos forma de nata.

- El subsistema que mostró menor confiabilidad es el cárcamo de bombeo ya que en su bomba de 45 Hp y su bomba de100 Hp son las que fallan más a lo largo de un periodo de 9 meses de sequia y 3 de lluvia.

- De estos resultados puede deducirse que la mayor frecuencia de paro del sistema de riego ocurre cuando fallan 2 de las 3 bombas del subsistema del cárcamo de bombeo, entonces para mejorar la confiabilidad del sistema, se puede optar entre las recomendaciones siguientes:

RECOMENDACIONES

- A través de este estudio, se está sugiriendo a los ingenieros y diseñadores del sistema hidráulico de riego por goteo no perder de vista, el importante tópico de confiabilidad en el desarrollo, diseño, operación, control y mantenimiento del mismo. Se presenta un procedimiento para su cálculo. El desarrollo teórico de cada etapa que la sustenta la cual puede ser una guía para abordar problemas similares o más complejos.

- Incrementar algunos componentes es una aproximación común para mejorar la confiabilidad, de esta manera podríamos agregar una bomba en paralelo en el subsistema del cárcamo de bombeo, ésto, en dado caso de que dos de las tres bombas dejaran de funcionar la cuarta entraría en funcionamiento.

- Hacer estudios de aguas residuales utilizadas en el sistema de riego por goteo, traería beneficios, para determinar los tipos de arcillas, arenas y microorganismos que afectan al desempeño del cárcamo de bombeo, de los conductos y de los goteros.

- La implementación de una planta tratadora de aguas residuales reduciría la aparición de pulga acuática en el canal, así como la reducción de taponamiento de los conductos del sistema y sus goteros.

- Para aumentar la confiabilidad significativamente del sistema eléctrico, se propone instalar en paralelo un generador de energía eléctrica de combustión interna que entraría en funcionamiento en el caso de falla de éste.

- Y finalmente consideramos que contar con una automatización del sistema permitiría que su funcionamiento sea oportuna y altamente confiable, anticipando las posibles fallas de las componentes y diversas partes del sistema; permitiría modelar las probabilidades de las variables y eventos de interés relevantes, así como establecer los programas de mantenimiento, reemplazamiento, control, actualización y rediseño del sistema, que daría como resultado una confiabilidad y una seguridad adecuada en el sistema de riego por goteo de pastizales y árboles Tamarix, fundamentales en la reforestación y restauración de la zona federal del Ex Lago de Texcoco.

ANEXOS

Anexo A.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO DEL EX LAGO DE TEXCOCO.

Características de la zona de riego.

Dentro del área señalada se seleccionó 569 ha en la margen izquierda del Canal Texcoco Norte (un rectángulo de 5,667.33 m. de longitud x 1,004.00 m. de ancho, y 139 ha en la margen derecha, con una figura trapezoidal, incluyendo seis hectáreas vecinas de la carretera de cuota Peñón-Texcoco. Lo anterior hace una superficie total 708 hectáreas. (Huesca, 1999).

La zona de proyecto está dividida en 3 áreas, a regarse cada una de ellas mediante su propio equipo de bombeo:

- Zona I DE 139 ha.
- Zona II DE 277 ha.
- Zona III DE 292 ha.

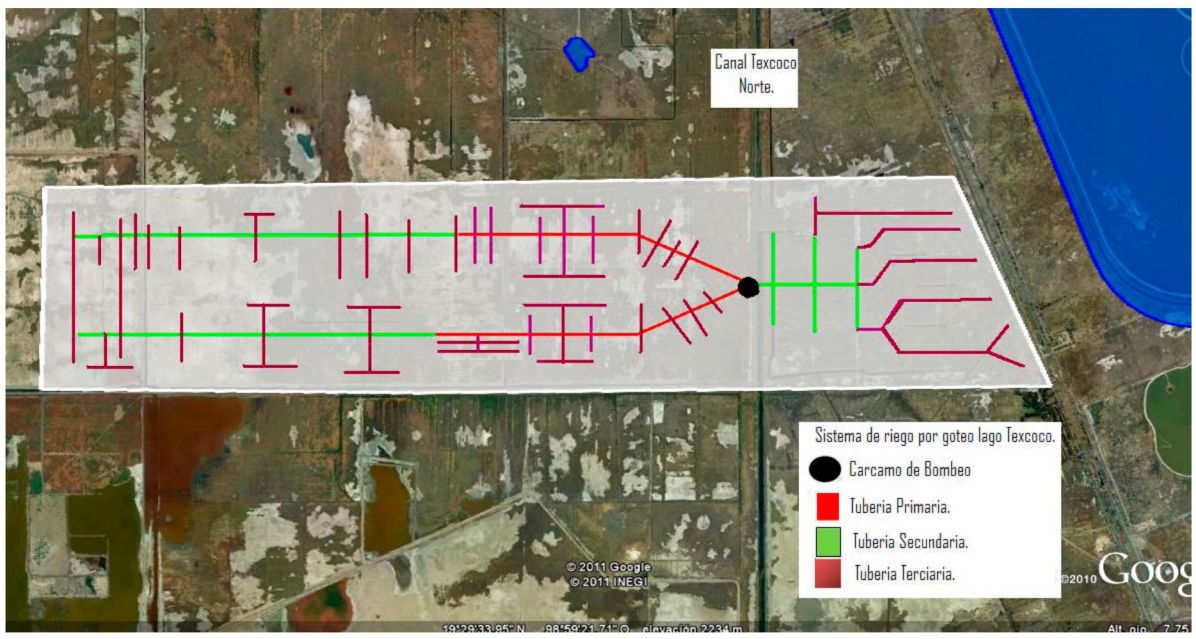


Fig. A1. Sistema de riego por goteo de la zona del ex lago de Texcoco.

Material de las tuberías principales, secundarias y regantes.

El material son; líneas principales y secundarias son de PVC por sus características de flexibilidad, ligereza, facilidad de instalación, hermetismo, resistencia a agentes externos, coeficiente mínimo de rugosidad, vida útil prolongada y costo razonable.

Las líneas regantes (superficiales) son de manguera de polietileno de alta densidad, preparada químicamente para resistir los rayos ultravioleta solares.

Cantidades de goteros y manguera por ha.

Goteros:

Uno para cada árbol de Tamarix plantado en cuadricula de 2 x 3 m. La cantidad es 50 x 33.33 = 1,666.5 goteros / ha, de tipo desmontables, de 4 lph.

Considerando una separación de 3 m. Entre mangueras, la longitud de estas es de 100 / 3 = 33.3333 x 100 = 3,333.33 m/ha. = 16.67 rollos de 200 m/ha. (Huesca, 1999).

Gastos de diseño en cada zona.

Se aplicado el programa "wcadi" para las tres zonas:

Zona I para 124 ha de riego: 54 lps

Cabezal de control central y secundario:

Motobomba horizontal de 4 x 6", 13 mod.. 13 x 4ME40G, 40 HP.	1 lote
Filtro automático "amiad" ebs 12" 130 micrón	1 pza.
Inyector vénturi 2c/bomba 5 hp	1 pza.
Válvulas presión remota 4", 3" y 2"	23pzas.
Pzas. Especiales, válvulas, conexiones y accesorios.	1 lote

Línea principal:

Considerando que las pérdidas de carga en esta línea <35mt., la clase de las tuberías C - 3.5

Tubería de pvc de 10" C-3.5:	240.00 m
Tubería de pvc de 8" C-3.5:	190.00 m
Pzas. Especiales, válvulas, conexiones y accesorios.	1 lote

Líneas secundarias:

Tubería de pvc de 160 mm (6")	1,786.00 m
Tubería de pvc de 4" rd-51:	2,736.00 m
Tubería de pvc de 3" rd-51:	4,654.00 m
Tubería de pvc de 2" rd-51	4,700.00 m
Pzas. Especiales, válvulas, conexiones y accesorios.	1 lote

Líneas regantes y goteros:

Rollos de manguera p. a. d. 13.8 mm (200 m/rollo)	2,067.08	Piezas
Goteros tipo "nestos" desmontables 4 lph	206,652.20	Piezas
Accesorios	1	lote

Zona II para 257 ha. de riego: 110 lps.

Cabezal de control central y secundario:

Equipo bombeo eléctrico vertical mod. H623 30 de 100 hp	1 lote
Filtro automático "amiad" ebs 12" 130 micrón	1 pza.
Inyector vénturi 2c/bomba 5 hp	1 pza.
Válvulas presión remota 4", 3" y 2"	23pzas.
Pzas. Especiales, válvulas, conexiones y accesorios.	1 lote

Línea principal:

Tubería de pvc de 12" c-5	2,850.00 m
Tubería de pvc de 10" c-5	1,964.00 m
Tubería de pvc de 8" c-5	865.00 m
Pzas. Especiales, válvulas, conexiones y accesorios.	1 lote

Líneas secundarias:

Tubería de pvc de 6" c-5	674.00 m
Tubería de pvc de 4" rd-51	5,800.00 m
Tubería de pvc de 3" rd-51	6,294.00 m
Pzas. Especiales, válvulas, conexiones y accesorios.	1 lote

Líneas regantes y goteros:

Rollos de manguera p. a. d. 13.8 mm (200 m/rollo)	4,284.20	Piezas
Goteros tipo “nestos” desmontables 4 lph	428,290.50	Piezas
Accesorios	1	lote

Zona III para 286 ha. De riego: 129 lps.

Cabezal de control central y secundario:

Equipo bombeo eléctrico vertical mod. H623 30 de 125 hp	1 lote
Filtro automático “amiad” ebs 12” 130 micrón	1 pza.
Inyector vénturi 2c/bomba 5 hp	1 pza.
Válvulas presión remota 4”, 3” y 2”	21pzas.
Pzas. Especiales, válvulas, conexiones y accesorios.	1 lote

Línea principal:

Tubería de pvc de 12” c-5	2,452.00 m
Tubería de pvc de 10” c-5	2,362.00 m
Tubería de pvc de 8” c-5	865.00 m
Pzas. Especiales, válvulas, conexiones y accesorios.	1 lote

Líneas secundarias:

Tubería de pvc de 6” c-5	2,128.00 m
Tubería de pvc de 4” rd-51	6,130.00 m
Tubería de pvc de 3” rd-51	4,963.00 m
Pzas. Especiales, válvulas, conexiones y accesorios.	1 lote

Líneas regantes y goteros:

Rollos de manguera p. a. d. 13.8 mm (200 m/rollo)	4,769.05	Piezas
Goteros tipo “nestos” desmontables 4 lph	476,619.00	Piezas
Accesorios	1	lote

Es importante anotar, que la clase resultante de diseño en las tuberías secundarias de 2", 3" y 4" para las 3 zonas del proyecto, fue de rd-64; sin embargo, debido a que esa tubería no tiene empaque (va acoplada con pegamento), se eligió la clase rd-51 que sí tiene empaque.

Para cada una de las 3 zonas, se cuenta con un equipo eléctrico de bombeo, los cuales están ubicados en la misma área y protegidos por una caseta de 10 mt. X 10 mt., al igual que todos los accesorios como filtros, inyectores de fertilizantes, válvulas de mariposa, depósitos de fertiirrigación, etc.

Captación, cárcamo de bombeo, caseta de protección.

El área es abastecida por aguas negras provenientes del río Churubusco y la Compañía durante 11 meses, y solo un mes en la temporada de lluvia por el Lago Nabor Carrillo a través del Canal Texcoco Norte. Tiene una planta de bombeo en la margen izquierda, con 3 equipos eléctricos; uno de 40 HP, para la zona I ubicada en la M.D ; uno más de 100 HP para la zona II y un tercero de 125 hp *para la zona III, ambas en la M I.* (Huesca, 1999).

El cárcamo de bombeo, está diseñado para recibir sólo los 30 centímetros superiores del tirante del Canal Texcoco Norte (en caso de tirante máximo, recibiría 60 cm) Esto es, con la finalidad de que ingrese al cárcamo el agua menos sucia y/o contaminada; para esto se está considerando una longitud de vertido (ó ancho de vertedor) de 3 metros, se protege el área de vertido (0.60 mt. x 3.00 mt), con dos mallas; una de calibre grueso para evitar la entrada al càrcamo de objetos mayores y otra como tamiz fino para objetos menores.

El cárcamo tiene una profundidad extra de 1.00 m, para que parte del azolve quede ahí depositado y pueda ser extraído (a mano) con la frecuencia que sea necesaria. El filtrado del material más fino, está a cargo de los filtros "amiad" autolimpiables colocados en la descarga de las bombas.

Los equipos de bombeo, filtros, depósitos, inyectores de fertilizante y válvulas, están protegidos por una caseta de 10 m. x 10 m. con muros y techo de lámina pintro tipo R-72, calibre 24, con altura mínima de 2.30 m y máxima de 3.00 m , con 2 ventanas de aluminio y una puerta de 2.44 m x 2.25m con chapa.

OPERACIÓN DEL SISTEMA.

El sistema de riego por goteo en toda su superficie y con los tres equipos de bombeo, se riega simultáneamente durante 8 horas x día, 6 días a la semana y día domingo de cada semana o en temporada de lluvia no hay riego.

Operación y mantenimiento del sistema.

a) Consumo anual de energía eléctrica
b) Personal técnico-obrero para manejo del sistema
c) Mantenimiento del sistema
d) Resumen de costos

a) El consumo de energía eléctrica:

Los tres equipos de bombeo, suman 265 hp con bombeos máximos de 8 horas / día, regularmente en los meses de noviembre a abril (época de estiaje). En temporada de lluvias (mayo a octubre), es solo un porcentaje del 25% de las 8 horas diarias, ya que con un buen manejo de los drenes interiores, es posible mantener un nivel adecuado de los niveles freáticos en beneficio de los árboles y el pasto. (Huesca, 1999).

b) Personal técnico-obrero para operar el sistema.

La operación del sistema de riego por goteo, indispensable para una vigilancia adecuada de las principales partes de este sistema, como serían los equipos de bombeo, filtros, inyectores de fertilizantes, la apertura y cierre de válvulas "Raphael", manejo de válvulas en general, en el cabezal de control central, incluyendo revisión cotidiana de manómetros para detectar eventuales caídas de presión, que podrían indicar posibles fugas importantes por roturas de algún tramo de tubería enterrada, desajuste de alguna pieza especial por ineficiente colocación de la misma ó insuficiente atraque en el caso de algún codo, te ó reducción.

La revisión cotidiana del trabajo de los goteros, son otras actividades claves del personal operativo. Cualquier taponamiento que no pudiera resolverse sobre la marcha, habría que sustituir de inmediato el gotero por uno de la reserva.

Se requieren: en temporada de sequia es; 1 profesional, 1 oficial fontanero, 2 auxiliares en bombeo, 2 cabos y 18 ayudantes en general, y en temporada de lluvias solo se descartan 9 ayudantes en generales de los 18.

Mantenimiento del sistema. La reposición electromecánica se considera cada 13 años; la caseta de protección, cada 15 años; la subestación cada 18 años y el cárcamo de bombeo, cada 30 años. El sistema en general tiene una vida útil superior a los 20 años.

Anexo B.

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICOS

Un Sistema de Información Geográfico (SIG) particulariza un conjunto de procedimientos sobre una base de datos no gráfica o descriptiva de objetos del mundo real que tienen una representación gráfica y que son susceptibles de algún tipo de medición respecto a su tamaño y dimensión relativa a la superficie de la tierra. A parte de la especificación no gráfica, el SIG cuenta también con una base de datos gráfica con información georeferenciada o de tipo espacial y de alguna forma ligada a la base de datos descriptiva. La información es considerada geográfica si es mesurable y tiene localización.

En un SIG se usan herramientas de gran capacidad de procesamiento gráfico y alfanumérico, estas herramientas van dotadas de procedimientos y aplicaciones para captura, almacenamiento, análisis y visualización de la información georeferenciada. (CONAGUA, 2005).

La mayor utilidad de un sistema de información geográfico está íntimamente relacionada con la capacidad que posee éste de construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales, esto se logra aplicando una serie de procedimientos específicos que generan aún más información para el análisis.

Los modelos de simulación generados, se convierten en una valiosa herramienta para analizar fenómenos que muestren ciertas tendencias, y así lograr establecer los factores influyentes.

Componentes de un SIG.

Un SIG se compone básicamente de cinco elementos que son: Equipo (Hardware), Programas (Software), Datos, Recurso Humano y Procedimientos de operación del sistema (Figura B1).

a) **Equipos (Hardware)*:*** Se refiere a la estructura de cómputo sobre la cual opera el SIG.

b) **Programas (Software)*:*** Los programas de SIG proveen las funciones y las herramientas necesarias para almacenar, analizar y desplegar la información geográfica. Los principales componentes de los programas son:

- Herramientas para la entrada y manipulación de la información geográfica.
- Un sistema de manejador de base de datos (DBMS)

- Herramientas que permitan búsquedas geográficas, análisis y visualización.
- Interface gráfica para el usuario (GUI) para acceder fácilmente a las herramientas.

Fig. B1. Componentes de un SIG.

Fuente: Modelo Integral SIG de riego en los Valles Centrales en el estado de Oaxaca, 2005.

c) **Datos:** Probablemente la parte más importante de un sistema de información geográfico son sus datos. Los datos geográficos y tabulares pueden ser adquiridos por quien implementa el sistema de información, así como por terceros que ya los tienen disponibles.

d) **Recurso humano*:*** La tecnología de los SIG está limitada si no se cuenta con el personal que opera, desarrolla y administra el sistema; y que establece planes para aplicarlo en problemas del mundo real.

e) **Procedimientos:** Un SIG operará acorde con un plan bien diseñado y con unas reglas claras del procedimiento, que son los modelos y las prácticas operativas características de cada organización. (CONAGUA, 2005).

En el esquema de la Figura B2 se sintetizan los alcances de cada uno de los componentes descritos.

Información de un SIG.

Se parte de la idea que un SIG es un conjunto de procedimientos usados para almacenar y manipular datos geográficamente referenciados, es decir objetos con una ubicación definida sobre la superficie terrestre bajo un sistema convencional de coordenadas.

Un objeto en un SIG es cualquier elemento relativo a la superficie terrestre que tiene tamaño es decir, que presenta una dimensión física (alto - ancho - largo) y una localización espacial o una posición medible en el espacio relativo a la superficie terrestre.

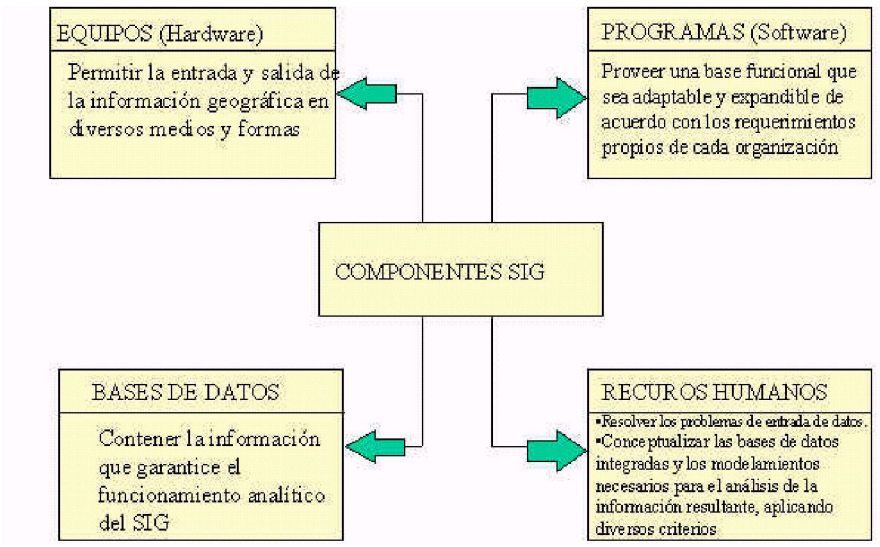


Figura B2. Representación gráfica de los alcances de los componentes de un SIG.

Fuente: Modelo Integral SIG de riego en los Valles Centrales en el estado de Oaxaca, 2005.

A todo objeto se asocian unos atributos que pueden ser:

a) Gráficos.
b) No gráficos.

Los atributos gráficos son las representaciones de los objetos geográficos asociados con ubicaciones específicas en el mundo real (puntos, líneas o áreas).

Por otro lado los atributos alfanuméricos corresponden a descripciones, cualificaciones o características que nombran y determinan los objetos o elementos geográficos. En la Figura B3 se observan los atributos gráficos y no gráficos que se encuentran asociados a los objetos representados.

En un SIG los atributos gráficos y no gráficos se tienen que relacionar y esto se logra mediante un atributo de unión. Se sabe que un objeto al interior de una categoría posee por lo menos dos componentes, uno gráfico y otro no gráfico. A un objeto gráfico se le define a través del software mediante un número clave de identificación, del mismo modo, a la componente alfanumérica, también se le define con el mismo identificador, de tal forma que al interior del sistema se establece una relación entre los dos componentes.

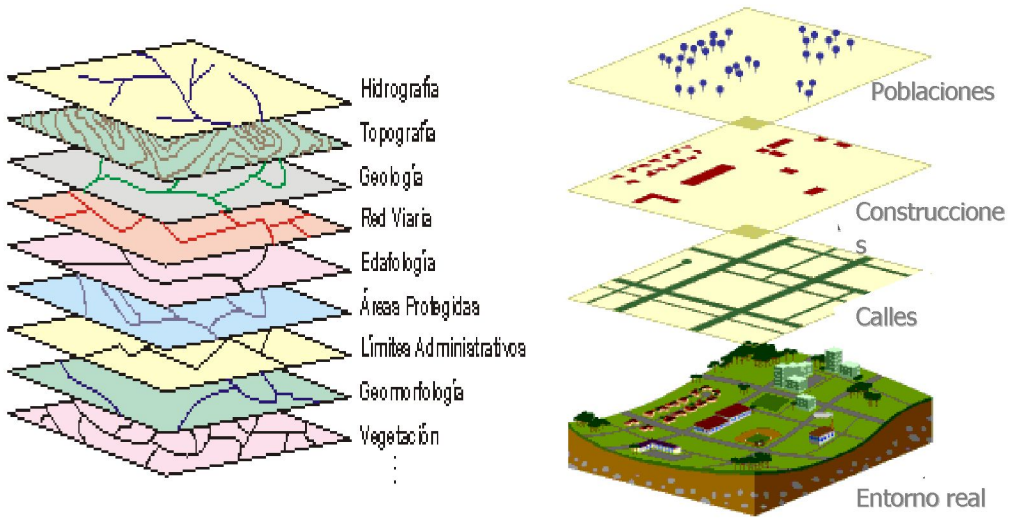


Fig. B3. Arreglo topológico de un modelo de SIG.

Fuente: Modelo Integral SIG de riego en los Valles Centrales en el estado de Oaxaca, 2005.

Además de la integridad de entidad definida anteriormente, se definen otros tipos de relaciones, por ejemplo, la relación posicional que indica donde está el elemento respecto al sistema de coordenadas establecido. La relación topológica referida sencillamente la relación del elemento con otros de su entorno geográfico próximo. (CONAGUA, 2005).

A cada objeto contenido en una categoría se le asigna un único número identificador. Cada objeto está caracterizado por una localización única (atributos gráficos con relación a unas coordenadas geográficas) y por un conjunto de descripciones (atributos no gráficos). El número identificador que es único para cada objeto de la categoría es almacenado tanto en el archivo o mapa de objetos como en la tabla de atributos, lo cual garantiza una correspondencia estricta entre los atributos gráficos y no gráficos.

El modelo de datos permite relacionar y ligar atributos gráficos y no gráficos. Las relaciones se establecen tanto desde el punto de vista posicional como topológico.

Sistema de coordenadas.

Un sistema de coordenadas geográficas es un marco de referencia usado para localizar y medir elementos geográficos. En la representación del mundo real, la localización de un elemento sobre la superficie terrestre está dada por las magnitudes de latitud y longitud en unidades de grados, minutos y segundos.

La latitud varía de 0 a 90 grados en el Hemisferio Norte y de 0 a -90 grados en el Hemisferio Sur de acuerdo con las líneas imaginarias denominadas paralelos o líneas ecuatoriales. El origen de este sistema de coordenadas queda determinado en el punto donde se encuentran la línea ecuatorial y el meridiano de Greenwich.

La longitud varía de 0 a 180 grados en el hemisferio Este y de 0 a -180 grados en el hemisferio Oeste de acuerdo con las líneas imaginarias denominadas meridianos.

Las coordenadas cartesianas son generalmente usadas para representar una superficie plana. Los puntos se representan en términos de las distancias que separan a dicho punto de los ejes de coordenadas.

Utilidad del SIG.

En un SIG, a través del índice, es posible ver las categorías, por estas categorías se accede a los objetos y por los objetos se tiene acceso a los atributos gráficos y no gráficos que se almacenan en la base de datos geográfica. Los archivos o mapas que conforman una categoría se pueden cargar por cada usuario para atender sus necesidades. De igual manera puede hacer operaciones con objetos que pertenezcan a la misma categoría o a categorías diferentes. Estas operaciones pueden ser de tipo espacial (unión, intersección) o racionales (continuidad, vecindad, proximidad). La Figura B4 resume las categorías de un índice de un proyecto. (CONAGUA, 2005).

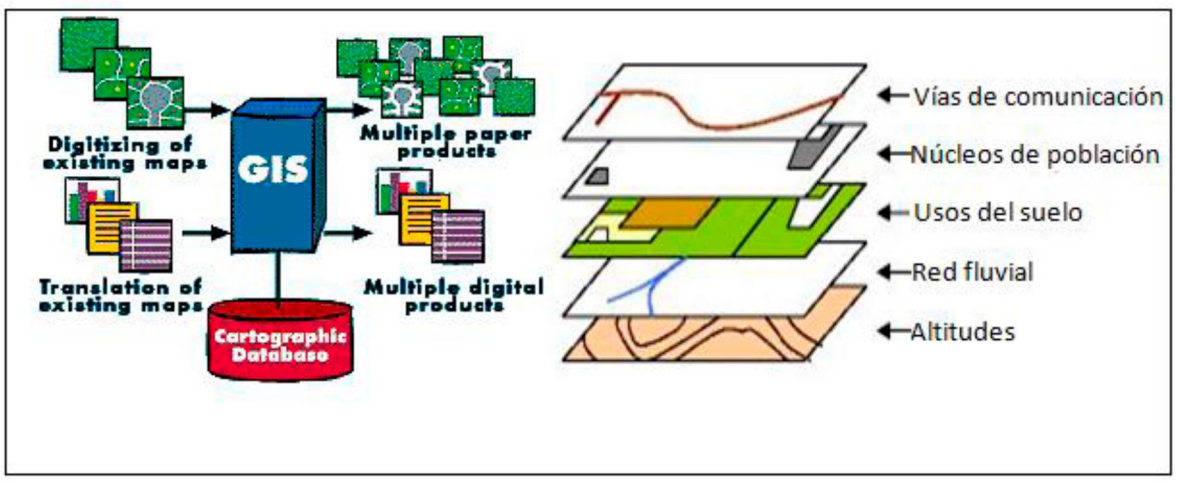


Fig. B4. Indización de las categorías de un modelo de SIG.

Fuente: Modelo Integral SIG de riego en los Valles Centrales en el estado de Oaxaca, 2005.

La construcción de modelos de SIG permite resolver una variedad de problemas del mundo real usando varias técnicas de entrada de datos, análisis y resultados tales como:

- Digitalizar o escanear datos del mundo real.
- Convertir datos digitales de otros formatos.
- Adquirir otros datos disponibles.
- Respuestas a preguntas particulares.
- Soluciones a problemas particulares.
- Despliegue en pantalla de los datos.
- Copias duras (planos y mapas) usando una impresora.
- Listados.
- Reportes.
- Simulación de escenarios en procesos particulares con diferentes acciones naturales o entropía.
- Análisis de tendencias de diversos factores para generar decisiones de planificación y uso de los recursos existentes en un área.

Se pueden nombrar otras aplicaciones de tipo general dentro de las muchas posibilidades que suministra un SIG.

En el ámbito municipal pueden desarrollarse aplicaciones que ayuden a resolver un amplio rango de necesidades, como por ejemplo:

- Producción y actualización de la cartografía básica.
- Administración de servicios públicos (acueducto, alcantarillado, energía, teléfonos, entre otros).
- Inventario y avalúo de predios.
- Atención de emergencias (incendios, terremotos, accidentes de tránsito, entre otros.
- Estratificación socioeconómica.
- Regulación del uso de la tierra.
- Control ambiental (saneamiento básico ambiental y mejoramiento de las condiciones ambientales, educación ambiental).
- Evaluación de áreas de riesgos (prevención y atención de desastres).
- Localización óptima de la infraestructura de equipamiento social (educación, salud, deporte y recreación).
- Diseño y mantenimiento de la red vial.
- Formulación y evaluación de planes de desarrollo social y económico. (CONAGUA, 2005).

Anexo C.

TABLA DE FORMULAS DE LAS DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD.

Distribuciones continuas.

Distribución	*Función de densidad de probabilidad*	*Media*	*Varianza*	*Función generadora de momentos*
Uniforme	$f(y) = \frac{1}{\theta_2 - \theta_1}; \theta_1 \le y \le \theta_2$	$\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$	$\frac{(\theta_2 - \theta_1)^2}{12}$	$\frac{e^{t\theta_2} - e^{t\theta_1}}{t(\theta_2 - \theta_1)}$
Normal	$f(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\left(\frac{1}{2\sigma^2}\right)(y-\mu)^2\right]$ $-\infty < y < +\infty$	μ	σ^2	$\exp\left(\mu t + \frac{t^2\sigma^2}{2}\right)$
Exponencial	$f(y) = \frac{1}{\beta} e^{-y/\beta}, \quad \beta > 0$ $0 \le y < \infty$	β	β^2	$(1 - \beta t)^{-1}$
Gamma	$f(y) = \left[\frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha}\right] y^{\alpha-1} e^{-y/\beta};$ $0 < y < \infty$	$\alpha\beta$	$\alpha\beta^2$	$(1 - \beta t)^{-\alpha}$
ji cuadrada	$f(\chi^2) = \frac{(\chi^2)^{(\nu/2)-1} e^{-\chi^2/2}}{2^{\nu/2}\Gamma(\nu/2)};$ $\chi^2 > 0$	ν	2ν	$(1 - 2t)^{-\nu/2}$
Beta	$f(y) = \left[\frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}\right] y^{\alpha-1}(1-y)^{\beta-1};$ $0 < y < 1$	$\frac{\alpha}{\alpha+\beta}$	$\frac{\alpha\beta}{(\alpha+\beta)^2(\alpha+\beta+1)}$	no existe en forma cerrada

Fuente: Probabilidad y Estadística, Aplicaciones y Métodos, 2007.

Anexo D.

Bitácora de Operación y Mantenimiento 2008 del sistema hidráulico de riego por goteo de 600 HA

Fecha	Horario de Operación		Registro de Operación de bombas			Registro de Tirante	Fallas presentadas en el sistema	Temporada	
	Inicio	Termino	40 HP	100 HP	125 HP	en el canal de llamada		Sequia	Lluvia
02/05/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
03/05/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
04/05/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Incendio	x	
05/05/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Incendio	x	
06/05/2008	Sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla de energía eléctrica	x	
07/05/2008	03:30:00 p.m.	06:00:00 p.m.	Inicia	Falla	Opera	0.58	Restablecimiento de energía eléctrica	x	
08/05/2008	10:30:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Inicia	Reparación	Opera	0.59		x	
09/05/2008	Sin registro	Sin registro	Inicia	**Reparación**	Opera	Sin registro		x	
10/05/2008	Sin registro	Sin registro	Inicia	Reparación	Opera	Sin registro		x	
12/05/2008	Sin registro	Sin registro	Inicia	Reparación	Opera	Sin registro		x	
13/05/2008	Sin registro	Sin registro	Inicia	Reparación	Opera	Sin registro		x	
14/05/2008	03:35:00 p.m.	06:00:00 p.m.	Inicia	Reparación	Opera	Sin registro	Falla de compuerta	x	
15/05/2008	02:00:00 p.m.		Retrolavados	Reparada	Retrolavados	0.47	Exceso de pulga acuática	x	
16/05/2008	Sin operación		Mantenimiento	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Exceso de pulga acuática	x	
17/05/2008	08:15:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	Sin registro		x	
19/05/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
20/05/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
21/05/2008	Sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Exceso de pulga acuática	x	
22/05/2008	Sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Exceso de pulga acuática	x	
23/05/2008	Sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Exceso de pulga acuática	x	
24/05/2008	Sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Exceso de pulga acuática	x	
26/05/2008	08:25:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	0.49		x	
27/05/2008	08:20:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	Sin registro		x	
28/05/2008	10:00:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Falla	Segunda	Inicia	Sin registro	Falla bomba 40 HP al inicio (08:05 am)	x	
29/05/2008	08:30:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Reparada	Segunda	Inicia	0.68		x	
30/05/2008	08:25:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Segunda	Sin operación	Inicia	0.54		x	
31/05/2008	08:00:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	Sin registro		x	
02/06/2008	El sistema opera		Opera	Opera	Opera	Sin registro			x
03/06/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Detección de fuga en línea principal válvulas 2 y 3		x
04/06/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
05/06/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
06/06/2008	08:00:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Segunda	Tercera	Inicia	0.57			x
07/06/2008	Sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Exceso de pulga acuática		x
09/06/2008	03:00:00 p.m.	06:00:00 p.m.	Inicia	Sin operación	Segunda	0.40	Poca pulga acuática		x
10/06/2008	03:30:00 p.m.	06:00:00 p.m.	Inicia	Sin operación	Segunda	0.57			x
11/06/2008	03:15:00 p.m.	06:00:00 p.m.	Inicia	Sin operación	Segunda	0.52			x
13/06/2008	03:00:00 p.m.	06:00:00 p.m.	Inicia	Sin operación	Segunda	0.49			x
14/06/2008	Sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro			x

Bitácora de Operación y Mantenimiento 2008 del sistema hidráulico de riego por goteo de 600 HA

Fecha	Horario de Operación		Registro de Operación de bombas			Registro de Tirante en	Fallas presentadas en el sistema	Temporada	
	Inicio	Termino	40 HP	100 HP	125 HP	el canal de llamada		Sequia	Lluvia
16/06/2008	03:00:00 p.m.	06:00:00 p.m.	Inicia	Sin operación	Segunda	0.48			x
17/06/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla de energía eléctrica		x
18/06/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla de energía eléctrica		x
19/06/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla de energía eléctrica		x
20/06/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla de energía eléctrica		x
21/06/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla de energía eléctrica		x
23/06/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla de energía eléctrica		x
24/06/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla de energía eléctrica		x
25/06/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla de energía eléctrica		x
26/06/2008	03:40:00 p.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	Sin registro	Restablecimiento de energía eléctrica		x
27/06/2008	03:20:00 p.m.	06:00:00 p.m.	Inicia	Sin operación	Segunda	0.57			x
30/06/2008	El sistema opera		Opera	Opera	Opera	Sin registro			x
01/07/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
02/07/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
03/07/2008	El sistema opera		Opera	Opera	Opera	Sin registro			x
04/07/2008	08:30:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	0.68			x
05/07/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
07/07/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
08/07/2008	El sistema opera		Opera	Opera	Opera	Sin registro			x
09/07/2008	El sistema opera		Opera	Opera	Opera	0.89			x
10/07/2008	El sistema opera		Opera	Opera	Opera	Sin registro			x
11/07/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
12/07/2008	El sistema opera		Opera	Opera	Opera	Sin registro			x

Bitácora de Operación y Mantenimiento 2008 del sistema hidráulico de riego por goteo de 600 HA

Fecha	Horario de Operación		Registro de Operación de bombas			Registro de Tirante en	Fallas presentadas en el sistema	Temporada	
	Inicio	Termino	40 HP	100 HP	125 HP	el canal de llamada		Sequia	Lluvia
14/07/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla fuga		x
15/07/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla fuga		x
16/07/2008	El sistema opera		Opera	Opera	Opera	0.76			x
17/07/2008	08:30:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	Sin registro			x
18/07/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
19/07/2008	08:30:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	0.70			x
21/07/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
22/07/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
23/07/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
24/07/2008	El sistema opera		Opera	Opera	Opera	Sin registro			x
25/07/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
26/07/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
28/07/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
29/07/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
30/07/2008	El sistema opera		Opera	Opera	Opera	0.76			x
31/07/2008	08:40:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	0.68			x
01/08/2008	El sistema opera		Opera	Opera	Opera	Sin registro			x
02/08/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
04/08/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla por variación de energía		x
05/08/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla por variación de energía		x
06/08/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla por variación de energía		x
07/08/2008	02:30:00 p.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	0.64	Restablecimiento de energía eléctrica		x
08/08/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
09/08/2008	08:30:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	0.68			x
11/08/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
12/08/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
13/08/2008	El sistema opera		Opera	Opera	Opera	Sin registro			x
14/08/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
15/08/2008	08:40:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	0.65			x
16/08/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
18/08/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
20/08/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
21/08/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
22/08/2008	08:25:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	0.59			x
23/08/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
25/08/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
26/08/2008	El sistema opera		Retrolavados	Retrolavados	Retrolavado	Sin registro	Exceso de pulga acuática		x
27/08/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
28/08/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
29/08/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
30/08/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
01/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
02/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
03/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
04/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
05/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
06/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
08/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
10/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Falla fuga		x
11/09/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Reparación de fuga		x
12/09/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla fuga		x
13/09/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Reparación de fuga		x
15/09/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro			x
17/09/2008	El sistema opera		Opera	Opera	Opera	Sin registro			x
18/09/2008	08:25:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	0.58			x
19/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
20/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
22/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
23/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
24/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
25/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
26/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
27/09/2008	08:40:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	0.47			x
29/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
30/09/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro			x
01/10/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
02/10/2008	Opera		Opera	Falla	Opera	Sin registro	Falla de la bomba 40 HP (11:45 am)	x	
03/10/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
04/10/2008	08:20:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	0.52		x	

Bitácora de Operación y Mantenimiento 2008 del sistema hidráulico de riego por goteo de 600 HA

Fecha	Horario de Operación		Registro de Operación de bombas			Registro de Tirante en el canal de llamada	Fallas presentadas en el sistema	Temporada	
	Inicio	Termino	40 HP	100 HP	125 HP			Sequia	Lluvia
06/10/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
07/10/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
08/10/2008	Opera		Opera	Opera	Opera	Sin registro		x	
10/10/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
13/10/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
15/10/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
16/10/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla fuga en la línea secundaria	x	
17/10/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	Sin registro	Falla fuga en la línea secundaria	x	
20/10/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
21/10/2008	Opera		Opera	Opera	Opera	Sin registro		x	
22/10/2008	Opera		Alternadamente	Alternadamente	Alternadamente	0.35	Falla muy bajo nivel de tirante	x	
23/10/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
24/10/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
27/10/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
28/10/2008	Opera		Alternadamente	Alternadamente	Alternadamente	0.35	Falla muy bajo nivel de tirante	x	
29/10/2008	Opera		Alternadamente	Alternadamente	Alternadamente	0.35	Falla muy bajo nivel de tirante	x	
31/10/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
03/11/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
04/11/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
08/11/2008	sin operación		Sin operación	Sin operación	Sin operación	0.25	Falla nivel bajo de tirante	x	
10/11/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
11/11/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
15/11/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
18/11/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
22/11/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
24/11/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
26/11/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
29/11/2008	Opera		Opera	Opera	Opera	Sin registro		x	
01/12/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
02/12/2008	08:35:00 a.m.	06:00:00 p.m.	Opera	Opera	Opera	0.50		x	
03/12/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
04/12/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
05/12/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
06/12/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
08/12/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
10/12/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
13/12/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
18/12/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
19/12/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
20/12/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
22/12/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
24/12/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
26/12/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	
31/12/2008	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro	Sin registro		x	

Personal encargado del Control, Operación y Mantenimiento del sistema de riego.	
Temporada	
Sequia	Lluvia
1 profesional.	1 Técnico profesional.
1 Oficial fontanero.	1 Oficial fontanero.
2 Auxiliares en bombeo.	2 Auxiliares en bombeo.
2 Cabos.	2 Cabos.
18 Ayudantes en General	9 Ayudantes en General

BIBLIOGRAFÍA.

Adamen Martínez Salvador, Martinez Menez Mario Roberto, (1999). Efectos de Manejo Integral de la Cuenca del Río Texcoco, sobre Producción de Agua y Sedimentos.

Apostalakis, George (1990) "The Concept of Probability in Safety Assessments of Technological

Barone V., Calabrese P., Peralta J. E. (1995). "Estimadores de Máxima Verosimilitud para los parámetros de la distribución de Weibull", *"Monografías sobre Teoría de Errores y Tratamiento de Datos Experimentales".*

Canavos George c., (2007). Probabilidad y Estadística Aplicaciones y métodos. Virginia Commonwealth University. Facultad de Ciencias UNAM.

Catálogo de aspersores VYR, 1998, VYRSA, España.

Chávez C. T. y Huerta A. L. (1999). *Estudios ecológicos previos a la creación de un refugio de vida silvestre en el ex - lago de Texcoco.* Memorias del IV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria Ambiental México.

Comisión Nacional de Población (CONAPO), (1998). *La situación demográfica de México.* Secretaría de Gobernación.

CONAGUA, (2008). Equilibrio Hidrológico en la cuenca del valle de México, XXIV Congreso Nacional de ingeniería Civil.

CONAGUA; (2005). Modelo Integral de Sistema de Información Geográfica de Unidades de riego en lo Valles Centrales en el Estado de Oaxaca.

CONAGUA, (1999). Lineamientos Estratégicos para el Desarrollo Hidráulico Región administrativa XIII Valle de México.

Cruickshank G. G. (1984). *Proyecto Texcoco.* IV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental S.M.I.S.A.A.C. México.

Cullogh Mc., Searle S., (2006). Introducción a los modelos de efectos mixtos. Generalized, Linear and Mixed Models.

CURSO INICIACIÓN AL RIEGO PRESURIZADO, (2004) Convenio Ministerio De Trabajo San Juan - INTA. 9 Al 11 de noviembre.

Curso De Manejo De Riego Presurizado y de Estaciones Agrometeorológicas (1999). Destinado a Operarios de riego. INTA SAN JUAN.

Ducks Unilimeted de México, (2005). Programa de Conservación y Manejo para las Aves de la Ribera en el lago de Texcoco, Estado de México, A. C.

Eugenia Luna Ana, (2005). Teoría de la Confiabilidad. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Departamento de Física.

Gaete Vergara Ing. Mecanico Leonardo, (2001). Manual de Diseño de Sistemas de Riego Tecnificado. Escuela de Ing. Ejecución Mecanica.

Goyal Dr. Megh, Rivera Martínez Luis E., Pagan Crespo José V., (2001). Diseño de Sistema de Riego por Goteo. Ingeniera Agrícola y Biomédica. Universidad de Puerto Rico.

Guarin Zalazar Norberto, (2008). Estadística Aplicada. Profesor Asociado Universidad del Choco.

Guevara Ediberto, Carrasco Marco, (2001). Modelación Estocástica de DBO. y OD. Caso de estudio Río Cabriales. Universidad de Carabobo Valencia, Venezuela.

Hillier Frederick S., Gerald J. Lieberman (1974). *Operations Research,* Holden Day, San. Estados Unidos de América.

Howard, Ronald A. (1971) *Dynamic Probabilistic Systems* Vol. I y II, John Wiley, New York,

Huesca Zepeda Ing. Luis Ángel, (1999). Proyecto Ejecutivo del Sistema de Riego por Goteo, ex lago de Texcoco. CONAGUA.

http://www.portaltransparencia.gob.mx/pot/contrataciones/consultarContrato.do?method=consultaContrato&id.idContrato=OAVM-GC-MEX-07-081-RF-LP&_idDependencia=16101

http://jardineslucia.com/riego/automatizacion.jpg

http://www.cce.org.mx/cespedes/publicaciones/cuadernos/c8.htm

http://www.weibull.com/LifeDataWeb/characteristics_of_the_weibull_distribution.htm

http://www.weibull.com/LifeDataWeb/the_normal_distribution.htm

http://www.windpower.org/en/tour/wres/weibull.htm

http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_316.htm

http://www.weibull.com/LifeDataWeb/exponential_

http://www.ingar.santafe-conicet.gov.ar/lineas-de-investigacion/confiabilidad-y-control/

http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/agua.html

Hidrología Subterránea en el Valle de México, (1992). Ingeniería Hidráulica en México.

IGAR, (2006). Instituto de Desarrollo y Diseño. Colegio Nacional de Investigadores Científicos. Universidad Tecnológica Nacional.

Iracheta Cenecorta Dr. Alfonso, Medina Ciriaco Lic. Susana, (2002). Recuperación, Empleo y Ecología en el ex vaso de Texcoco. Lincoln Institute of Land Policy.

Jiménez B. y Chávez A. (1998). *Posibilidades de reúso en el Distrito Federal y el Valle de México.* 1er Simposio Latinoamericano de Tratamiento y Reúso del Agua y Residuos Industriales. Memorias Tomo II. 25 al 29 de Mayo.

Ley Borrás Dr. Roberto, (2006). Análisis de Incertidumbre y riesgo para la Toma de Decisiones.

Liotta Mario A., (2000). Los Sistemas de Riego por Goteo y Micro Aspersión. Articulo de Divulgación.

Manual de Obras Menores de Riego, 1996, Comisión Nacional de Riego, Chile

Martínez Barrera Ingeniero Agrónomo Ph.D. Leoncio Francisco., (2001). MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENCIÓN DE EQUIPOS DE RIEGO PRESURIZADO. Instituto de Investigaciones agropecuarias centro regional de investigación intihuasi, centro experimental huasco vallenar, chile.

Martínez Pérez Martha Leticia, (2005). La influencia del Estudio Organizacional y la Coordinación Institucional en el cumplimiento de objetivos de Política Ambiental en la Cuenca del Valle de México. Administración Pública.

Mata Lleida Daniel Villalba, (2000). Construcción y Utilización de un Modelo Estocástico para la Simulación de Estrategias de Manejo Invernal en Rebaños de Vacas Nodrizas. Universidad de Lleida, Departamento de Producción Animal.

Maya Redón Cataliney, Jiménez Cisneros Blanca E., (2000). Calidad Física y Microbiológica en fluentes secundarias por el lago artificial “Navor Carrillo” México.

Mayorgo Sari María, (2008). Importancia de los sistemas de riego Ancestrales. Costa Rica.

Mendenhall William, wackerly Dennis D., Scheaffer Richard L., (2008). Estadística Matemática con Aplicaciones. Editorial Iberoamericano.

Miller, Irwin Francisco, John E. Freund, (1973). *Probabilidad y Estadística para Ingenieros,* Editorial. Estados Unidos de América.

Modarres Mohammad, (1993). *What Every Engineer Should Know About Reliability and Risk.* Reverte Mexicana, México D.F., México.

Moreno Sánchez Enrique, (2007). Características Territoriales, Ambientales y Sociopolíticas del Municipio de Texcoco, Estado de México. Universidad Autónoma del Estado de México.

Muciño Biolg. Daniel, (2001). Estudio General del Caso Lago de Texcoco, México. Proyecto Regional Sistemas Integrados de Tratamiento y uso de Aguas Residuales en América Latina: Realidad y Potencial.

Norma Oficial Mexicana, (2000). (NOM-PA-CCA-033/2000) *Que establece las condiciones para el uso de aguas residuales de origen urbano o municipal o de la mezcla de éstas con la de los cuerpos de agua en el riego agrícola.* Diario Oficial de la Federación.

Ocaña Lara Francisco A., Valderrama Bonnet Mariano J., Granada del Pino Ana Ma. (2005). Análisis en componentes principales de un proceso estocástico con funciones muéstrales escalonadas. Universidad de Granada.

Osorio Ulloa Ing. Agrónomo Msc., Tapia Francisco Ing, (1999). Conceptos sobre Diseño y Manejo de Riego Presurizado. Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente.

Osorio Alfonso Ing. Msc., Tapia Francisco Ing., (1999). Elementos de Riego Tecnificado.

Payán Ochoa M. C. Sergio, (2001). Sistemas de Riego Preturizado y Monitoreo de la Humedad del Suelo. Instituto nacional de Investigaciones Forestales, Agricolas y Pecuarias.

Pizarro F., (1990). Riegos localizados de alta frecuencia. EDICIONES Mundiprensa. . 2*° Edición.

Procesos_Estocasticos_aplicados_a_la_confiabilidad_(Unlocked_by_www.freemypdf.c)

Sander P.,Badoux R., (1991). *Bayesian Methods in Reliability,* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda. *Analysis,* Marcel Dekker Inc., New York, Estados Unidos de América.

Systems, *Science* vol. 259, (1990). Instituto Mexicano del Petróleo (1999) *Estudio del Análisis de Riesgos del Complejo Marino.*

Tejada Muñoz Ing. Msc. Guillermo, (2005). Metodología para evaluar la Confiabilidad de un Sistema empleando Lógica Combinacional. Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos de Lima Perú.