



17 01167

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

"MODELO DE SIMULACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD
FUTURA DEL AGUA SUPERFICIAL EN LA CUENCA
HIDROLÓGICA DEL RÍO CULIACÁN"

Acopiado de un D.C.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
(PLANEACIÓN)

P R E S E N T A :
REGINO ALBERTO RIVERA LÓPEZ

DIRIGIDA POR: M.Sc. JORGE A. HIDALGO TOLEDO

**TESIS CON
FALLA DE ORGÁN**

CIUDAD UNIVERSITARIA

FEBRERO, 2002





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre, que con lágrimas en los ojos me vio partir hacia esta aventura que hoy se cristaliza. Por tu infinito y desmesurado amor... por tu comprensión y apoyo... este triunfo va para ti.

A mi padre que siempre me dio el ejemplo del trabajo arduo. A mi hermana Nancy, que inició esta aventura conmigo y que me brindó todo su apoyo a cada momento. A mis hermanos que siempre estuvieron atentos de mi situación, Anita, Lando, Marlo, Fabián y Gerson, mis hermanos que me llenan de vida cada vez que los veo.

Mil Gracias Familia.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

AGRADECIMIENTOS

Va un agradecimiento para mis profesores de la DEPFI, Dr. Sergio Fuentes Maya, Dr. Gabriel Sánchez Guerrero, M.I. Javier Suárez Rocha, M.I. Arturo Fuentes Zenón, Dra. Idalia Flores de la Mota, que fueron un elemento esencial en mi formación profesional, que me compartieron sus conocimientos y acertadamente me guiaron durante mis años de estudio.

Agradezco a M. Sc. Jorge Arturo Hidalgo Toledo, por su acertada guía como director de esta tesis y como profesor.

Especial agradecimiento merece el Dr. Jaime Jiménez Guzmán, por su apoyo para formar parte del proyecto PAPIIT IN-313198 como becario durante los semestres 2000-1 y 2000-2. También por su valiosa aportación a esta tesis como co-director.

Le agradezco a la Dirección General de Estudios de Posgrado de la UNAM, por el apoyo económico que me brindó a través del Programa de Becas Nacionales para Estudios de Posgrado, durante los semestres 2001-1 y 2001-2.

Un lugar importante se ganaron en mi corazón mis compañeros de la DEPFI, Campus Morelos, Genevieve Thibault, Juan Sánchez, Nadia Olaya, Edith Salcedo, Itzé Durán, Alejandra Guerra, Fernando Arias y Edith Salcedo. Un agradecimiento para todos ellos por su amistad incondicional.

A mi amigo Gastón Romero, por el gran apoyo que desde un principio me brindó y que nunca olvidaré, por su amistad gracias. También para mi amigo Alfredo Garza, quien me acompañó a lo largo de mis estudios como compañero de clase y amigo.

A mis compañeros de CNA, quienes me apoyaron en la obtención de la información que sustenta este trabajo. Van mis agradecimientos para Ing. Alfredo Araujo, Ing. Victor Izabal, Ing. Jesús Garay, Lic. Alonso Rivera, Ing. Higinio Miranda, Ing. Jacinto Montaña, Ing. Rafael Sanz, Ing. José Parra, Ing. Marcos Ocampo, Lic. José Heras e Ing. Felipe Baldenebro.

Un agradecimiento especial para la Lic. Leonor Cebreros Murillo y Lic. Virma Gutiérrez Bautista del Consejo Estatal de Población de Sinaloa, quienes aportaron, muy amablemente, los datos de las proyecciones para la población. También mi agradecimiento para el Lic. Leobardo Diez Martínez Guamán, de la Secretaría de Planeación y Desarrollo del Gobierno del Estado de Sinaloa, por su valiosa información en las proyecciones de la actividad industrial.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

RESUMEN

Este trabajo aborda la elaboración de un modelo de simulación de la cuenca hidrológica del río Culiacán. La finalidad de este modelo es determinar la disponibilidad actual del agua superficial y en tres horizontes de planeación, 2010, 2020 y 2030 para diferentes escenarios de precipitación. La modelación contempla cinco submodelos principales: submodelo lluvia-escorrentía, submodelo embalses, submodelo extracciones, submodelo demográfico y submodelo balance hidráulico. El modelo permite calcular los déficit o superávit de agua en los diferentes escenarios de planeación. A la vez, se proponen alternativas de solución para evitar los escenarios críticos de escasez de agua. Este estudio establece a su vez un proceso estructurado para evaluar la disponibilidad del agua superficial en otras cuencas de México.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
ALCANCES Y OBJETIVOS	2
1 ANÁLISIS Y DELIMITACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	3
1.1 Situación nacional	4
1.2 Identificación de la problemática en la cuenca del río Culiacán	6
1.3 Delimitación de la problemática	10
2 INFORMACIÓN PRELIMINAR	13
2.1 El ciclo hidrológico	14
2.2 La cuenca y sus características	15
2.3 El recurso hidráulico a nivel nacional	16
2.3.1 Usos del agua	17
2.4 La administración del agua en la actualidad	18
2.4.1 La Comisión Nacional del Agua	19
2.4.1.1 Región III Pacífico Norte	20
2.4.1.2 Consejos de Cuenca	25
2.5 La cuenca hidrológica del río Culiacán	26
2.5.1 Características generales	26
2.5.2 Datos hidrológicos	28
2.5.2.1 Agua Superficial	29
2.5.2.2 Agua subterránea	30
2.5.3 Usos del agua	32
3 VARIABLES DEL MODELO	36
3.1 Instrumentos de análisis	37
3.1.1 El enfoque sistémico	37
3.1.2 La técnica "Simulación Digital"	38
3.1.2.1 Stella, el simulador	39
3.2 El flujo de agua en la cuenca	41
3.3 Submodelo lluvia – escurrimiento	46
3.4 Submodelo embalses	47
3.5 Submodelo extracciones	49
3.5.1 Uso agrícola	50
3.5.2 Uso público urbano	51

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.5.3	Uso industrial	51
3.5.4	Uso pecuario	52
3.6	Submodelo demográfico	53
3.7	Submodelo balance hidráulico	54
4	CODIFICACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO	58
4.1	Codificación del submodelo lluvia-escorrimento	59
4.2	Codificación del submodelo embalses	65
4.3	Codificación del submodelo extracciones	68
4.3.1	Uso agrícola	68
4.3.2	Uso público urbano	71
4.3.3	Uso industrial	74
4.3.4	Uso pecuario	75
4.4	Codificación del submodelo demográfico	76
4.5	Codificación del submodelo balance hidráulico	79
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ESCENARIOS	82
5.1	Interfase del usuario	84
5.2	Resultados de la simulación	87
5.2.1	Escorrimento medio anual	87
5.2.2	Escorrimento promedio abundante	87
5.2.3	Escorrimento promedio seco	88
5.3	Análisis de escenarios	88
5.3.1	Disminución de la precipitación	88
5.3.2	Escenarios para aumentar disponibilidad	89
	CONCLUSIONES	91
	ANEXOS	93
	BIBLIOGRAFÍA	95

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1.1 Disponibilidad media per cápita de agua en metros cúbicos por habitante por año a nivel nacional	5
Tabla 1.2 Disponibilidad media per cápita de agua en metros cúbicos por habitante por año en la región pacífico norte	7
Tabla 1.3 Datos generales, acuífero río Culiacán	9
Tabla 2.1 Componentes del ciclo hidrológico nacional	16
Tabla 2.2 Extracciones brutas de agua (datos para 1999)	17
Tabla 2.3 Almacenamientos en la cuenca hidrológica del río Culiacán	27
Tabla 2.4 Distribución de la precipitación media mensual (mm)	28
Tabla 2.5 Evaporación real media mensual (mm)	28
Tabla 2.6 Temperaturas medias, máximas y mínimas promedio registradas en la cuenca hidrológica del río Culiacán (°C)	29
Tabla 2.7 Escurrimiento medio anual en época de lluvia y estiaje (Mm ³ / año)	29
Tabla 2.8 Factor medio de escurrimiento en la cuenca del río Culiacán	29
Tabla 2.9 Datos generales, acuífero río Culiacán	31
Tabla 2.10 Requerimientos de agua para el sector Agrícola (1990-1995), Mm ³ /año en la cuenca del río Culiacán	33
Tabla 2.11 Cultivos principales por ciclo, Distrito de Riego 010	33
Tabla 2.12 Eficiencia de Riego, distrito 010, período 1990 - 1995	34
Tabla 2.13 Demanda anual para uso público urbano (Mm ³) en la cuenca del río Culiacán	34
Tabla 2.14 Principales industrias que hacen uso del agua en la región III	34
Tabla 2.15 Población pecuaria en la cuenca del río Culiacán	35
Tabla 2.16 Fuentes de abastecimiento y volúmenes para generación de energía eléctrica	35
Tabla 3.1 Clasificación de las condiciones antecedentes de humedad (CAH)	47
Tabla 3.2 Dotaciones de agua por tipo de ganado	52
Tabla 3.3 Rangos de la disponibilidad relativa en una cuenca	57
Tabla 4.1 Red de estaciones climatológicas en la Cuenca del río Culiacán	60
Tabla 4.2 Áreas de influencia por polígonos de Tiessen, estación Guatenipa II (S1)	62
Tabla 4.3 Áreas de influencia por polígonos de Tiessen, estación Badiraguato (S1)	62
Tabla 4.4 Áreas de influencia por polígonos de Tiessen, estación Tamazula (S2)	62
Tabla 4.5 Áreas drenadas de la presa Adolfo López Mateos (S1) y Sanalona (S2)	65

Tabla 4.6 Plan de cultivos para un ciclo agrícola normal	69
Tabla 4.7 Concentrado del plan de cultivos para un ciclo agrícola normal	70
Tabla 4.8 Dotación y eficiencia del sistema Culiacán	73
Tabla 4.9 Dotaciones en comunidades rurales	73
Tabla 4.10 Demanda para uso industrial por subcuencas	74
Tabla 4.11 Demanda para uso pecuario por subcuencas	75
Tabla 4.12 Población en la cuenca por municipio y subcuenca, según Censo 2000	77
Tabla 4.13 Proyección de la población en la cuenca al año 2030	78
Tabla 4.14 Proyección de la población por tipo y subcuenca	78
Tabla 5.1 Resultados de la simulación para un “escurrimiento promedio” anual	87
Tabla 5.2 Resultados de la simulación para un “escurrimiento promedio abundante” anual	87
Tabla 5.3 Resultados de la simulación para un “escurrimiento promedio seco” anual	88
Tabla 5.4 Disponibilidad en la cuenca con disminución de la precipitación	89
Tabla 5.5 Acciones para incrementar la disponibilidad con escurrimiento promedio seco	89
Figura 1.1 Desbalance en la disponibilidad y uso del agua en México	5
Figura 1.2 Disponibilidad relativa del agua superficial	6
Figura 1.3 Situación actual de la disponibilidad del agua superficial en la Región Pacífico Norte, por cuenca	8
Figura 1.4 Justificación principal de un estudio prospectivo sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río Culiacán	9
Figura 1.5 Modelo conceptual para la delimitación de la problemática	12
Figura 2.1 El ciclo hidrológico	15
Figura 2.2 Porcentaje de extracción de agua por usos	18
Figura 2.3 Regiones administrativas de la Comisión Nacional del agua	19
Figura 2.4 Región administrativa Pacífico-Norte	20
Figura 2.5 Acuíferos en la región Pacífico Norte	22
Figura 2.6 Localización de los distritos de riego en la región Pacífico Norte.	23
Figura 2.7 Cuenca hidrológica del río Culiacán	27
Figura 2.8 Volúmenes medios mensuales del río Culiacán	30
Figura 2.9 Distribución del agua por usos en la cuenca río Culiacán	32
Figura 3.1 Ejemplo de un modelo de simulación elaborado en STELLA	40

Figura 3.2 Modelo general de la cuenca hidrográfica del río Culiacán	41
Figura 3.3 Relación del flujo de agua entre cada una de la subcuencas	42
Figura 3.4 Modelo conceptual del flujo de agua, subcuenca río Humaya (S1)	43
Figura 3.5 Modelo conceptual del flujo de agua, subcuenca río Tamazula (S2)	44
Figura 3.6 Modelo conceptual del flujo de agua, subcuenca Río Culiacán (S3)	45
Figura 3.7 Curva tpica áreas – capacidades para un embalse	49
Figura 3.8 Diagrama de una cuenca intermedia	54
Figura 4.1 Delimitación por Polígonos de Tiessen y ubicación de estaciones climatológicas e hidrométricas	61
Figura 4.2 Submodelo lluvia-escurrecimiento para le estación hidrométrica Guatenipa II (S1)	63
Figura 4.3 Escurrecimientos simulados contra escurrecimientos reales (Guatenipa II)	64
Figura 4.4 Escurrecimientos simulados contra escurrecimientos reales (Badiraguato)	64
Figura 4.5 Escurrecimientos simulados contra escurrecimientos reales (Tamazula)	65
Figura 4.6 Submodelo embalses, presa Adolfo López Mateos (S1)	66
Figura 4.7 Submodelo embalses, presa Sanalona (S2)	67
Figura 4.8 Submodelo extracciones, uso agrícola (Plan de cultivos D.R. 010)	70
Figura 4.9 Cculo de volumen de extracción para uso agrícola (D.R. 010)	71
Figura 4.10 Submodelo extracciones, uso público urbano (Ciudad de Culiacán)	73
Figura 4.11 Submodelo extracciones, uso público urbano (Población rural)	74
Figura 4.12 Submodelo extracciones, uso industrial	75
Figura 4.13 Submodelo extracciones, uso pecuario	76
Figura 4.14 Municipios correspondientes a la cuenca del río Culiacán	77
Figura 4.15 Submodelo demográfico	79
Figura 4.16 Submodelo balance hidráulico (Ab)	80
Figura 4.17 Submodelo balance hidráulico(Dr)	80
Figura 5.1 Pantalla del menú principal	84
Figura 5.2 Pantalla del modelo general	85
Figura 5.3 Pantalla de escenarios	86
Figura 5.4 Pantalla de resultados	86

INTRODUCCION

La disponibilidad de agua en la cuenca del río Culiacán, al igual que en muchas otras cuencas hidrológicas del país, se ha visto seriamente mermada en los últimos años, las sequías en las épocas de estiaje son un ejemplo palpable de ello.

Debido a la naturaleza estocástica de las principales variables que influyen en el sistema real de una cuenca hidrológica, se vuelve indispensable la aplicación de un modelo digital para determinar el comportamiento futuro de la cuenca en cuanto a la disponibilidad del recurso agua se refiere. Un modelo que permita analizar el complejo sistema mediante un modelo matemático, a través de un sistema de cómputo que para estos fines esté diseñado.

Esta propuesta de investigación adopta un enfoque sistémico en el estudio y planteamiento del modelo de simulación de la cuenca hidrológica.

A diferencia de la mayoría de los trabajos que se revisaron al respecto en nuestro país, este enfoque permite analizar el sistema (cuenca hidrológica) considerando en su interacción factores de tipo fisiográfico, económico, social, demográfico y no solamente factores del tipo hidrológico.

A nivel internacional, existen algunos trabajos más orientados hacia esta línea de investigación, es decir, dichas publicaciones muestran la simulación de cuencas hidrológicas incluyendo no sólo variables hidrológicas, sino aspectos sociodemográficos. El inconveniente que presentan estos estudios es que su desarrollo y aplicación se desenvuelve en cuencas hidrológicas de otros países, Estados Unidos y Europa principalmente, donde las condiciones físicas, sociales y productivas son muy distintas. En la bibliografía, al final de este trabajo, se mencionan los trabajos más importantes que se han realizado al respecto y que sirven de apoyo para la realización del presente proyecto.

Este estudio se realizará en la cuenca hidrológica del río Culiacán, sin embargo, este proyecto permitirá establecer, a su vez, un proceso bien estructurado para poder evaluar, de la misma forma, otras cuencas del país.

Como consecuencia del incremental y descontrolado uso del vital líquido, se vislumbra una serie de problemas futuros- algunos ya presentes- de disponibilidad y calidad para las futuras generaciones, por consiguiente, la propuesta de acciones para evitar o aminorar dicha problemática es una necesidad en nuestros tiempos.

ALCANCES Y OBJETIVOS

Sin ser un especialista en la materia, casi cualquiera puede darse cuenta de que los volúmenes de agua disponibles para sus distintos usos en el país, cada vez son menores y más restringidos por parte de las autoridades. Por tanto, las siguientes hipótesis que se plantean quizás puedan ser obvias. Sin embargo, la magnitud de la problemática y el horizonte futuro donde se ubicará su situación más crítica, será una respuesta puntual que el modelo de simulación nos proporcionará con bastante exactitud.

Las hipótesis que se plantean son las siguientes:

- La disponibilidad de agua superficial en la cuenca del río Culiacán en los próximos 30 años se verá seriamente mermada de continuar su curso actual.
- Las condiciones actuales de operación y distribución del agua no es la más adecuada para la situación actual del país.
- Se deberán implementar acciones distintas y creativas para el mejoramiento del sistema hidráulico en su conjunto.

Como resultado final de este proyecto de investigación, se esperan obtener datos concisos sobre las consecuencias que ocasionaría en los volúmenes disponibles futuros en esta cuenca hidrológica, una continuidad en la política actual del manejo del agua. Se obtendrán datos numéricos y específicos sobre los volúmenes disponibles de agua superficial en distintos horizontes de planeación y para sus diferentes usos.

Este modelo permitirá verificar o corregir las políticas actuales sobre el manejo y control del agua en dicha cuenca, así como otras variables económicas o sociales que afecten al sistema; todo esto mediante la interpretación de los resultados que arroje el modelo. Además se podrá analizar la sensibilidad incremental o decremental de algunas de estas variables. Las conclusiones obtenidas, podrán ser utilizadas dentro de algún **programa de planeación hidráulica**.

Podemos decir entonces, que el objetivo principal de este trabajo, es simular el proceso del consumo de agua superficial en la cuenca hidrológica del río Culiacán, a partir de variables –algunas de ellas aleatorias–, como son: población y sus índices de crecimiento, datos estadísticos de lluvias, captación de agua superficial, políticas y sistemas de distribución y actividades productivas; con la finalidad de pronosticar la disponibilidad futura del agua superficial en esta cuenca e identificar cursos de acción que prevengan la falta de este recurso.

Con este trabajo de investigación se pretende, además, establecer lineamientos a través de un análisis completo de la cuenca hidrológica del río Culiacán, para poder analizar otras cuencas del país, simulando su funcionamiento de disponibilidad de agua bajo un enfoque sistémico, y no desde un punto de vista reduccionista. Todo esto con la finalidad de identificar causas específicas que pudieran ocasionar desbaste del vital líquido en la población futura.

El modelo de simulación que resulte de este trabajo se anexará a la tesis en un disco compacto.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 1



ANÁLISIS Y DELIMITACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Este capítulo inicia describiendo el panorama general que presenta México en cuanto a disponibilidad del agua se refiere. Posteriormente aborda la problemática en la Regional Pacífico Norte, para después bajar el lente observador a la cuenca del río Culiacán. La problemática se delimita a la cantidad disponible del agua superficial para los principales usos en la cuenca, en un horizonte de planeación a mediano y largo plazo.

1.1 SITUACIÓN NACIONAL

Si realizamos una investigación somera sobre la disponibilidad general del agua en nuestro país llegaríamos a la conclusión de que todo está bien, que existe disponibilidad suficiente para satisfacer la demanda. Pongamos como ejemplo la siguiente información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CNA)¹:

$$\text{Disponibilidad natural media por habitante} = 4,986 \text{ m}^3 / \text{año}$$

Considerando que una sociedad puede satisfacer sus necesidades y desarrollarse con un volumen mínimo de 2,000 m³/hab/año, según la Organización de las Naciones Unidas, podemos concluir entonces que no existe problemática por resolver; ese volumen es más que suficiente para satisfacer la demanda anual de la población y mucho más.

Pero lo que no informa dicha dependencia en ese documento informativo, es que esta disponibilidad es un valor medio considerando que la precipitación de la lluvia es proporcional en toda la república, situación que es totalmente irreal, ya que según datos de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP)² la distribución del agua es totalmente contrastante en las cuencas del país, tal y como se muestra en la figura 1.1.

La mayor parte del escurrimiento nacional se presenta en el sureste, en contraparte, el norte del país recibe cantidades de lluvia mucho menor pero demanda mayores volúmenes, esto debido a su mayor actividad productiva (industria, agricultura, ganadería, etc.)

A causa del incremento poblacional y consecuentemente de las actividades productivas, la demanda del agua para satisfacer las necesidades del ser humano en todos sus ámbitos se incrementa día con día, por el contrario la madre naturaleza no aumenta sus niveles de abastecimiento, más bien, en ocasiones tiende a disminuirlos.

Los balances hidráulicos en la mayoría de las cuencas hidrológicas del país muestran tendencias a la baja; el volumen disponible per cápita muestra un comportamiento en descenso, según se observa en la siguiente tabla.³

¹ Compendio Básico del Agua en México, Septiembre 1999, Comisión Nacional del Agua, pag. 5

² <http://www.semarnap.gob.mx/gestion/avances/presentacion/Agua.html>

³ Los consejos de Cuenca en México, Definiciones y Alcances, CNA, pag. 18

Año	Disponibilidad per cápita (m ³ /hab/año)
1950	12,885
1998	4,986

Tabla 1.1 Disponibilidad media per cápita de agua en m³/hab/año a nivel nacional



Figura 1.1 Desbalance en la disponibilidad y uso del agua en México

Según los datos de la tabla 1.1, la disponibilidad per cápita **disminuyó 61%** en un periodo de casi 50 años.

Esto indica que si no hacemos nada, que si no establecemos cursos de acción distintos a los aplicados actualmente, la disponibilidad de agua seguirá a la baja, vislumbrando serios problemas futuros para satisfacer la demanda. Por eso, se vuelve indispensable el análisis de la situación presente en cuanto al manejo y distribución del agua en México se refiere.

Otro aspecto importante en el análisis de la problemática lo representan las sequías. Las sequías que se han presentado en nuestro país han acrecentado el problema de la falta de agua principalmente en el norte del país. Según datos contenidos en el Programa Hidráulico 1995-2000⁴ se han registrado tres periodos críticos de sequía en los últimos 50

⁴ Programa Hidráulico 1995-2000, Poder Ejecutivo Federal, pag 15

años: el primero de 1948 a 1954, el segundo de 1960 a 1964 y el más reciente iniciado en 1993 y finalizado en 1999.

Como información adicional se presenta la figura 1.2, que muestra el nivel de disponibilidad de aguas superficiales en las distintas zonas del país.⁵

Al analizar esta gráfica, se puede observar que existe una gran extensión territorial con presencia de escasez de agua superficial.



Figura 1.2 Disponibilidad relativa del agua superficial

Como conclusión del planteamiento y análisis introductorio de la problemática, se puede decir entonces que el presente trabajo de investigación se fundamenta con bases y datos estadísticos que revelan un problema potencial para las futuras generaciones en nuestro país, "la escasez de agua". La realización, por tanto, de este proyecto muestra gran significancia en el ámbito social y productivo de la sociedad moderna.

1.2 IDENTIFICACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA EN LA CUENCA DEL RÍO CULIACÁN

Según datos del sistema nacional de información de la Comisión Nacional del Agua (CNA) la disponibilidad de agua per cápita se ha visto seriamente reducida en la región pacífico norte, a la cual pertenece la cuenca en estudio. Esta información se muestra en la tabla 1.2.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

⁵ Estadísticas del Medio Ambiente, México 1997, SEMARNAP, pag. 12

Año	Disponibilidad per cápita (m ³ /hab/año)
1955	22,580
1998	5,840

Tabla 1.2 Disponibilidad media per cápita de agua en metros cúbicos por habitante por año en la región pacífico norte

Lo que significa una **disminución de un 74%** en el volumen disponible por habitante en tan sólo 43 años. Estos datos son alarmantes porque si hacemos una extrapolación lineal de estos datos, los resultados no serían muy alentadores para las próximas décadas.

En los distritos de riego 010⁶, 074 y 109 se han dejado de sembrar 80,000 hectáreas en promedio anual en el ciclo primavera-verano y en segundos cultivos, como consecuencia de la escasez de agua en la región en épocas de sequía. Lo cual representa un costo económico millonario para el sector productivo agrícola. Habrá que sumar a estos costos, los ocasionados al sector ganadero de la región.

Según el último balance hidráulico del agua superficial llevado a cabo por la CNA, la cuenca hidrológica del río Culiacán fue clasificada como una cuenca en déficit. Esto significa que el volumen virgen promedio escurrido es menor al volumen promedio demandado (Figura 1.3).

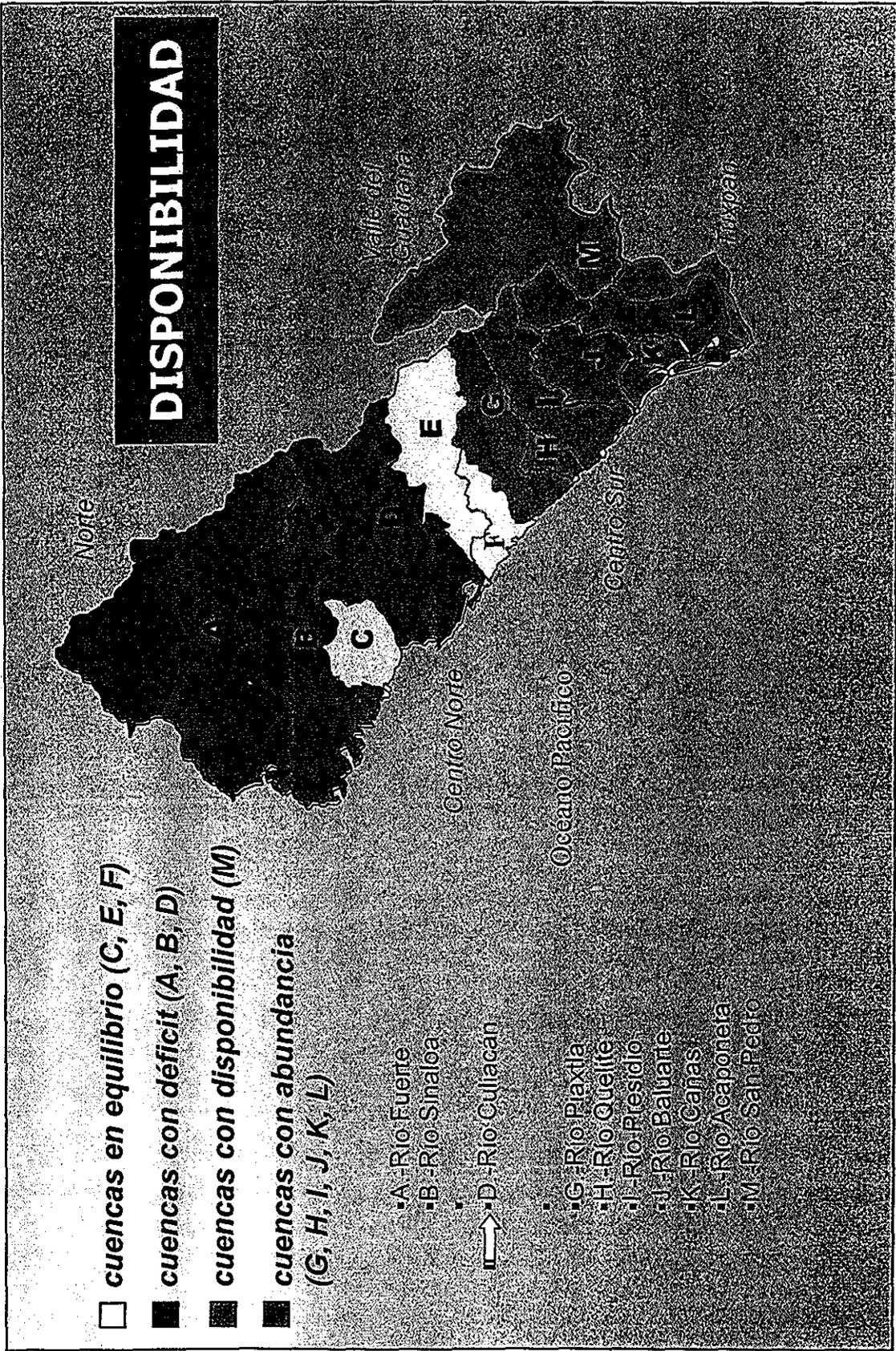
La tendencia negativa, en la disponibilidad de agua es una realidad innegable. La figura 1.3 muestra 3 cuencas en déficit, la cuenca del río Fuerte, río Sinaloa y río Culiacán, correspondientes a la Región Hidrológica Pacífico Norte. La cuenca del río Culiacán se selecciona para este estudio por ser una cuenca con graves problemas actuales y potenciales en cuanto a disponibilidad del agua. Además en esta cuenca se concentra el más importante sector productivo del estado, agrícola, ganadero e industrial. El nivel de población es el mayor del estado también. Todas estas razones han conducido a la generación de un alto nivel de contaminación de la cuenca, principalmente en la parte baja del río Culiacán, como consecuencia de las descargas vertidas por los organismos de alcantarillado de las ciudades, las industrias y la agricultura a través de los fumigantes que utilizan.

Por tanto, la situación actual de déficit en cuanto a disponibilidad relativa decretada por la Comisión Nacional del Agua, la serie de períodos continuos de sequía presentados en la región y el alto costo económico que impacta a los sectores productivos de la región (agricultura y ganadería principalmente), son las razones de peso que conllevan a la realización de este estudio prospectivo (figura 1.4).

Es importante señalar que la situación actual en la cuenca hidrológica del río Culiacán no es tan alarmante si consideramos que la disponibilidad de agua subterránea no está en déficit. Según un estudio llevado a cabo por la CNA la condición geohidrológica del acuífero del río Culiacán es subexplotada. La tabla 1.3 muestra los datos más importantes del acuífero en cuanto a disponibilidad se refiere.

⁶ El distrito de riego 010 es alimentado por las aguas que capta la cuenca del río Culiacán

Fuente: Gerencia de Planeación Hidráulica, Subdirección General de Planeación, CNA



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 1.3 Situación actual de la disponibilidad del agua superficial en la Región Pacífico Norte, por cuenca

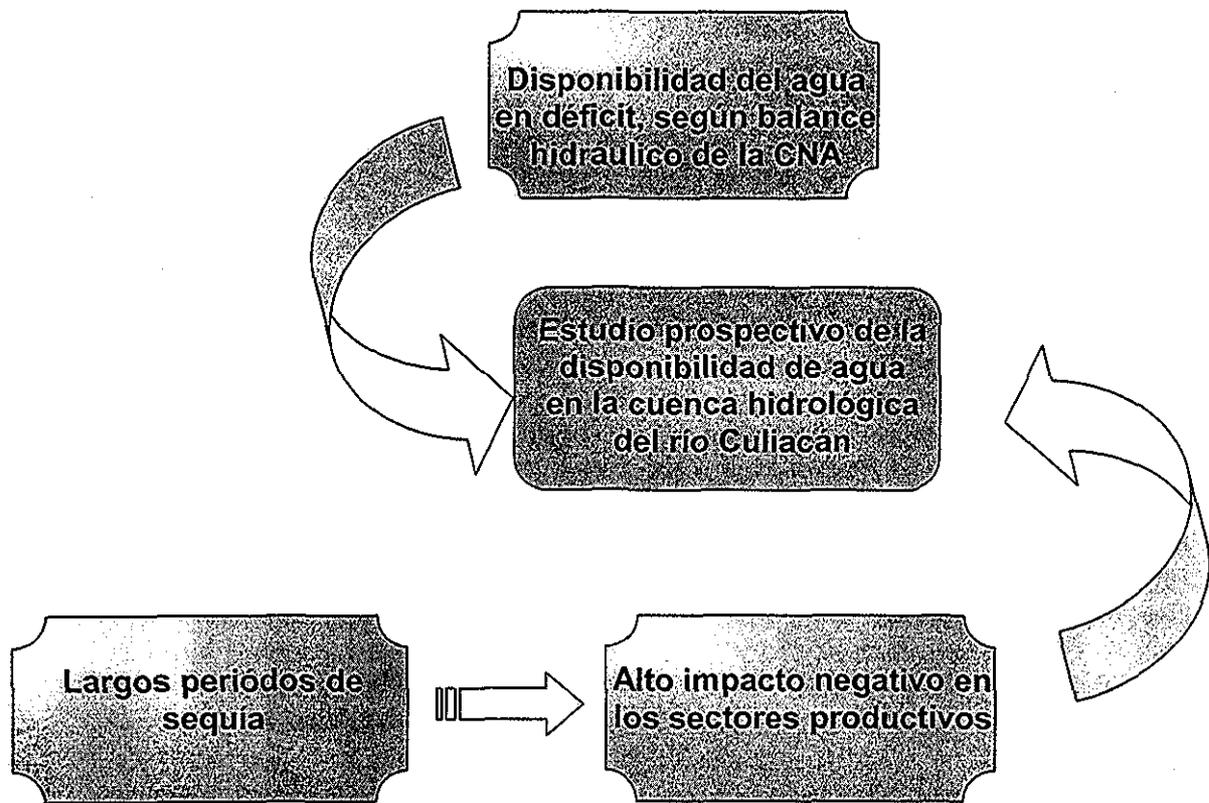


Figura 1.4 Justificación principal de un estudio prospectivo sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río Culiacán

En épocas de estiaje y sequía, cuando los volúmenes disponibles disminuyen notablemente, las extracciones de agua subterránea aumentan para tratar de compensar la ausencia de agua superficial. En situaciones extremas de disponibilidad se perforan nuevos pozos para uso doméstico, agrícola y pecuario principalmente.

La situación en la cuenca es grave, más no alarmante. Por una parte el agua superficial, que representa la principal fuente de abastecimiento, se encuentra en déficit, pero el agua subterránea no.

Recarga, ⁷ Mm ³	200
Extracción, Mm ³	115.5
Disponibilidad, Mm ³	84.5
Condición geohidrológica	Subexplotado

Tabla 1.3 Datos generales, acuífero río Culiacán

⁷ Millones de metros cúbicos.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Esta dualidad de situaciones nos indican por una parte que, habrá que realizar varias actividades a la par para aminorar los daños potenciales que la falta de agua en cantidad insuficiente pueda provocar en un futuro cercano. Por otra parte, deberán realizarse estudios retrospectivos para identificar acciones inmediatas que mejoren el aprovechamiento de los recursos hidráulicos en la cuenca y al mismo tiempo disminuyan los daños ocasionados por la falta del vital líquido. Esto ayudaría en la planeación hidráulica de la cuenca en el corto plazo. También deben realizarse una serie de estudios prospectivos, que permitan conocer con gran exactitud la situación futura de la cuenca en cuanto a disponibilidad, ubicando en el tiempo situaciones críticas y, que de esta manera, se proporcione información confiable para la toma de decisiones actuales en materia de planeación hidráulica a mediano y largo plazo. El presente trabajo se avoca a esta última parte.

Como conclusión de este capítulo, se puede decir que la finalidad de este estudio no es simplemente identificar si se presentará o no un problema de desabasto futuro, ya que podemos llegar a esa conclusión con tan sólo analizar la tendencia actual de la disponibilidad del agua que muestran las tablas 1.1 y 1.2; más bien el estudio proporcionará datos específicos sobre su ubicación en un horizonte futuro, así como su gravedad, indicada por volúmenes disponibles para sus distintos usos en diferentes horizontes de planeación. La propuesta de cursos de acción y su verificación de eficacia en el modelo, se podrán explorar mediante un análisis de sensibilidad, que permitirá identificar las propuestas viables de cambio en la cuenca.

Una cosa nos ha quedado clara, existe un problema actual, pero más que nada potencial para las futuras generaciones, en asegurar un abasto suficiente del vital líquido. El sistema en estudio (cuenca hidrológica), es un sistema altamente complejo. Y lo llamamos complejo debido al gran número de elementos que se encuentran interrelacionados e interactúan entre sí para formar una serie de ciclos internos, en la realización de los procesos que mueven el funcionamiento total de la cuenca. Debido a esta complejidad, la técnica más adecuada para analizar este sistema, bajo los argumentos mencionados, es la técnica denominada Simulación Digital. En términos digeribles, significa plasmar el sistema real en un modelo matemático que pueda codificar y correr una computadora digital, incluyendo en este modelo las variables más relevantes, es decir aquellas que tengan una contribución significativa de acuerdo al fin que persigue el modelo. En el capítulo 3 se dedica un apartado especial para la explicación más detallada de esta técnica.

Para estar en posibilidad de atacar una problemática de esta magnitud, donde la supervivencia humana está de por medio, es indispensable conocer la naturaleza y magnitud del problema con la mayor exactitud posible, ya que de lo contrario poco podemos hacer para identificar e implementar planes efectivos que aminoren dicha problemática.

1.3 DELIMITACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Es importante señalar que la problemática se aborda en el sentido de la "cantidad" y no en cuanto a la "calidad" del agua. Esto se debe a que lo primero que se debe procurar es contar con el vital recurso, y posteriormente preocuparse por su nivel de contaminación, es

decir, si no tenemos agua ¿qué vamos a descontaminar?. Por tanto, lo primordial es la existencia, en cantidad suficiente, del agua en las cuencas de nuestro país.

De este manera, no intervendrán en el modelo factores o variables que únicamente provoquen la contaminación del vital líquido y no su cantidad.

El proceso para delimitar la problemática se puede observar en la figura 1.5. En esta gráfica se delimita el problema de la disponibilidad futura del agua superficial, afectado por sus principales causas como son: las precipitaciones anuales, el crecimiento de la población, las demandas de las diferentes actividades productivas de la zona, las capacidades para almacenar el agua de lluvia y los valores y concientización de la población en materia de ahorro de agua. En esta figura se puede observar, además, una clara delimitación de la problemática por atacar -una deficiente disponibilidad del agua superficial-, dejando de lado lo correspondiente a su calidad.

Otro aspecto para la delimitación de la problemática lo representa el hecho de que el aprovechamiento de las aguas superficiales representa el 91% del total del agua consumida en la cuenca. Por este hecho, el presente estudio se avoca solamente a las variables que envuelven únicamente el consumo de aguas superficiales. A esto podemos agregar, que el restante 9%, correspondiente a las aguas subterráneas del acuífero, no están en déficit, por el contrario existe disponibilidad para su aprovechamiento.

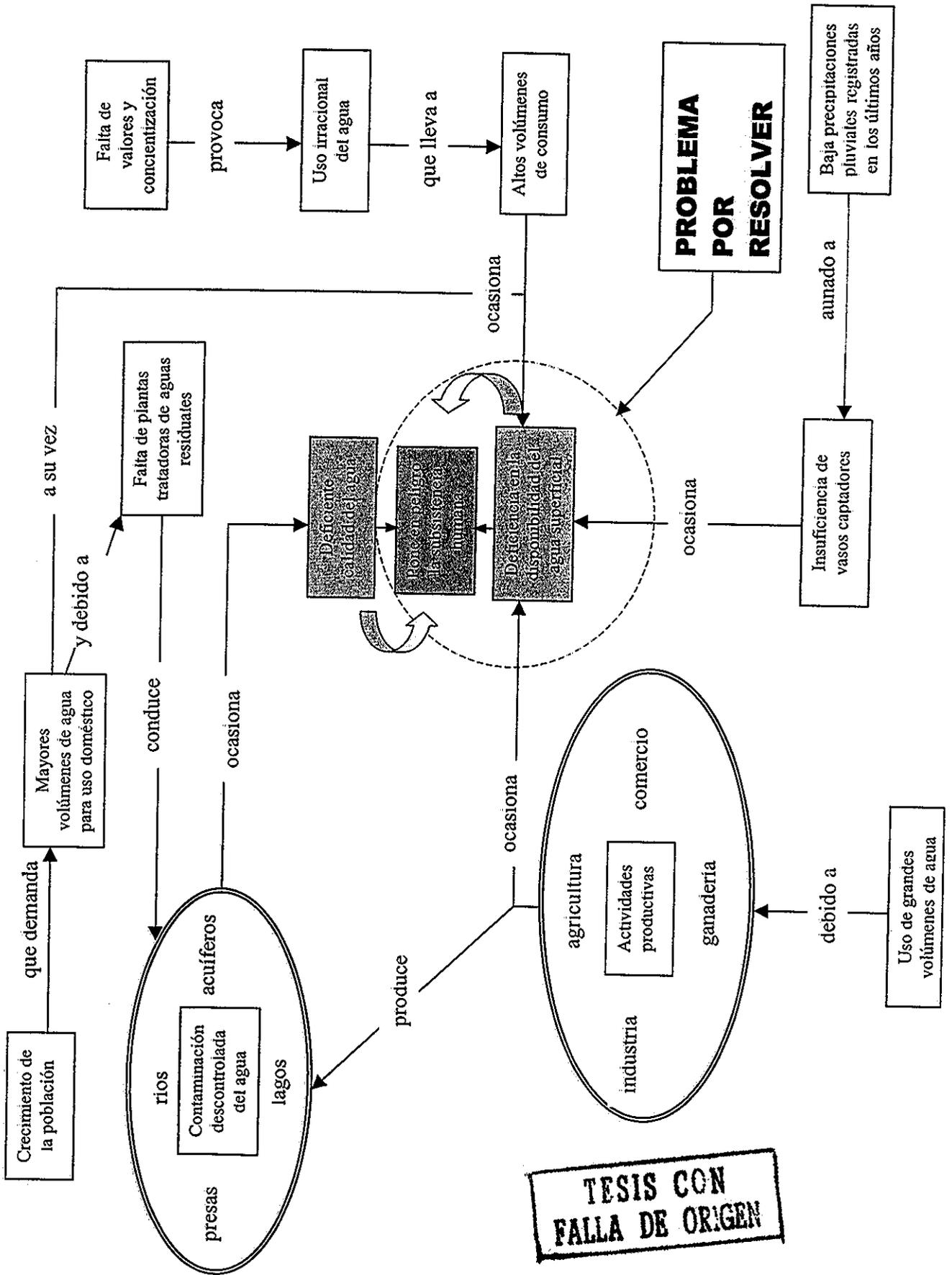
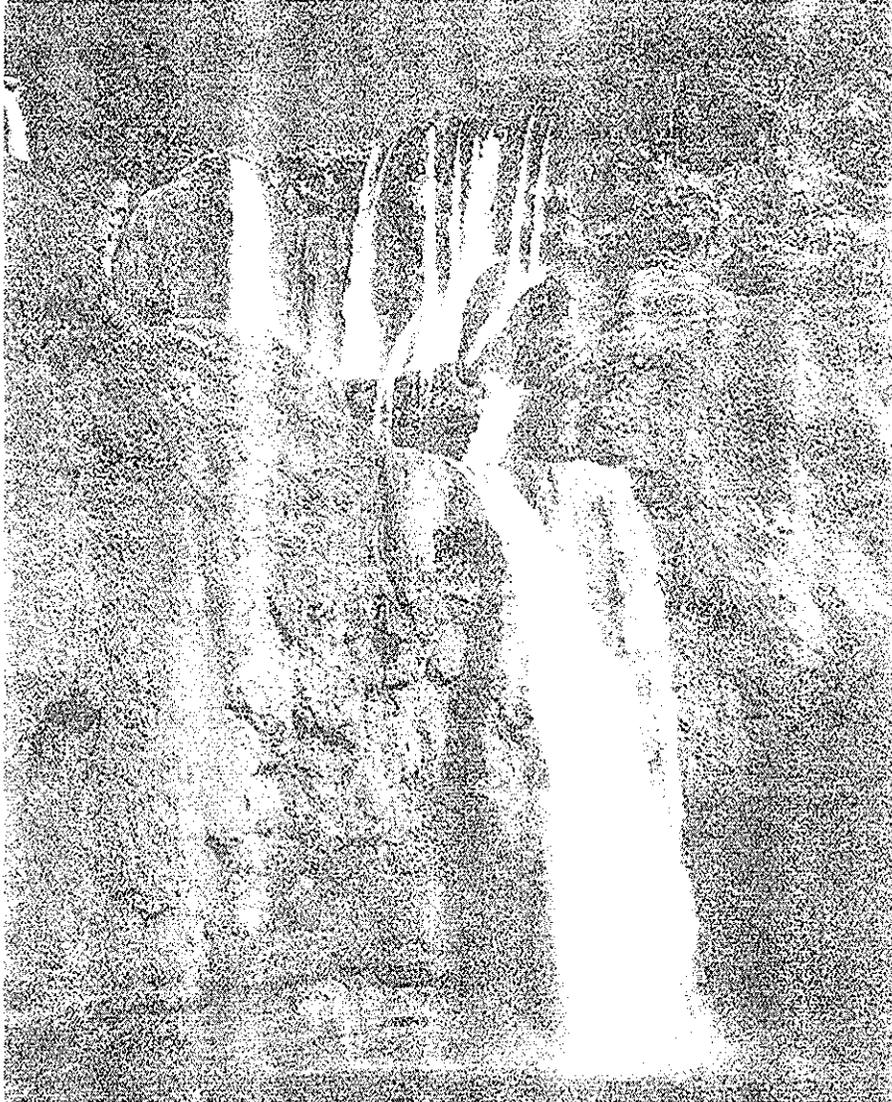


Fig1.5 Modelo conceptual para la delimitación de la problemática

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

CAPÍTULO 2



INFORMACIÓN PRELIMINAR

El 97.5% del agua en la tierra se encuentra en los océanos y mares de agua salada, únicamente el restante 2.5% es agua dulce. Del total de agua dulce en el mundo, 69% se concentra en los polos y en las cumbres de las montañas más altas en estado sólido.

El 30% del agua dulce mundial se encuentra en la humedad del suelo y en los acuíferos profundos. Sólo el 1% del agua dulce escurre por las cuencas hidrológicas en forma de arroyos y ríos y se deposita en lagos, lagunas y en otros cuerpos superficiales de agua y en acuíferos. Esta es el agua que se repone regularmente a través del ciclo hidrológico.⁸

2.1 EI CICLO HIDROLÓGICO

El agua existe en la Tierra en tres estados: sólido (hielo, nieve), líquido (lluvia) y gas (vapor de agua). Océanos, ríos, nubes y lluvia están en constante cambio: el agua de la superficie se evapora, el agua de las nubes se precipita, la lluvia se filtra por la tierra. Sin embargo, la cantidad total de agua en el planeta no cambia.

La circulación y conservación de agua en la Tierra se llama CICLO HIDROLÓGICO, o ciclo del agua. Cuando se formó, hace aproximadamente cuatro mil quinientos millones de años, la Tierra ya tenía en su interior vapor de agua. En un principio, era una enorme bola en constante fusión con cientos de volcanes activos en su superficie. El magma, cargado de gases con vapor de agua, emergió a la superficie gracias a las constantes erupciones. Luego la Tierra se enfrió, el vapor de agua se condensó y cayó nuevamente al suelo en forma de lluvia.

El complejo proceso del ciclo hidrológico es definido por Herbert del Valle Florencia:

El ciclo hidrológico inicia con la circulación del agua de mar por evaporación, formando nubes que penetran en los continentes provocando lluvias que escurren superficialmente formando ríos, arroyos y lagos, esta lluvia también se infiltra formando mantos freáticos y mantos profundos. De la superficie de agua libre de los ríos, arroyos, y lagos, el agua se evapora, formando nubes, que a su vez provocan lluvias y escurrimientos. Estos escurrimientos por medio de los ríos y arroyos, regresan al mar y este ciclo de acontecimientos se repite indefinidamente tomando el nombre de CICLO HIDROLÓGICO.

FASES DEL CICLO HIDROLÓGICO

La lluvia es el principal origen de todas las aguas utilizables por el ser humano. Ésta se puede definir como la condensación del vapor de agua contenido en la atmósfera y precipitado hacia la superficie del terreno. Este vapor de agua procede de la evaporación del agua de mar y del suelo y de la transpiración de los seres vivos.

Las etapas del ciclo hidrológico son: evapotranspiración, condensación y precipitación.

Evapotranspiración: Es la suma de la evaporación y la transpiración. La evaporación es la tasa neta de transporte de vapor hacia la atmósfera proveniente de una superficie de

⁸ Los Consejos de Cuenca en México, Definiciones y Alcances, CNA

agua libre o de un suelo saturado. La transpiración es la evaporación del agua sustraída del suelo por las plantas hacia la atmósfera a través de los estomas.

Condensación: Cuando una masa de aire se encuentra saturada con vapor de agua y se pone en contacto con una superficie líquida, se origina una disminución de temperatura que provoca la condensación y ésta continúa hasta que se establece el equilibrio de temperaturas entre la masa de aire y la superficie líquida.

Precipitación: La precipitación empieza cuando la temperatura continúa descendiendo y el vapor de agua alrededor de los núcleos de condensación se precipita. La atmósfera siempre contiene humedad aún cuando el cielo no esté nublado y aún en las regiones donde llueve poco, pero para que el proceso de la lluvia se origine se necesita que la atmósfera se enfríe a tal punto, que la humedad contenida en el aire llegue al 100% de saturación.

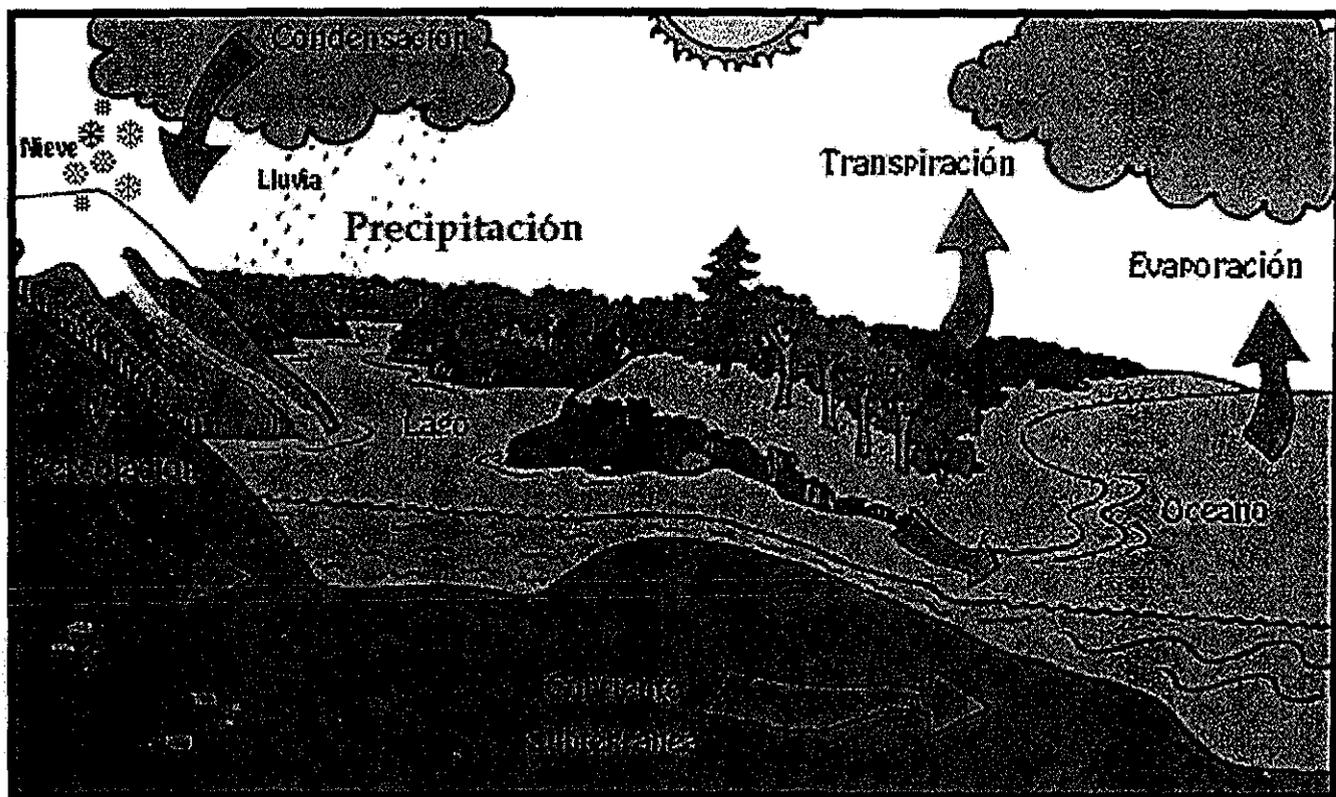


Figura 2.1 El ciclo hidrológico

2.2 LA CUENCA Y SUS CARACTERÍSTICAS

Una *cuenca* es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

Desde el punto de vista de su salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas *endorreicas* y *exorreicas*. En las primera el punto de salida está dentro de los límites de la

cuenca y generalmente es un lago; en las segundas, el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está conectado con la corriente de otra cuenca o con el mar. El *parteaguas* es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa las cuencas de las cuencas vecinas.

El *área* de la cuenca se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el *parteaguas*.

La *corriente principal* de una cuenca es la corriente que pasa por la salida de la misma. Nótese que la definición se aplica solamente a las cuencas exorreicas. Las demás corrientes de una cuenca de este tipo se denominan *corrientes tributarias*. Las cuencas correspondientes a las cuencas tributarias se llaman cuencas tributarias o *subcuencas*.

2.3 EL RECURSO HIDRÁULICO A NIVEL NACIONAL

La precipitación media anual del país es de 772 mm, equivalente a un volumen de 1,528⁹ km³. Sin embargo, la orografía y las características propias de las latitudes, hacen que la distribución espacial y temporal de la lluvia sea muy irregular a nivel nacional.

En el ámbito nacional, el 27 % del agua que se precipita anualmente se transforma en escurrimiento superficial, que alimenta las 320 principales cuencas que conforman el total de cuencas del país. Los 417,000 Mm³ (millones de m³) de agua, que transportan los ríos, constituyen el escurrimiento medio anual disponible de agua superficial renovable.

Precipitación media histórica 1941-1999 (772 mm)	1,528 km³/año
Evapotranspiración media	1,095 km³/año
Escurrecimiento superficial virgen medio	417 km³/año *
Recarga natural media de acuíferos	66 km³/año
Disponibilidad natural media por habitante **	4,964 m³/año

* El escurrimiento superficial virgen medio incluye 48km³ proveniente de Guatemala, 1.8 km³ provenientes del río Colorado y se le deducen 0.44 km³ que se entregan a E.U.A. en el río Bravo.

** Dato obtenido considerando la suma de 417 km³ de escurrimiento superficial más 66 km³ de recarga de aguas subterráneas dividido por 97.3 millones de habitantes en 1999.

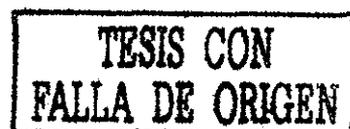
Tabla 2.1 Componentes del ciclo hidrológico nacional¹⁰

Los lagos y lagunas del país, constituyen una capacidad de almacenamiento de 14 mil Mm³. Adicionalmente, se han construido presas y con ello formado vasos de almacenamiento con una capacidad de alrededor de 150 mil Mm³ equivalente al 33 % del escurrimiento medio anual. Existen 4,500 presas en México, 840 están clasificadas como grandes presas (de acuerdo con la definición de la "International Commission on Large Dams" [ICOLD]). El 95 % del almacenamiento se concentra en 59 presas, con capacidad unitaria mayor a 100 Mm³.

Además de generar los escurrimientos superficiales, otra parte de la lluvia se infiltra y recarga los acuíferos, cuyo volumen de renovación natural se estima en poco más de 51

⁹ Un km³ equivale a mil millones de metros cúbicos.

¹⁰ Compendio Básico del Agua en México, Enero 2001, Comisión Nacional del Agua, pag. 5



mil Mm³ anuales. Los acuíferos que subyacen en las zonas de riego se alimentan por una recarga inducida, estimada en 15 mil Mm³ (tabla 2.1).

Se han identificado cerca de 600 acuíferos distribuidos en el territorio nacional, de los cuales 450 se consideran como acuíferos regionales, por su extensión, capacidad e importancia relativa.

Alrededor de 100 acuíferos están sometidos a sobreexplotación. Estos acuíferos suministran aproximadamente el 50% de la extracción nacional para todos los usos. Debido a la sobreexplotación, la reserva de agua subterránea se está minando a un ritmo de cerca de 8 km³ por año.

La disponibilidad permanente de agua subterránea, que es susceptible de aprovecharse, debe ser menor o igual que la recarga natural debido a que no es posible extraer la totalidad de ésta sin inducir efectos colaterales tales como, el agrietamiento del suelo o la migración de aguas fósiles, con altos contenidos de sales tóxicas.

Aunque todavía existen acuíferos subaprovechados; la sobreexplotación del agua subterránea es un problema que se ha generalizado en los últimos veinte años, principalmente en las zonas áridas y semiáridas, lo que ha ocasionado perjuicios prácticamente irreversibles, tales como intrusión salina, hundimiento del terreno y bombeos a profundidades prácticamente incosteables, especialmente para la agricultura.

2.3.1 Usos del agua

El uso del agua en México es predominantemente agrícola, el cual representa el 76.3% del consumo nacional.

** Además se evaporan 9 km³ de agua al año en las principales presas y lagos del país*

Uso	Origen		Volumen total (km ³)	Porcentaje de la extracción
	Superficial (km ³)	Subterráneo (km ³)		
Agrícola	47.9	16.9	64.8	82.7
Público Urbano	3.1	6.8	9.9	12.6
Industrial	2.0	1.7	3.7	4.7
Total	53.0	25.4	78.4	100.0

Tabla 2.2 Extracciones brutas de agua (datos para 1999)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

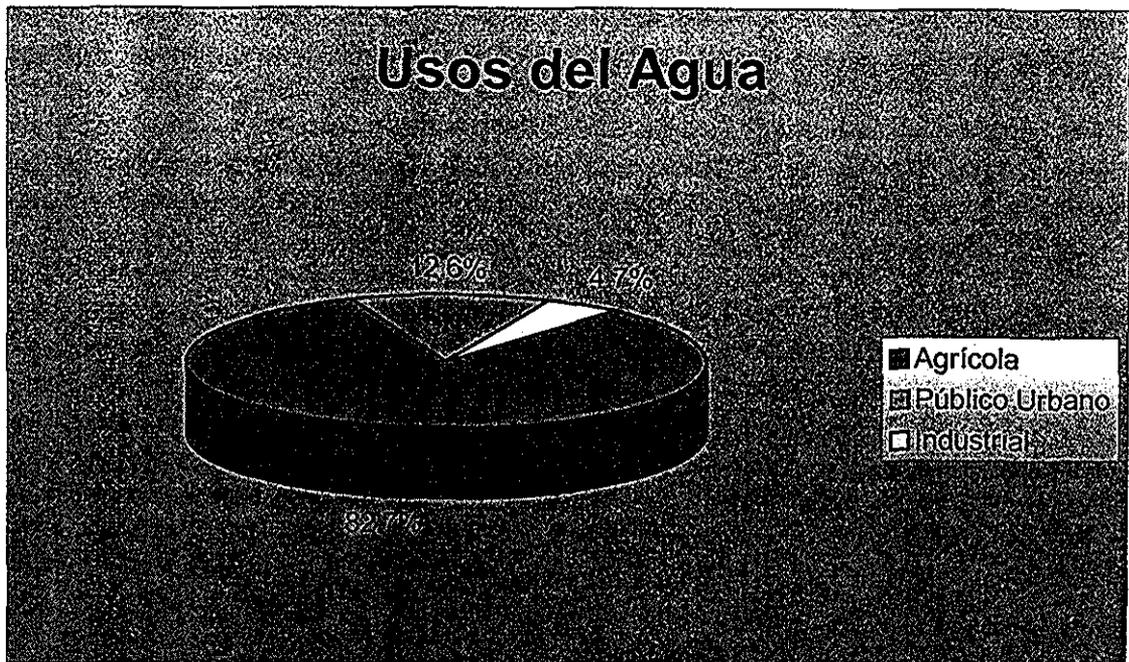


Figura 2.2 Porcentaje de extracción de agua por usos

2.4 LA ADMINISTRACIÓN DEL AGUA EN LA ACTUALIDAD

Con el nacimiento de la Comisión Nacional de Agua en el sexenio Salinista, una nueva época nace en torno a la administración, en el ámbito nacional, del recurso agua. En ese mismo sexenio la competencia hidráulica pasa de la antigua Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos a la también recién creada Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca en el año de 1988.

Con el nacimiento de este nuevo organismo desconcentrado surge la Ley de Aguas Nacionales y su reglamento que ve sustento en el artículo 27 constitucional que a letra dice:

La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originalmente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada.....

Esta ley establece tres cambios claves en la política de la administración hidráulica en el país con relación al pasado, y que viene a beneficiar 100% al usuario de las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes. Estos cambios son:

1. La desincorporación de los distritos de riego del gobierno federal para su transferencia a los usuarios. Esto permite eficientizar el proceso de administración y control de los distritos de riego.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2. La creación del Registro público de Derechos de Agua, donde se deben inscribir cada una de las concesiones de aguas nacionales en todo el país, formando un padrón de usuarios actualizado y confiable.
3. La creación de los Consejos de Cuenca para coordinar y concertar acciones entre los organismos gubernamentales, no gubernamentales y usuarios de las aguas nacionales dentro de una misma cuenca o región hidrológica.

2.4.1. La Comisión Nacional del Agua

Este organismo tiene entre sus principales responsabilidades administrar, controlar, planear y legislar el uso, consumo y distribución del agua y sus bienes públicos inherentes en México. Actualmente este organismo ha dividido el país en 13 regiones administrativas. Cabe señalar que la división de estas regiones no es de tipo política, sino más bien obedece a características hidrográficas, es decir, dentro de estas regiones se encuentra más de una cuenca hidrológica en su totalidad. Por lo que la administración del recurso en una cuenca se lleva a cabo desde una sola sede administrativa, mejorando la eficiencia y calidad de este servicio que presta la nación a sus usuarios. La figura 2.3 muestra gráficamente la ubicación y división de cada una de estas 13 regiones administrativas.

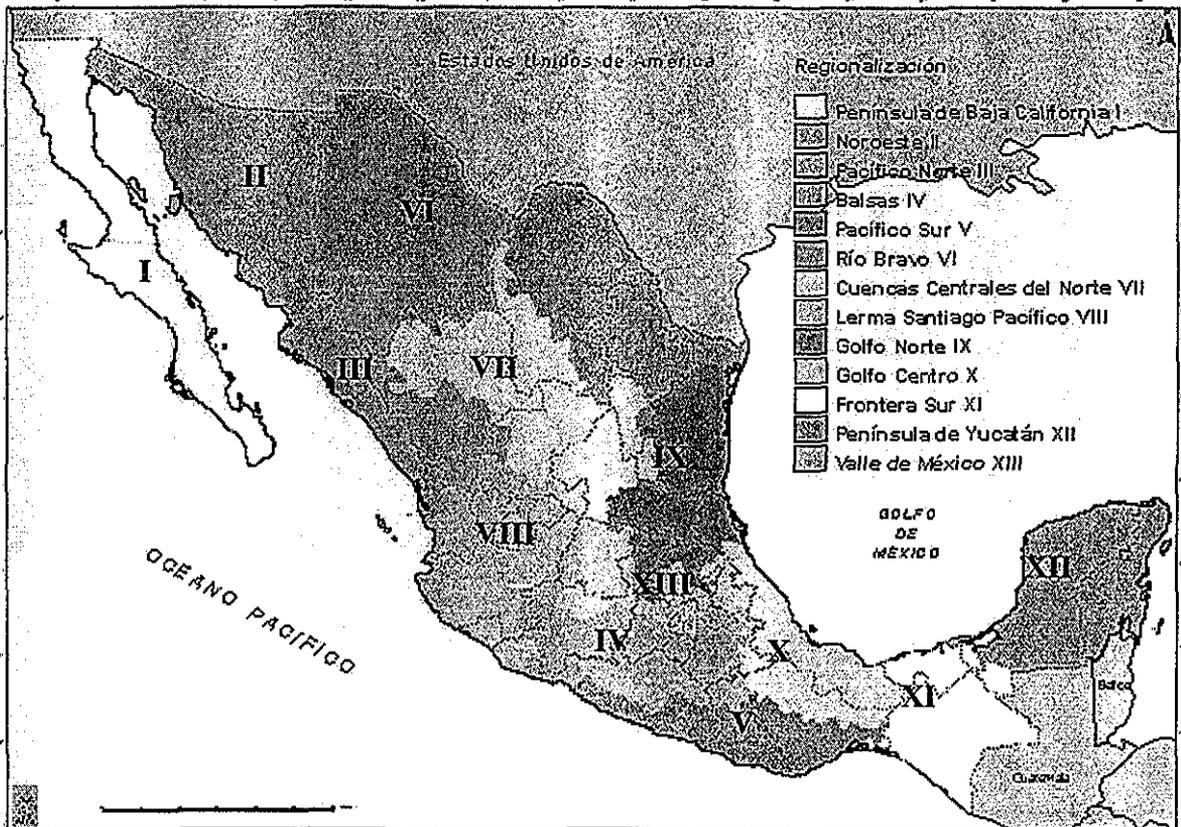


Figura 2.3 Regiones administrativas de la Comisión Nacional del agua

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

2.4.1.1 Región III Pacífico Norte

La cuenca hidrológica del río Culiacán pertenece a la región administrativa III denominada Pacífico-Norte. Esta región ocupa una extensión de 156,627 km², que representa el 8% de la superficie de la República Mexicana. De acuerdo con la división política del país, la región comprende la totalidad del estado de Sinaloa, parte de Chihuahua, Durango, Zacatecas y Nayarit; se encuentra conformada por 51 municipios. Considerando sus características hidrológicas, se divide en las Regiones Hidrológicas 10 y 11 y éstas a su vez en 13 cuencas hidrológicas. Destaca la región Hidrológica 10 con el 76% de la superficie regional además de comprender ocho cuencas (figura 2.4).

La cuenca del río Culiacán, indicada con la letra D en la figura 2.4 es la segunda mayor en superficie de la región, con un 14.1% de la superficie total, sólo después de la cuenca del río Fuerte con un 27.5%.

A su vez, con fines de planeación, la región Pacífico Norte ha sido dividida en cinco subregiones de planeación: subregión norte, centro-norte, centro-sur, Tuxpan y Guadiana.

Fuente: Gerencia de Planeación Hidráulica Subdirección General de Planeación CNA

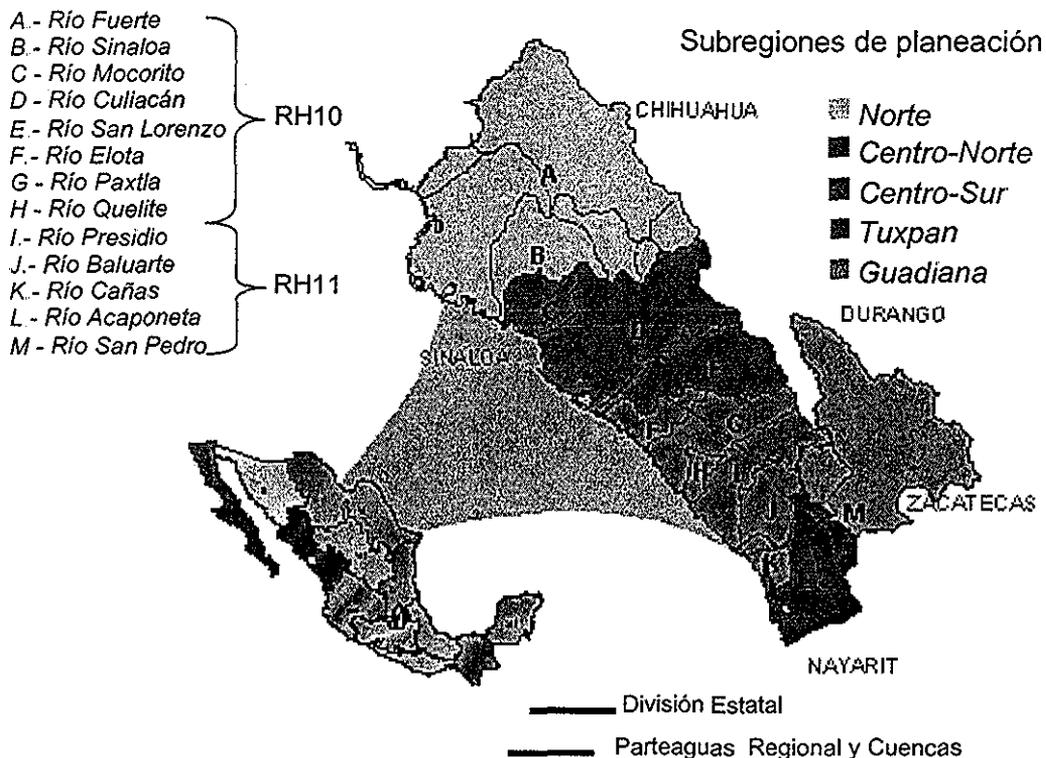


Figura 2.4 Región administrativa Pacífico-Norte

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Precipitación

La precipitación media anual en la región es de 819 mm, 5.4% mayor a la media nacional. Su comportamiento espacial describe franjas paralelas a la costa con valores mínimos y máximos en las partes altas, sobresaliendo dos zonas con escasa precipitación: una en la parte baja de la cuenca del río Fuerte, con menos de 300 mm anuales, y otra en el Valle del Guadiana en Durango, con valores mínimos de 600 mm, también se distingue una zona de lluvia abundante en la parte baja de los ríos San Pedro y Acaponeta con valores superiores a 1,500 mm.

Agua superficial

El escurrimiento virgen medio anual en la región es de 23,950 Mm³, que representa un 6% del total generado en el país.

La región es considerada como de alto riesgo ante la incidencia de ciclones y los fenómenos meteorológicos típicos de invierno que generan grandes avenidas en los ríos que conforman la hidrografía de la región; registrándose los caudales máximos más importantes en las cuencas de los ríos Fuerte (15,000 m³/s) y Culiacán (11,000 m³/s), ambos en invierno; y los ríos Acaponeta (16,000 m³/s) y Baluarte (14,140 m³/s), ambos en verano. La presencia de las grandes crecientes han provocado inundaciones año con año en la región.

Agua subterránea

En la región se tienen identificadas 23 zonas geohidrológicas, de las cuales 15 se encuentran en las costas y el resto como acuíferos interiores; ocupan 30,015 km², es decir, el 19% de la superficie total de la región. El 65 % de los acuíferos se localizan en la región Hidrológica 11. El acuífero del río Culiacán se identifica en la figura 2.5 con el código 2504. La recarga anual en la región se estima en 1mil 475 millones de metros cúbicos.

La extracción total de aguas subterráneas asciende a 854 millones de metros cúbicos anuales. El principal destino es el uso público urbano (48%), posteriormente la agricultura (47%), el industrial (4%) y el pecuario (1%).

Los datos anteriores llevan a un balance regional positivo entre la recarga y la extracción, sin embargo, los balances de los acuíferos de Canatlán, Santiaguillo y Vicente Guerrero-Poanas, muestran un déficit entre la extracción y la recarga, oscilando entre el 31%, 15% y 9% respectivamente.

También cabe destacar que en los acuíferos río Culiacán y río San Lorenzo, los niveles someros del agua propician una situación de exceso de agua en los terrenos agrícolas, por lo que se tienen problemas de drenaje, y en el caso particular de San Lorenzo, debido a una sobreexplotación temporal, se llegaron a presentar problemas de intrusión salina.

Tan sólo en 9 acuíferos se ha decretado veda del tipo de control, incluido el del Valle de Guadiana, que se encuentra sobreexplotado. Los otros 3 acuíferos sobreexplotados no cuentan con ningún tipo de veda.

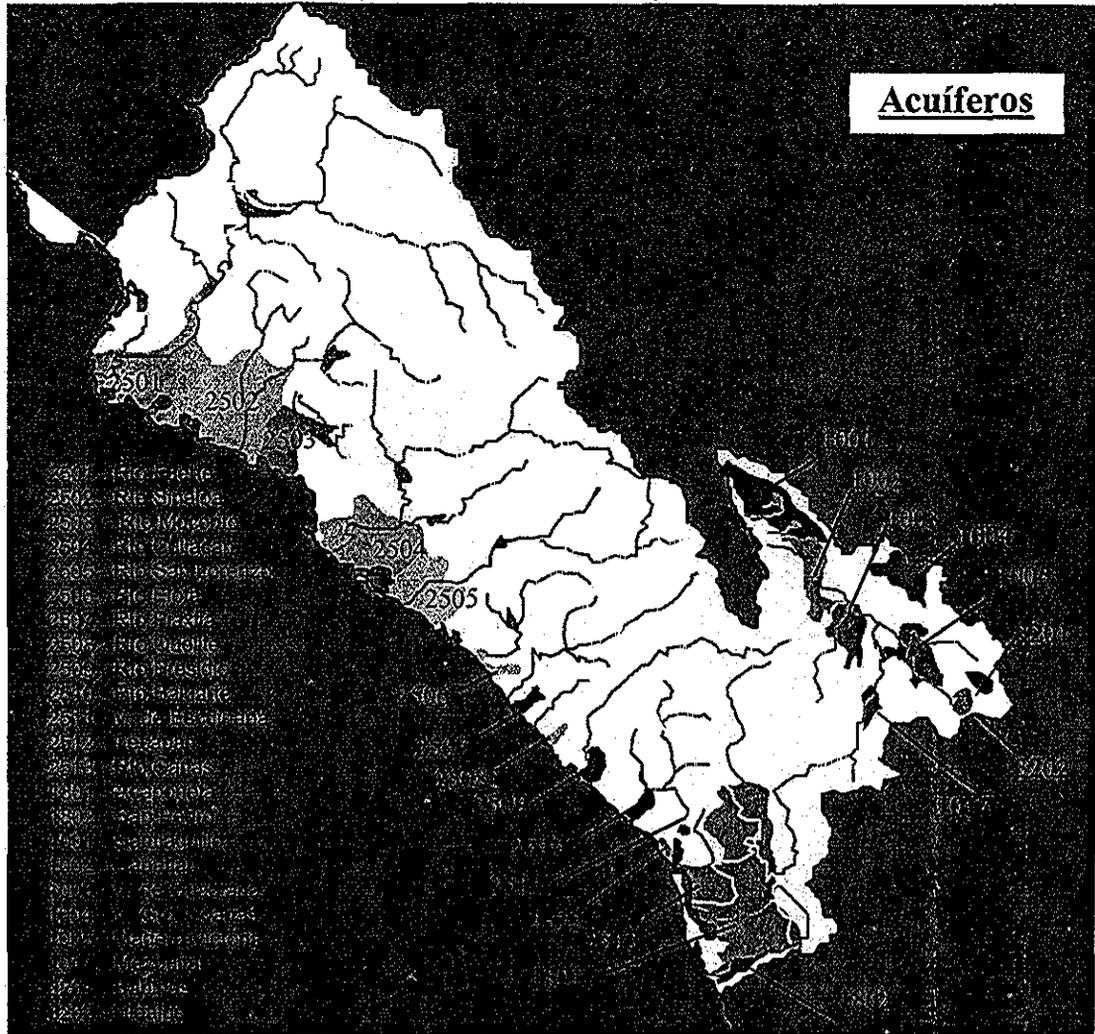


Figura 2.5 Acuíferos en la región Pacífico Norte

Usos del agua

En la región se tiene una demanda de agua de 10,200 Mm³ (millones de metros cúbicos), de la cual, el 92% considera como su fuente de abastecimiento a los escurrimientos superficiales. El sistema de usuarios demandante se conforma con: las necesidades de agua potable de sus 3.7 millones de habitantes, los volúmenes requeridos para la prestación del servicio de riego de 850,000 ha, los requerimientos de los 227 establecimientos industriales más importantes, los volúmenes requeridos para el abrevadero de 2.7 millones de cabezas de ganado bovino y 38.3 millones de aves entre otras especies, los caudales requeridos para la generación de energía en seis hidroeléctricas y dos termoeléctricas.

- Agrícola

En la región se atiende con servicio de riego a 850,000 ha distribuidas en ocho distritos de riego. El 96% de la superficie se localiza en la región Hidrológica 10 en seis distritos, destacando por la magnitud de la superficie beneficiada las cuencas del río Fuerte, Culiacán, Sinaloa y San Lorenzo; y el restante 4% en la región Hidrológica 11, en dos distritos de riego en la cuenca del río San Pedro (figura 2.6).

La demanda requerida para este uso es de 9,486 Mm³, utilizando como fuente de abastecimiento las aguas superficiales de la región en un 95%. Las áreas bajo riego presentan en promedio una eficiencia de riego del 60%, con una variación entre distritos desde un 52% en el DR Mocorito y del 65% en el DR San Pedro Mezquital. La lámina bruta promedio de riego regional es de 109 cm, con valores mínimos de 79 cm en el DR San Pedro y máximos de 119 cm en Guasave, aspecto que refleja la baja eficiencia de los grandes sistemas. Los principales cultivos de la región son el algodón, maíz, jitomate y sorgo. Respecto a las unidades de riego, al no darse seguimiento a su operación, no se dispone de información respecto a su situación física, eficiencias y volúmenes aprovechados.

- Agua potable

En 1999 los 3.87 millones de habitantes de la región, disponían de un nivel de servicio de agua potable del 94%, el cual en los centros de población urbanos es del 95% y del 70% en los rurales, en general valores superiores a la media nacional. Las características de las 15 mil 454 localidades ubicadas en la región, muestran que la población presenta una alta concentración en las seis ciudades principales, y una gran dispersión de las localidades rurales.

Fuente: Gerencia de Planeación Hidráulica, Subdirección General de Planeación. CNA

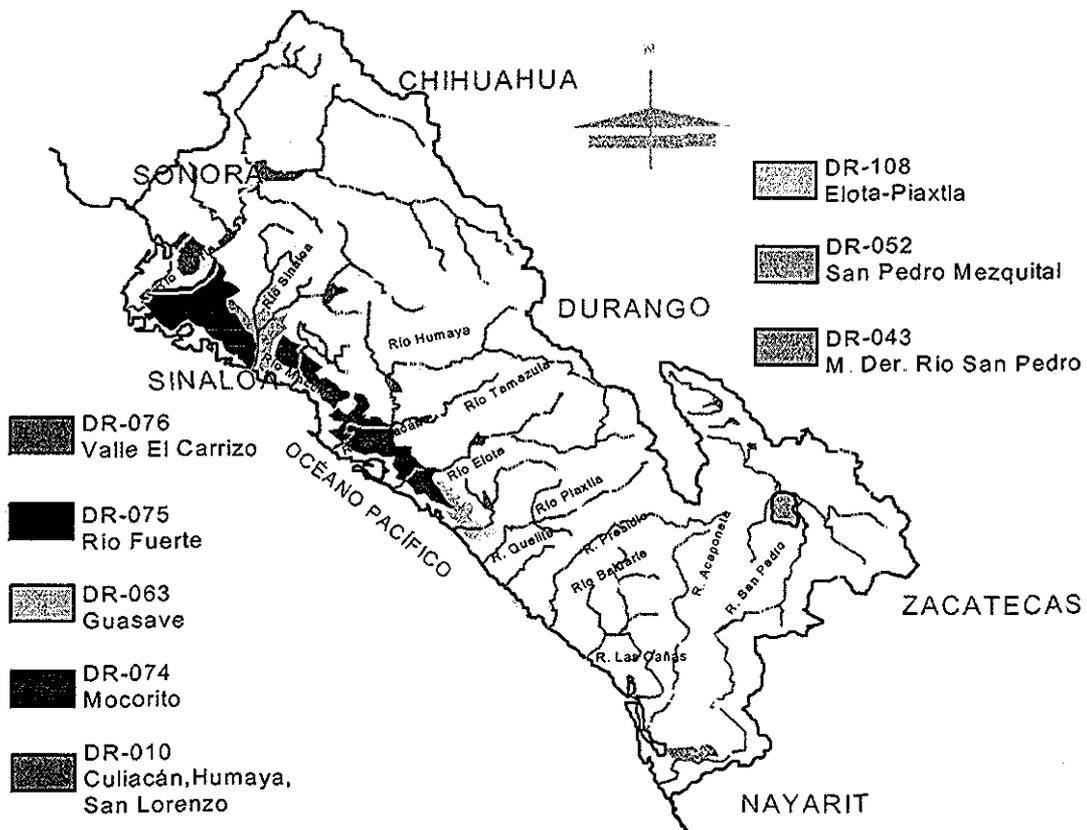


Figura 2.6 Localización de los distritos de riego en la región Pacífico Norte.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Para abastecer de agua a la población, en 1999 se extrajo un volumen de 612 Mm³. El 68% de este volumen proviene de las aguas subterráneas. El 57% de la extracción se realiza en las cuencas de los ríos Culiacán, Sinaloa, Fuerte, Presidio y San Pedro, aspecto provocado porque en ellas se ubican los 6 centros principales de población en donde se extrae el 67% del volumen abastecido. En consecuencia, la dotación promedio regional resulta de 465 l/hab/día, valor superior a la recomendada.

- Industrial

La demanda de agua para uso industrial en la región asciende a 102 Mm³. El 62.6% de este volumen es demandado por la industria azucarera, constituida por 3 ingenios azucareros, siendo la industria más importante de la región, seguida en orden de importancia por la industria del papel, y de agro-productos y alimentos, que demandan el 7% y 5%, respectivamente. Las actividades relacionadas con las empacadoras de pescado y mariscos son de gran importancia económica para la región, pero no como demandante de agua, ya que sus demandas registradas son muy bajas. En cuanto a la demanda por cuencas, las más importantes son las de los ríos Fuerte, Culiacán y San Pedro, ya que las industrias enclavadas en estas cuencas, demandan en conjunto, el 91% del volumen para uso industrial en la región.

La industria azucarera demanda un volumen anual de 47.6 Mm³, del cual el 97% proviene de aguas superficiales. Toda la industria azucarera se ubica en la región hidrológica 10 y principalmente en la cuenca del río Fuerte en la que se localiza el ingenio de los Mochis, le sigue en importancia la cuenca del río Culiacán con los ingenios de El Dorado y Proazúcar. Es importante mencionar, que aunque el ingenio El Dorado se ubica físicamente en la cuenca del río Culiacán, se abastece de las aguas provenientes del río San Lorenzo.

- Generación de energía eléctrica

Para la generación de energía eléctrica en la región, las centrales hidroeléctricas demandan un volumen medio anual de 10,986 Mm³ de aguas superficiales, mientras que las termoeléctricas demandan un volumen de 984 Mm³ de agua de mar, misma que es utilizada para el enfriamiento de equipos. Estos volúmenes son de uso no consuntivo, por lo que no afectan el balance hídrico de la región.

La fuente que abastece principalmente este tipo de uso es la del río Fuerte con el 62%, el segundo en importancia es el río San Lorenzo con el 6%, por último el río Culiacán con el 5%. El agua de mar es utilizada mayoritariamente en la cuenca del río Presidio para abastecer a la termoeléctrica J. Aceves Pozos y en la termoeléctrica Juan de Dios Batíz, ubicada en la cuenca del río Fuerte.

- Acuicultura

Existen en la región cerca de 350 mil hectáreas dedicadas a esta actividad, que incluyen las aguas costeras protegidas, aptas para el aprovechamiento de diversos maricultivos. La actividad acuícola cuenta con la tecnología y la experiencia necesaria para la producción de 26 especies de crustáceos. La superficie de granjas en operación y en proyecto, de la región, comprende apenas 426 hectáreas. El área apta para esta actividad se calcula en 1 mil 600 ha. La mayor demanda de agua es obtenida de los cuerpos de agua ubicadas principalmente en las cuencas de los ríos Culiacán y Acaponeta con 38 Mm³, y de las aguas salobres provenientes de mezcla de agua dulce y de los aportes marinos.

- Pecuario

La demanda para la atención del ganado en la región, es de 13 Mm³/año. El ganado bovino, es el que más agua demanda. Se concentra en las cuencas de los ríos San Pedro y Fuerte. Cabe señalar que la demanda de este uso es requerida principalmente para el riego de la superficie dedicada al cultivo de forrajes.

Balances hidráulicos

- Escurrimientos superficiales

Considerando que el escurrimiento virgen medio anual de la región es de 23,950 Mm³ y que la demanda de estas aguas por sus sistemas de usuarios, principalmente para riego agrícola, es de 10,200 Mm³ del tipo consuntivo, el balance hidráulico a nivel de sus trece cuencas resulta como sigue:

- *En el 23% se presentan déficit para cubrir los requerimientos de los usuarios.*
- *Otro 23% se encuentra en una situación de equilibrio.*
- *El 8% se encuentran en condiciones de disponibilidad de agua.*
- *Y el 46% restante actualmente presenta abundancia de agua, después de atender los requerimientos (ver figura 1.4).*

En el entorno de las regiones hidrológicas, la situación es:

- *En la región hidrológica 10, prácticamente no se cuenta con disponibilidad para atender nuevos requerimientos de agua, a excepción de las cuencas de Piaxtla y Quelite.*
- *En la región hidrológica 11, se dispone de recursos para apoyar su desarrollo socioeconómico.¹¹*

- Aguas subterráneas

La recarga media anual de los 23 acuíferos identificados en la región Pacífico Norte es de 1,475 Mm³ y la extracción de estas aguas por el sistema de usuarios es de 941 Mm³; en consecuencia a nivel regional se considera que existe una disponibilidad de 534 Mm³. Sin embargo, en la región Hidrológica 11, en el estado de Durango, se ha identificado que los acuíferos Santiaguillo, Canatlán y Vicente Guerrero-Poanas están sobreexplotados.

2.4.1.2 Consejos de Cuenca

La creación de los consejos de cuenca encuentra sustento en el artículo 13 de la Ley de Aguas Nacionales.

En el corto y mediano plazo, los consejos de cuenca tendrán como objetivo ser instancias de coordinación y concertación entre los tres niveles de gobierno y los usuarios del agua, con el fin de que el proceso de planeación de la región conlleve un enfoque multidisciplinario e incluyente.

¹¹ Lineamientos regionales, Región III Pacífico Norte, Gerencia de Planeación Hidráulica, CNA

En el largo plazo, ya constituido como una organización administrativa y financieramente sostenible, tendrá como objetivos: la formulación y ejecución de programas y acciones para la mejor administración del agua; el desarrollo de la infraestructura hidráulica y de los servicios respectivos; y la preservación de los recursos de la cuenca. Además, es en el ámbito de los consejos de cuenca donde la CNA podrá concertar con los usuarios las posibles limitaciones temporales a los derechos existentes para enfrentar situaciones de emergencia, escasez extrema, sobreexplotación o reserva.¹²

Por tanto la misión de los consejos de cuenca es:

- *Mejorar la administración de las aguas*
- *Desarrollar la infraestructura hidráulica*
- *Preservar los recursos de la cuenca*

2.5 LA CUENCA HIDROLÓGICA DEL RÍO CULIACÁN

2.5.1 Características generales

Localización. Colinda al norte con la cuenca de los ríos Sinaloa, Fuerte y Mocorito; al este con el parteaguas de la subregión hidrológica No. 36; al sur, con la cuenca del río San Lorenzo, y por el oeste con el océano Pacífico.

Nacimiento. El nombre, como tal, lo toma de su paso por la ciudad de Culiacán, capital del estado de Sinaloa, en la confluencia de los ríos Humaya y Tamazula. Su cauce es poco profundo y divagante y mide unos 72 km hasta su desembocadura. El río Humaya tiene su origen en el estado de Durango y recibe la aportación de los ríos Colorado, Los Lobos y Badiraguato, entre otros. El río Tamazula nace en el estado de Durango y su longitud, hasta la ciudad de Culiacán, es de 165 km (ver figura 2.7).

Área. Esta cuenca, por su tamaño, ocupa el segundo lugar en extensión, en la región Hidrológica 10. El área total de la cuenca es de 22 mil 056 km², incluyendo una área de 5 mil 415 km² de grupos de corrientes. Considerando sus principales afluentes, se tiene que, hasta la ciudad de Culiacán, el río Humaya tiene una extensión de cuenca de 11 mil 636 km² y el río Tamazula de 4 mil 095 km². Sumando ambas áreas, nos resulta el área drenada de la cuenca, hasta la estación Puente Sudpacífico, de 15 mil 731 km².

Presas. Sobre el río Tamazula se encuentra la presa Sanalona y sobre el Humaya la presa Adolfo López Mateos. Recientemente se construyó, sobre el arroyo El Bledal, la presa Ing. Juan Guerrero Alcocer, como medida de protección para la ciudad de Culiacán contra inundaciones, ya que dicho arroyo desemboca en el río Tamazula, aguas abajo de la presa Sanalona. La capacidad de almacenamiento útil de las tres presas es de 3,871 Mm³ (ver tabla 2.3).

¹² Programa Hidráulico 1995-2000, CNA

Fuente: Gerencias Estatales, Subgerencias Técnicas, CNA

Nombre	Cuenca	Corriente	Capacidad (Mm ³) ¹³		
			Azolves	Conserv. (NAMO)	Control (NAME)
Adolfo López Mateos	Río Culiacán	Río Humaya	31	3,072	3,982
Sanalona	Río Culiacán	Río Tamazula	10	740	1,056
Juan Gro. Alcocer	Río Culiacán	A. El Bledal	4	59	102

Tabla 2.3 Almacenamientos en la cuenca hidrológica del río Culiacán

Escurrimiento. La estación hidrométrica Puente Sudpacífico proporcionó información de escurrimientos para el periodo de 1924 a 1958. Los reportes de esta estación dan un volumen promedio de escurrimiento de 3,141 Mm³ anual.

Fuente: INEGI, Gerencias estatales, CNA.

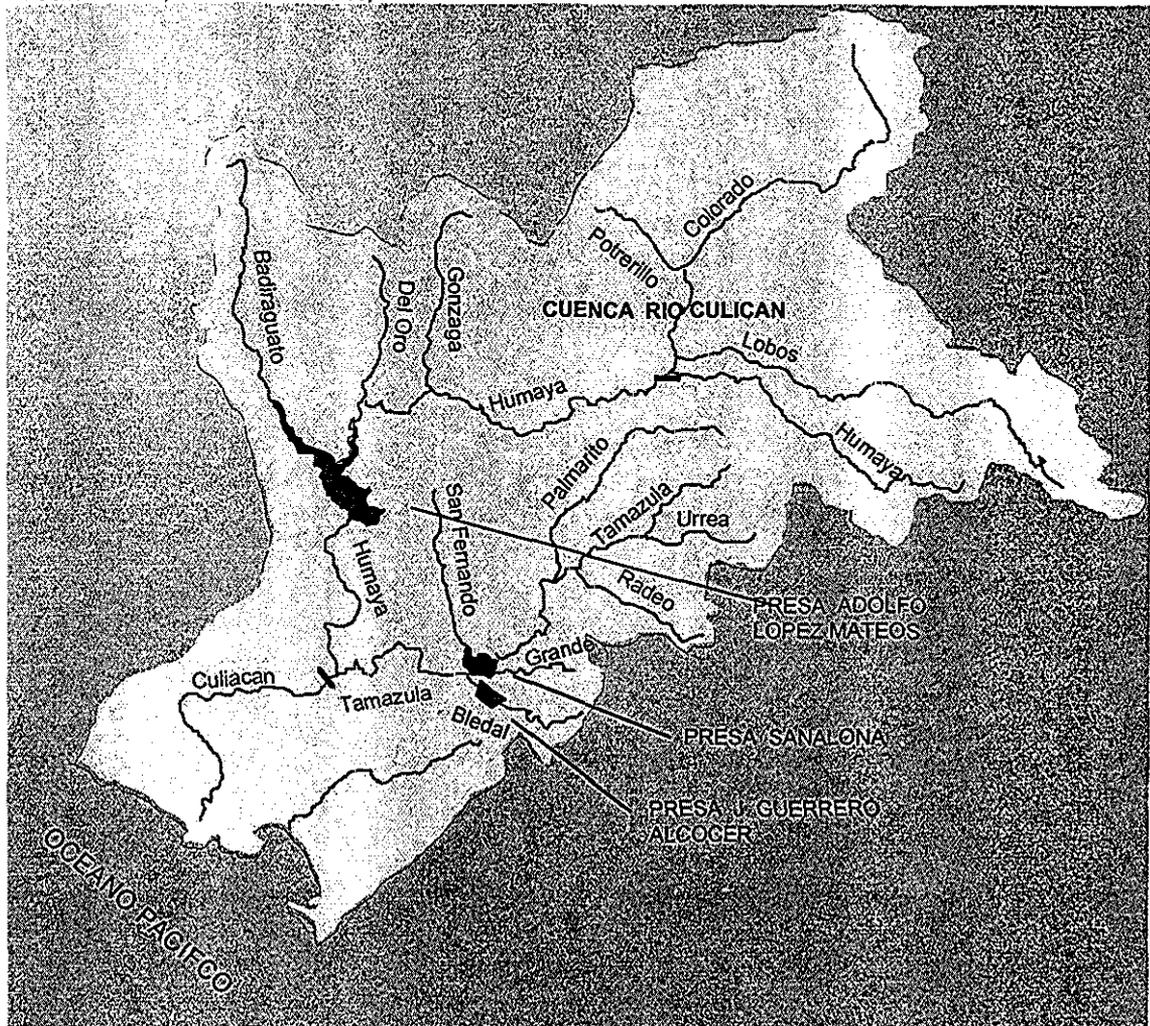


Figura 2.7 Cuenca hidrológica del río Culiacán

¹³ Millones de metros cúbicos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Aprovechamientos. La cuenca demanda un volumen anual de 2,744.4 Mm³, el cual es extraído por 268 aprovechamientos; 220 corresponden a aprovechamientos de agua superficial y 48 de agua subterránea.

Situación demográfica. Según datos del censo 2000, la cuenca hidrológica tiene un total de 903,439 habitantes, lo que representa un 24.4% de la región Pacífico Norte. La densidad es de 41 hab/km².

2.5.2. Datos hidrológicos

Precipitación. La precipitación media anual del país es de 772 mm, equivalente a un volumen de 1,528 km³. La precipitación media anual de la región III es de 819 mm, estimada por el método de las isoyetas, equivalente a 128,351 Mm³ precipitados. Como puede observarse en la tabla 2.4, la precipitación media mensual de la cuenca (902 mm) es mayor que la media regional y nacional.

Fuente: Gerencias Estatales, CNA

Cuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Río Culiacán	49	16	13	7	9	71	222	210	141	73	37	51	902
Región III	38	10	7	3	6	56	211	207	152	69	30	31	819

Tabla 2.4 Distribución de la precipitación media mensual (mm)

A nivel estacional, se presentan las principales épocas de lluvia:

- Lluvias de verano, entre los meses de junio a octubre. Éstas se caracterizan por ser lluvias intensas de corta duración influenciadas por sistemas convectivos locales y presencia de ciclones tropicales.
- Lluvias de invierno, entre los meses de noviembre y enero. Se caracterizan por ser generalmente de poca intensidad y larga duración; son ocasionadas por convergencias, vaguadas y frentes fríos, provenientes del norte coinciden con zonas de baja presión que traen humedad del Océano Pacífico y que han generado avenidas extraordinarias en los años de 1949, 1991 y 1992.
- Lluvias en meses secos: comprende los meses de febrero a mayo. Se caracterizan por lluvias esporádicas de baja intensidad y periodos de corta duración. El mes menos lluvioso es mayo, en algunos años es nula la precipitación.

Evaporación. Para el río Culiacán, las evaporaciones medias mensuales y anual se presentan en la gráfica 2.5.

ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
36	94	154	195	228	155	61	65	12	52	62	32	1,146

Tabla 2.5 Evaporación real media mensual (mm)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Temperatura. Las temperaturas máximas y mínimas registradas en la cuenca se muestran en la tabla 2.6. Predominan las temperaturas altas en temporada de verano.

	ene	feb	mar	abr	may	jun	Jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Med.	16.9	17.9	19.6	21.7	24.1	26.9	25.9	25.6	25.2	23.6	20.3	18.1	22.2
máx.	35.2	36.4	38.8	40.1	41.2	41.1	41.3	39.2	39.2	38.1	37.0	35.4	41.3
mín.	-0.7	-0.5	0.3	3.4	6.0	9.9	11.9	12.8	10.2	7.0	1.1	-0.2	-0.7

Tabla 2.6 Temperaturas medias, máximas y mínimas promedio registradas en la cuenca hidrológica del río Culiacán (°C)

2.5.2.1 Agua superficial

Escurrecimientos

La estación, cuyos datos se utilizaron para determinar los volúmenes escurridos en la cuenca es la estación puente sudpacífico. Registrando un volumen medio anual de 3,141 Mm³ y un gasto máximo de 11,000 m³/seg el día 9 de diciembre de 1943. Los gastos máximos registrados están relacionados con efectos ciclónicos (ver tabla 2.7).

Fuente: Gerencias Estatales, CNA

Cuenca	Época de lluvia			Época de Volumen	
	invierno	verano	Total	estiaje	total
Río Culiacán	555	2 174	2 729	412	3 141
%	17.7	69.2	86.9	13.1	100

Tabla 2.7 Escurrecimiento medio anual en época de lluvia y estiaje (Mm³ / año)

Factor de escurrecimiento. El factor de escurrecimiento, por cuenca, se determina tomando como base la precipitación media de cada cuenca, aplicada al área drenada, la cual corresponde a la estación de medición de los escurrecimientos. Obtenido de esta manera el volumen precipitado, se relacionó éste, con el escurrecimiento medido; el resultado obtenido nos determina el factor medio de escurrecimiento, como se muestra en la tabla 2.8.

Precipitación media mm	Área drenada km ²	Volumen precipitado Mm ³	Volumen escurrido Mm ³	Factor de escurrecimiento
902	15,731	14,189	3,141	0.22

Tabla 2.8 Factor medio de escurrecimiento en la cuenca del río Culiacán

El volumen precipitado se obtiene de la multiplicación de la precipitación media y el área drenada. El factor de escurrecimiento se calcula de la división entre el volumen escurrido y el volumen precipitado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La figura 2.8 muestra los escurrimientos promedio mensual en el río Culiacán, según datos proporcionados por la estación hidrométrica sudpacífico.

2.5.2.2. Agua subterránea

Las estimaciones de la cantidad de agua subterránea se apoyan en gran medida en la ecuación de balance, aplicado a un acuífero o a una parte del mismo en determinado intervalo de tiempo; o lo que es igual, la cantidad de agua existente, más las entradas menos las salidas en dicho intervalo de tiempo. Si se logran cuantificar las entradas y salidas, es posible establecer políticas racionales de aprovechamiento, con la flexibilidad de variar temporalmente la explotación al utilizar el almacenamiento en las épocas de mayor necesidad del fluido y dejando que se almacene de nuevo en otros momentos.

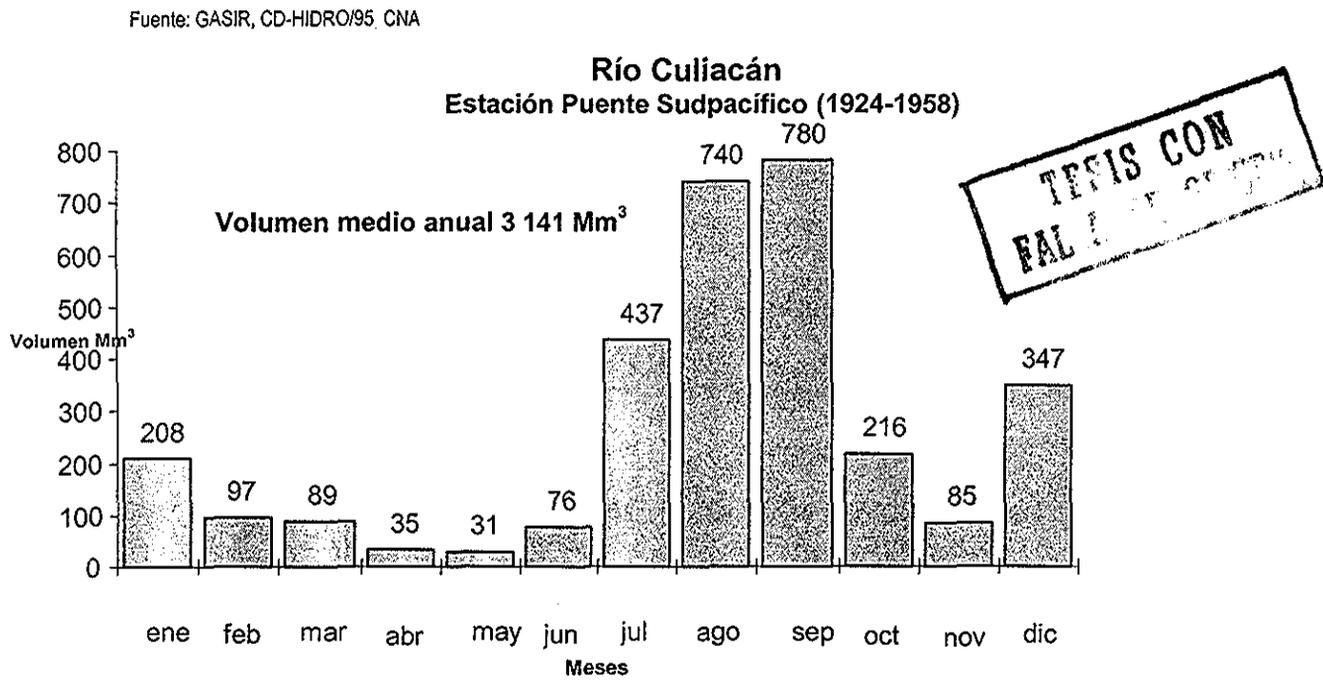


Figura 2.8 Volúmenes medios mensuales del río Culiacán

La utilización del agua subterránea en la región se distribuye en actividades agrícolas, uso público urbano e industrial entre otros. La calidad del agua es variable en su sabor, predominando los acuíferos de agua dulce. Existe agua con calidad deficiente, atribuible a factores como la intrusión salina, lixiviación de suelos o deficiencia en el drenaje agrícola, así como al termalismo y formaciones evaporíticas, que por contacto alteran la calidad del agua.

El acuífero del río Culiacán se sitúa en la cuenca hidrológica del río Culiacán, en la zona central del estado de Sinaloa. De forma irregular, este acuífero limita al norte y al este con las estribaciones de la Sierra Madre Occidental, al este con la zona del río San Lorenzo, al sur con el Océano Pacífico y al oeste con los cauces del río Culiacán y del arroyo Pericos. Esta zona geohidrológica tiene una superficie de 2 mil 720 km². En la parte baja del

acuifero se ubica el Valle de Culiacán, donde se encuentra el Distrito de Riego No. 010. Los datos generales de este acuifero, se muestran en la tabla 2.9.

En la zona del valle del río Culiacán existen 389 aprovechamientos subterráneos (152 pozos y 237 norias). La profundidad de las obras varía en un rango muy amplio, desde norias de poca profundidad, hasta pozos de más de 250 metros, predominando una profundidad promedio de 60 a 70 metros.

La extracción media anual del acuifero del río Culiacán es de 115.50 Mm³, mientras que la recarga es de 200 Mm³, la que proviene principalmente de la infiltración de los cauces de los arroyos, ríos y de los canales artificiales construidos para fines agrícolas. Conviene resaltar que parte de la infiltración regresa a la superficie a través de este sistema de drenaje (drenes), por lo que no se le considera una recarga efectiva. Esta zona se beneficia también con el agua superficial que se almacena en las presas Adolfo López Mateos, Sanalona y José López Portillo (Comedero). La disponibilidad del acuifero es de 84.50 Mm³.

Actualmente el acuifero se encuentra subexplotado registrándose niveles estáticos con profundidades mínimas de 2 m en las proximidades del río y máxima de 6 a 12 m en las partes altas, en los lugares más alejados de esta corriente. La evolución de los niveles estáticos es positiva, debido a los efectos producidos por la recarga. Esta situación ha propiciado que en la parte baja de este valle se presenten niveles freáticos someros, recomendando, por lo tanto, operar nuevas fuentes para abatir estos niveles y construir drenes en las zonas afectadas.

Área, km ²	2 720
Recarga, Mm ³	200
Extracción, Mm ³	115.5
Disponibilidad, Mm ³	84.5
Condición geohidrológica	Subexplotado
No. de aprovechamientos	389
Principales usos:	Agrícola, agua potable, industrial, doméstico, y pecuario

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Tabla 2.9 Datos generales del acuifero del río Culiacán

El agua se emplea esencialmente en el uso agrícola, seguido de los usos doméstico, industrial y pecuario.

El acuifero se encuentra en zonas de veda de control decretadas para el Valle de Pericos y para el Distrito de Riego del río Culiacán, disposiciones publicadas en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 27 de marzo de 1958.¹⁴

¹⁴ Aunque esta tesis no aborda la disponibilidad del agua subterránea, creemos que es importante brindar al lector un panorama general de la situación que guarda el acuifero de la cuenca, como información adicional.

2.5.3. Usos del agua

El principal uso del agua en la cuenca del río Culiacán es agrícola, el cual representa el 92% del total de la cuenca. Este volumen se utiliza principalmente para satisfacer la demanda del distrito de riego 010. La figura 2.9 muestra la distribución proporcional del agua para los diferentes usos en la cuenca.

La extracción de agua superficial corresponde al 91% del volumen total extraído en la cuenca. El resto 9% se extrae de los mantos acuíferos. Es observable la gran importancia que se le debe dar al agua superficial en la elaboración de un estudio de disponibilidad en esta cuenca. Con estos datos justificamos la razón por la que se tomará en cuenta solamente el agua superficial en el modelo de simulación a desarrollar.

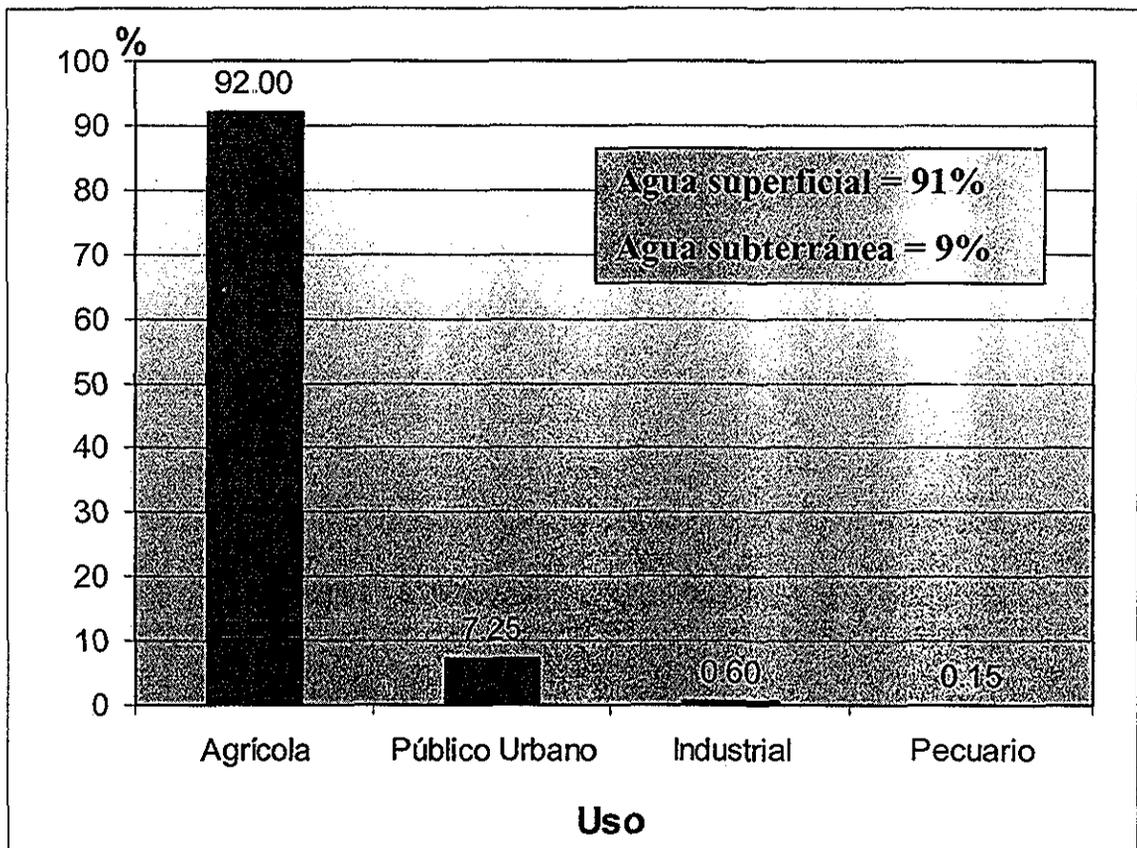


Figura 2.9 Distribución del agua superficial por usos en la cuenca río Culiacán

Agrícola

El mayor volumen del agua en la cuenca se destina al uso agrícola, cuya demanda principal se localiza en el distrito de riego 010. Este distrito se encuentra asentado en los municipios de Culiacán, Navolato, Mocorito, Angostura y Salvador Alvarado, en el estado de Sinaloa; fue creado el 8 de octubre de 1952 y puesto en operación en enero de 1953. La superficie bajo riego del distrito es de 199,751 ha.

Las fuentes principales de abastecimiento del distrito la constituyen aguas del embalse de las presas: Sanalona, José López Portillo y Adolfo López Mateos; cada una de ellas con

capacidad útil de: 804 Mm³, 2,100 Mm³, 2,365 Mm³ respectivamente; 97 pozos profundos, 4 plantas de bombeo; así como los canales principales: Oriental El Dorado, Rosales, Humaya, San Lorenzo Viejo, San Lorenzo Nuevo, Colorado, Colorado Nuevo y Rojo.

El programa de transferencia del distrito 010 se realizó oficialmente el 31 de enero de 1992, con la entrega de 16 módulos. La transferencia se complementó con la entrega a los usuarios de 96 unidades de maquinaria pesada diversa.

Es importante señalar que el distrito de riego 010 no corresponde en su totalidad a la cuenca del río Culiacán; una parte pertenece a las cuencas del río Mocorito y río San Lorenzo. Por tanto el volumen para uso agrícola que la cuenca demanda es menor que el volumen demandado por el distrito (Tabla 2.10). Sin embargo para fines de este estudio se supondrá que el distrito, en su totalidad, está físicamente dentro de la cuenca del río Culiacán. Suposición válida, ya que sólo una pequeña parte del mismo se encuentra fuera de la cuenca.

<i>Agua superficial, Mm³</i>	<i>Agua subterránea, Mm³</i>	<i>Total</i>
1,899	98	1,997

Tabla 2.10 Requerimientos de agua para el sector agrícola (1990-1995), Mm³/año en la cuenca del río Culiacán

Los cultivos principales por ciclo, en el DR 010 son:

Fuente: Estadísticas agrícolas de los Distritos de Riego año agrícola 1990, CNA.

Otoño Invierno	Frijol, garbanzo, jitomate, maíz, trigo
Primavera - Verano	Arroz, maíz, sorgo
Perenes	Caña de azúcar, forrajes, frutales
Segundos Cultivos	Arroz, maíz, sorgo, soya

Tabla 2.11 Cultivos principales por ciclo, Distrito de Riego 010

La contaminación salina se presenta en 39,362 ha, de las cuales 563 ha presentan concentraciones sódicas; 14,170 ha afectación salina y las restantes 24,629 ha presentan afectaciones salino-sódicos.

Eficiencia de riego. Como resultado del análisis de la información obtenida referente a la eficiencia de riego de los principales cultivos en los distritos de riego de la región en el periodo de 1990 – 1995, en la tabla 2.12 podemos observar que en promedio la eficiencia de riego del distrito 010 es de 60% considerando los volúmenes de agua netos y bruto. Esto nos muestra que la eficiencia no es la ideal, (está por debajo del promedio nacional que es del 64%).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Superficie			Lámina		Volumen de agua		Eficiencia de riego
Física	Sembrada	Cosechada	Neta	Bruta	Neto	Bruto	
Ha	Ha	Ha	cm	cm	Millar de m ³		%
265,214	280,712	259,363	64	107	1,699,704	2,849,411	0.60

Tabla 2.12 Eficiencia de Riego, distrito 010, período 1990 - 1995

Público urbano

La cuenca del río Culiacán es la que demanda los mayores volúmenes para abastecimiento público en la región Pacífico Norte, con 158.54 Mm³ anuales (tabla 2.13).

Si se calcula la demanda media en litros /hab/día, (esto se logra al dividir la demanda total de la cuenca, igual a 158.54 Mm³, entre el número de habitantes de la cuenca, igual a 903,439), correspondería una dotación media de 480 litros/hab/día para la población urbana y rural en general; por tanto, no se considera que existan en la cuenca problemas de desabasto del recurso para uso doméstico en poblaciones con cobertura de agua potable.

Fuente: Anuarios Estadísticos Estatales, INEGI, Ed. 1998, REPDA de Septiembre de 1998.

Total	Agua subterránea	Agua superficial
158.54	92.10	66.44

Tabla 2.13 Demanda anual para uso público urbano (Mm³) en la cuenca del río Culiacán

Industrial

La principal actividad industrial, en lo que a uso del agua se refiere, es la industria azucarera. El ingenio Prozúcar, en el municipio de Navolato, es el mayor consumidor de agua para uso industrial en la cuenca. La tabla 2.14 muestra las industrias que demandan mayores volúmenes de agua.

Fuente: Planes Estatales Hidráulicos, Inventario de descargas, CNA.

Municipio	Giro	Empresa
Navolato	Azucarero	Prozúcar
Culiacán	Agroproducto	Agroproductos Industrializados del Noroeste
Culiacán	Alimentos	Bachoco, S.A. de C.V.
Culiacán	Pecuario	Ganadería Integral Vizur, S.A. de C.V.
Culiacán	Papel	Smurfit Cartón y Papel de México, S.A. de C.V.
Culiacán	Embotelladora	Cervecería Cuauhtémoc, S.A. de C.V.
Culiacán	Papel	Fapsa y Asociados, S.A. de C.V.
Culiacán	Aguas	Bebidas Purificadas, S.A. de C.V.
Culiacán	Agroproducto	Molinos Azteca de Culiacán, S.A. de C.V.

Tabla 2.14 Principales industrias que hacen uso del agua en la cuenca del río Culiacán

TEJES CON FALLA DE ORIGEN

Pecuario

La avicultura ocupa un lugar relevante en la región por su producción de carne y huevo, actualmente en el inventario se registran 30 millones 010 mil 991 aves, lo que representa la mayor concentración en la región, además se reporta una planta de manejo de aves tipo inspección federal (TIF).

El ganado con mayor requerimiento de agua es el bovino y el equino con 80 litros por cabeza por día; el ganado porcino, ovino y caprino tiene un requerimiento de 12.5 litros por cabeza por día; el sector avícola es el que menos requerimiento de agua presenta con tan solo 0.3 litros por cabeza por día. En la tabla 2.15 se presentan los resultados.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática

Tipo de ganado	Bovino	Porcino	Ovino	Caprino	Equino	Aves
Población	343,908	155,696	15,211	25,217	7,979	30,010,991

Tabla 2.15 Población pecuaria en la cuenca del río Culiacán

Generación de energía eléctrica

Existen dos centrales hidroeléctricas en la cuenca, cuya demanda totaliza un volumen de 2,410.6 Mm³. La tabla 2.16 resume sus características principales.

Fuente: Gerencias Estatales, CNA

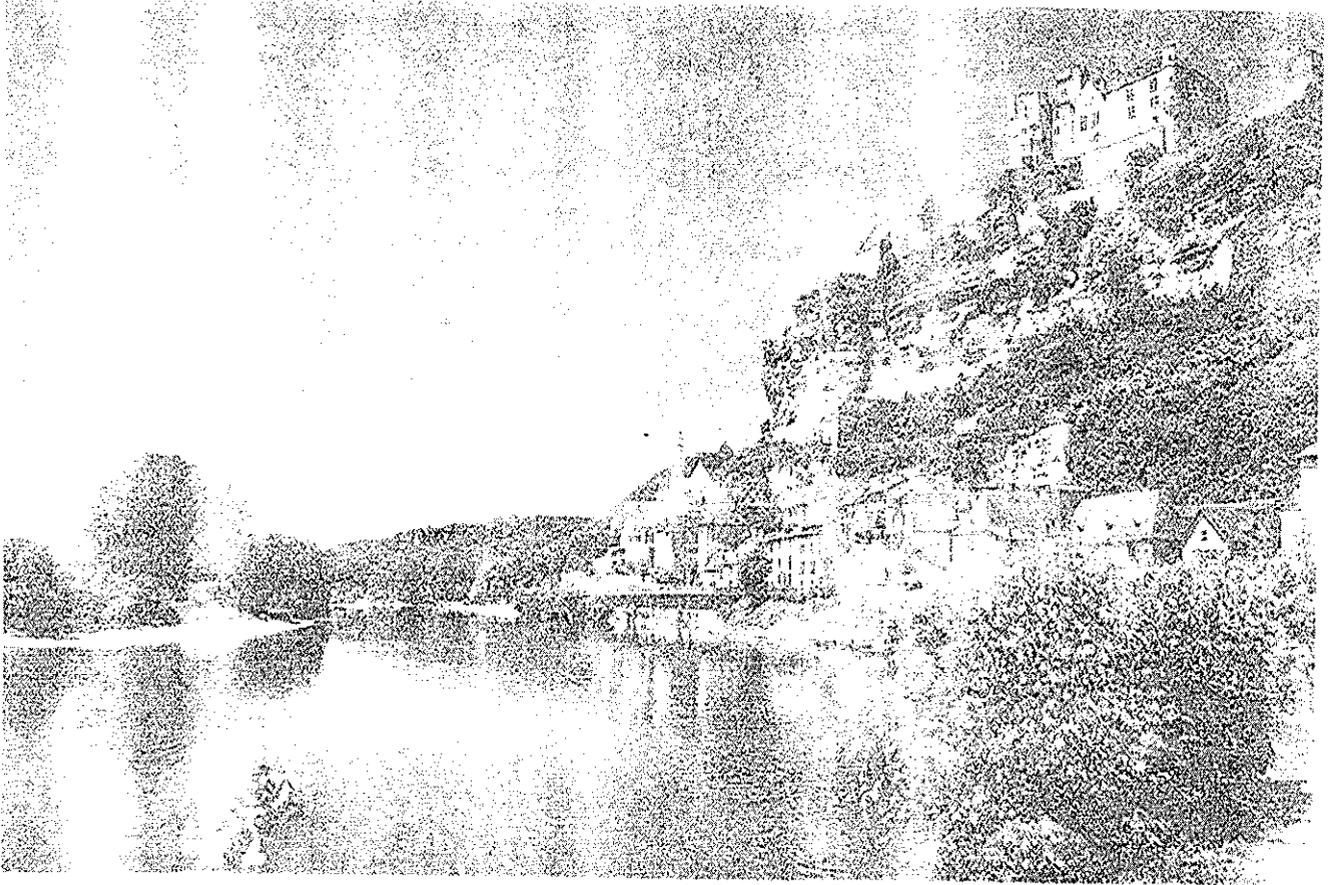
Central Hidroeléctrica	Cuenca	Corriente o cuerpo de agua	Volumen Mm ³	Presa	Capacidad (Megawatts)
Salvador Alvarado	Río Culiacán	Río Tamazula	526.7	Sanalona	14.0
Humaya	Río Culiacán	Río Humaya	1 883.9	Adolfo López M.	90.0
Total			2,410.6		

Tabla 2.16 Fuentes de abastecimiento y volúmenes para generación de energía eléctrica en la cuenca del río Culiacán

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**TFIS CON
FALLA DE ORIGEN**

CAPÍTULO 3



VARIABLES DEL MODELO

A lo largo de este capítulo desarrollaremos el sustento matemático del modelo de simulación de la cuenca paso por paso. Clasificaremos cada una de sus partes en submodelos. Se explicará el modelo matemático de cada submodelo y la teoría que lo soporta.

Primero daremos inicio el capítulo, mediante una explicación breve, pero concisa, de los principales instrumentos de análisis de los que se hace uso en el transcurso del capítulo 3.

3.1 INSTRUMENTOS DE ANÁLISIS

El enfoque sistémico y la técnica simulación, son las dos principales herramientas que se utilizarán en el desarrollo de este estudio. El enfoque sistémico es una aportación de tipo conceptual, en cambio, la simulación tiene una aportación técnica.

3.1.1 El enfoque sistémico

El enfoque sistémico tiene su origen en las observaciones del biólogo Ludwig Von Bertalanffy del comportamiento de los organismos vivos que obedecen a ciertas leyes, que podrían extenderse a otros "sistemas", tanto naturales como sociales. Él propuso la "Teoría General de los Sistemas", que consiste en una serie de leyes que se pueden aplicar a todo tipo de "sistemas". De ahí parten nuevos enfoques para visualizar los fenómenos naturales y sociales, como la Ingeniería de Sistemas, Cibernética, Teoría de la Información, la Teoría de Juegos, la Teoría de Decisiones que tienen un origen común.

El enfoque sistémico, integral u holístico (utilizando las tres palabras como sinónimos), analiza el sistema como un todo, donde los elementos interactúan entre sí, formando ciclos o procesos. La ciencia clásica utiliza un enfoque totalmente reduccionista, dividiendo el objeto en estudio en entes aisladas, desmembrando el sistema y estudiando el comportamiento de sus partes de manera separada y unidireccionalmente causal. El enfoque sistémico, por el contrario, propone analizar el sistema considerando que el comportamiento de una parte es influenciado por otros elementos del mismo sistema que interactúan con él.

Según Robert L. Flood, un sistema es una red compleja y altamente interconectada de partes que muestran propiedades sinérgicas donde el todo es mayor a la suma de sus partes.¹⁵

A raíz de la Teoría General de los Sistemas, surgen muchas otras teorías y técnicas que ven sustento en el pensamiento sistémico. La técnica de Simulación digital es una de ellas.

El enfoque sistémico nos permitirá abordar, a través de este estudio, el sistema o cuenca con una orientación integral. Debido al gran número de elementos que integran la cuenca, las interrelaciones que existen entre ellos y el efecto que provocan en su comportamiento cada uno de los elementos relacionados (directa o indirectamente), el enfoque sistémico

¹⁵ Creative Problem Solving, Robert L. Flood y Michael C. Jackson, Wiley, Chichester

representa la mejor opción para analizar la cuenca con toda objetividad, más que cualquier otra teoría desarrollada en la actualidad, y de esta manera conocer su comportamiento real con mayor exactitud.

3.1.2 La técnica “Simulación Digital”

Como consecuencia del nacimiento y explosión del mundo de las computadoras en prácticamente todos los niveles sociales, nace esta técnica que utiliza como principal herramienta la computadora personal. La Simulación es un producto resultado de la fusión de conceptos de Investigación de Operaciones, matemáticos y de sistemas

Simulación se define, según Thomas H. Naylor, como:¹⁶

Una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos periodos de tiempo.

Debido al gran número de relaciones lógicas y operaciones matemáticas que envuelven un modelo de simulación, su manejo manual se vuelve prácticamente imposible e incostruable. Por tanto, la utilización de una computadora es imprescindible.

Existen muchos paquetes o programas especializados en modelos de simulación muy específicos. Arena, Simnet, Dynamo, I think, Stella son algunos ejemplos, cuyo diseño está orientado a resolver problemas tipo como son: líneas de espera, líneas de ensamble y manufactura, sistemas sociales, de negocios o científicos. Si ninguno de los simuladores disponibles en el mercado se adapta a las necesidades del analista, éste podrá optar por programar su propio simulador.

Los modelos de simulación, según sus características, se clasifican en tres rubros, estos son:

Físico o matemático

Los modelos físicos no requieren necesariamente una computadora para su análisis. Son modelos que son creados a escala del modelo real. Por ejemplo un modelo a escala de un edificio que se introduce a un túnel de viento (también a escala), para predecir su comportamiento al interactuar con el viento, bajo condiciones simuladas del entorno real. Por el contrario, un modelo matemático está formado por un conjunto de relaciones lógico-matemáticas que intentan describir el funcionamiento del sistema; lo más parecido posible a la realidad. Estos modelos son calibrados con datos históricos reales. Su complejidad hace necesario la utilización de una computadora personal.

Estático o dinámico

El tiempo no juega un rol natural en los modelos estáticos pero sí en los dinámicos. En un modelo de simulación de cualquier juego de azar, el tiempo no afecta la situación de las variables o parámetros durante la simulación. En cambio, cualquier sistema operacional,

¹⁶ Simulación un enfoque práctico, Raúl Coss Bu, Limusa

social o de negocios ve involucrado el tiempo como una variable que afecta el estado del sistema.

Continuo o discreto

En un modelo continuo, el estado del sistema puede cambiar continuamente sobre el tiempo, un ejemplo sería el nivel de almacenamiento en una presa. En un modelo discreto, el cambio solamente puede ocurrir en puntos separados del tiempo, tales como los sistemas de manufactura con partes que entran y salen en tiempos específicos. Se pueden tener elementos de cambios discretos y continuos en el mismo modelo, en cuyo caso se llaman modelos mixtos continuos-discretos.

Determinístico o estocástico

Los modelos que no tienen datos aleatorios son determinísticos, la operación de un proyecto de inversión con datos constantes es un ejemplo de este último. Los modelos estocásticos, por otro lado, operan con datos aleatorios o probabilísticos, tal es el caso de un banco con llegadas de clientes que requieren tiempos diferentes de servicio y cuyo comportamiento real se puede ajustar a una distribución de probabilidad. Un modelo puede contener ambos casos, determinísticos y estocásticos en distintos componentes.

Para nuestro caso, la simulación de una cuenca hidrológica, el modelo se clasifica como:

Matemático: El comportamiento del sistema se describe mediante ecuaciones matemáticas y relaciones lógicas.

Dinámico: El factor tiempo influye en la situación de disponibilidad y demanda del agua.

Discreto: Aunque el proceso en una cuenca es continuo, para propósitos de este estudio, se simulará un modelo discreto, con intervalos de tiempo de un día. Esto es debido a que los periodos de simulación serán muy grandes (décadas) y por tanto no se requiere la exactitud continua del modelo.

Mixto determinístico-estocástico: El modelo se calibrará haciendo uso de datos históricos (simulación determinística), pero para la proyección al futuro se utilizará simulación estocástica.

Por tanto el modelo se define como *matemático, dinámico, discreto y mixto determinístico-estocástico*.

El programa que se utilizará para modelar el sistema cuenca, es el paquete Stella. Se utiliza éste, por ser el más adecuado, disponible en el mercado, para los fines que persigue este estudio.

3.1.2.1 STELLA, el simulador

Stella es un simulador para modelos dinámicos. Se denomina así por sus siglas en inglés STELLA = Structural Thinking Experiential Learning Laboratory with Animation.

Cualquier proceso dinámico se puede modelar en Stella. La complejidad y exactitud de los modelos creados en Stella dependerá de las variables e interrelaciones que se incluyan en los mismos. Para simular un modelo, el sistema STELLA utiliza un conjunto de ecuaciones diferenciales no-lineales.

Este producto es desarrollado por High Performance Systems, Inc. (HPS), y se puede obtener una copia del programa para su evaluación en la dirección de Internet: <http://www.hps-inc.com>. Esta copia tiene funciones limitadas en comparación con la versión completa. Con esta versión se puede leer, modificar y ejecutar un modelo, más no se pueden grabar cambios.

Características del programa

Nombre: Stella Research (versión completa)

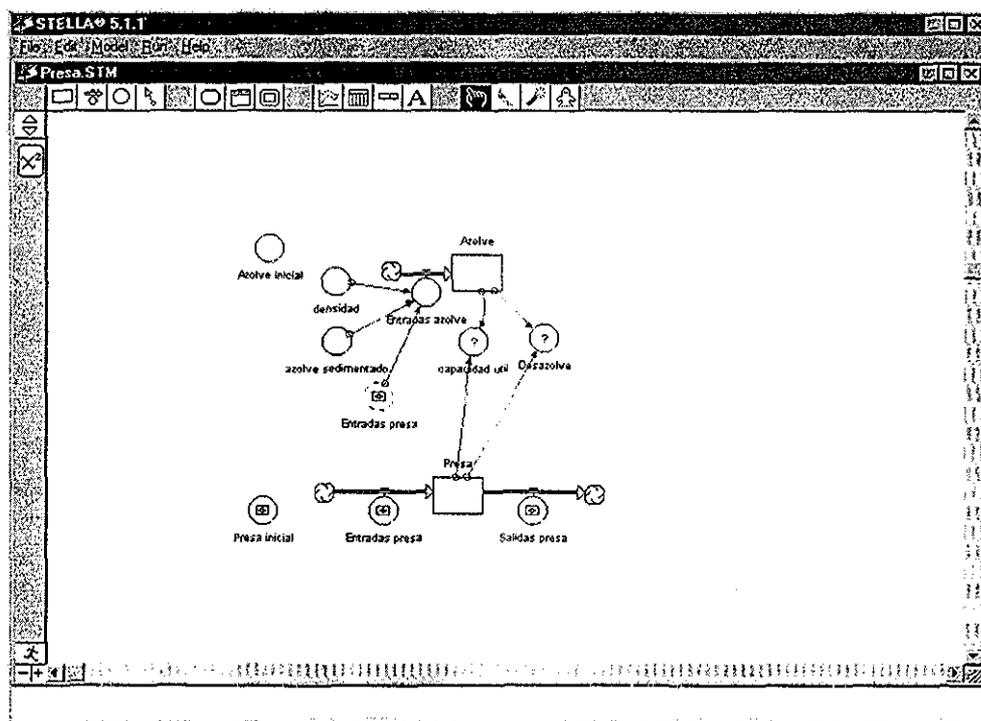
Versión: 5.1.1; plataforma Windows

Una de las principales virtudes de este paquete es su facilidad de manejo. Es un programa muy amigable que permite al usuario crear modelos complejos sin necesidad de indicar explícitamente las ecuaciones matemáticas que relacionan los componentes del sistema. Todo el proceso se desarrolla gráficamente.

En la figura 3.1 se observa la pantalla principal del simulador Stella Research. También se muestra un ejemplo de un modelo elaborado en el programa. Como se puede observar, la comprensión se facilita para el lector debido a su representación gráfica. Corre bajo ambiente Windows, pero además existe la versión para plataforma Macintosh.

Esta tesis no ahonda en la operación y manejo del programa. Cada paso de desarrollo del modelo supone que el lector conoce el funcionamiento del mismo. En el CD anexo se encuentra un tutorial que guiará al usuario en el manejo básico del paquete. El archivo se llama "Getting Started with STELLA 6.0.pdf" que debe ser leído en *Acrobat reader*, también se puede obtener una copia de este tutorial en la dirección de Internet antes mencionada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.1 Ejemplo de un modelo de simulación elaborado en STELLA

3.2 EL FLUJO DE AGUA EN LA CUENCA

El primer paso para elaborar cualquier modelo de simulación es conceptualizar el sistema a modelar. En nuestro caso, la cuenca del río Culiacán la conceptualizaremos como una interconexión de subcuencas (Figura 3.2). Esta división facilita el entendimiento y análisis de la cuenca en su conjunto. Esta división no sigue un patrón o regla, más bien el analista definirá estas divisiones en función del grado de exactitud del modelo, información disponible, ubicación de vasos, estaciones hidrométricas y climatológicas, condiciones geológicas, entre otras. Para la cuenca del río Culiacán, la división en subcuencas obedece principalmente a la ubicación de los embalses (presas). Éstos son puntos clave donde los volúmenes transferidos entre subcuencas son fácilmente mensurables. Otra razón es que aguas abajo de las presas, geológicamente la cuenca cambia, es decir, al llegar al valle, la superficie se vuelve prácticamente plana, a diferencia de las subcuencas de los ríos Humaya y Tamazula, donde la mayor parte es rocosa y montañosa. En la parte plana (S3), es donde se localiza la zona agrícola. Debido a la gran información que se maneja en este estudio, una división más a detalle no contribuiría más a los fines que en este estudio se persiguen. Por todo lo anterior, la cuenca quedó dividida en tres subcuencas, estas son, subcuenca del río Humaya (S1), subcuenca del río Tamazula (S2) y subcuenca del río Culiacán (S3).

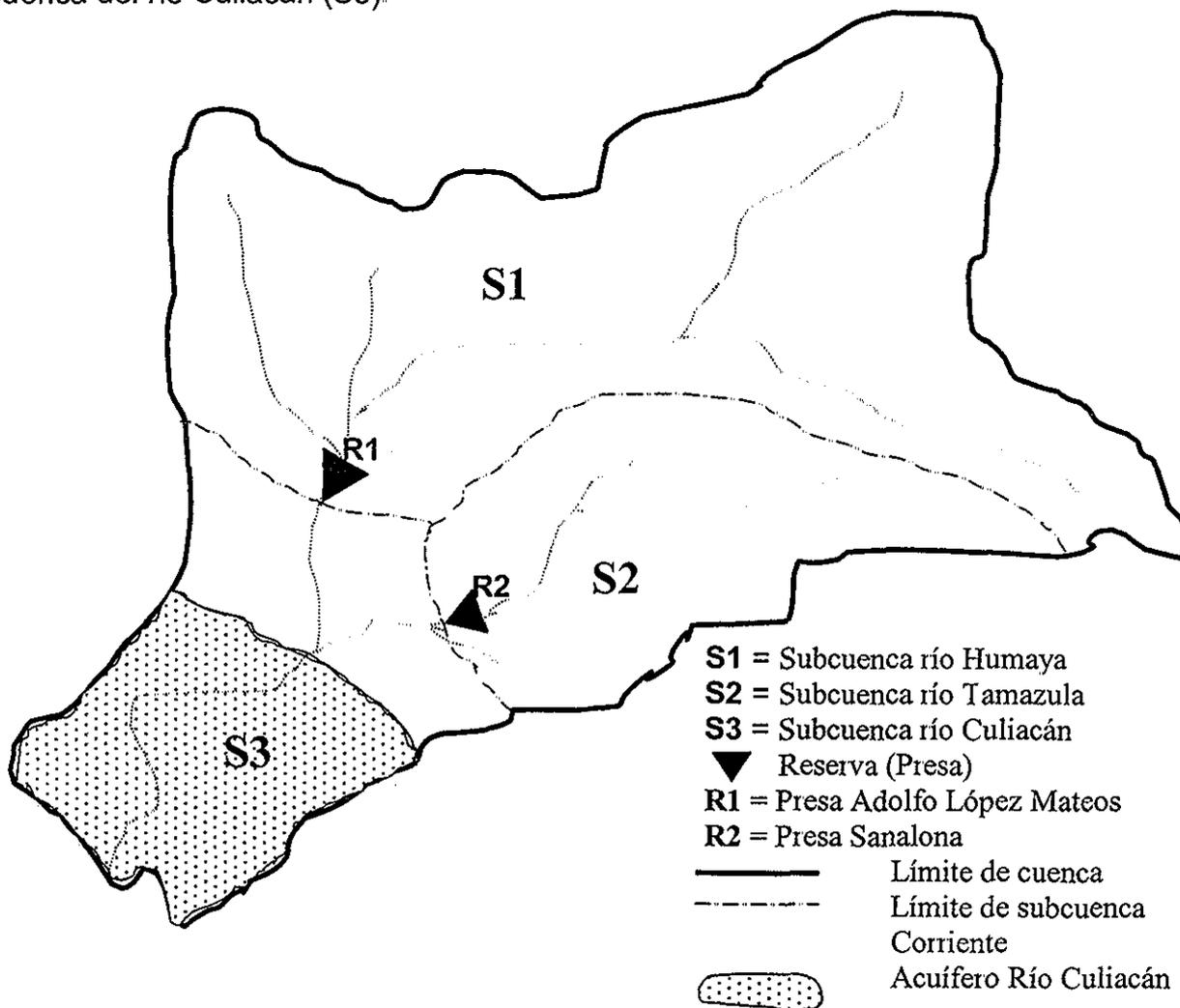


Figura 3.2 Modelo general de la cuenca hidrológica del río Culiacán

Existe una tercera presa llamada Vinoramas, pero debido a su tamaño y uso no se incluirá en el estudio. Esta presa es pequeña y se utiliza para control de avenidas. Está ubicada sobre el arroyo el Bledal y siempre se cuida que esté vacía para poder cumplir con su cometido en presencia de avenidas, servir como un vaso captador para evitar inundaciones. Por tanto, el agua que aquí se almacena se derrama inmediatamente, razón por la cual su aprovechamiento es mínimo.

A partir de la figura 3.2 se construyó la figura 3.3, la cual indica la relación del flujo del agua que se establece entre las tres subcuencas, incluyendo su paso por las reservas (presas).

Utilizaremos la figura 3.3 para construir el modelo conceptual del flujo de agua para cada una de las subcuencas.

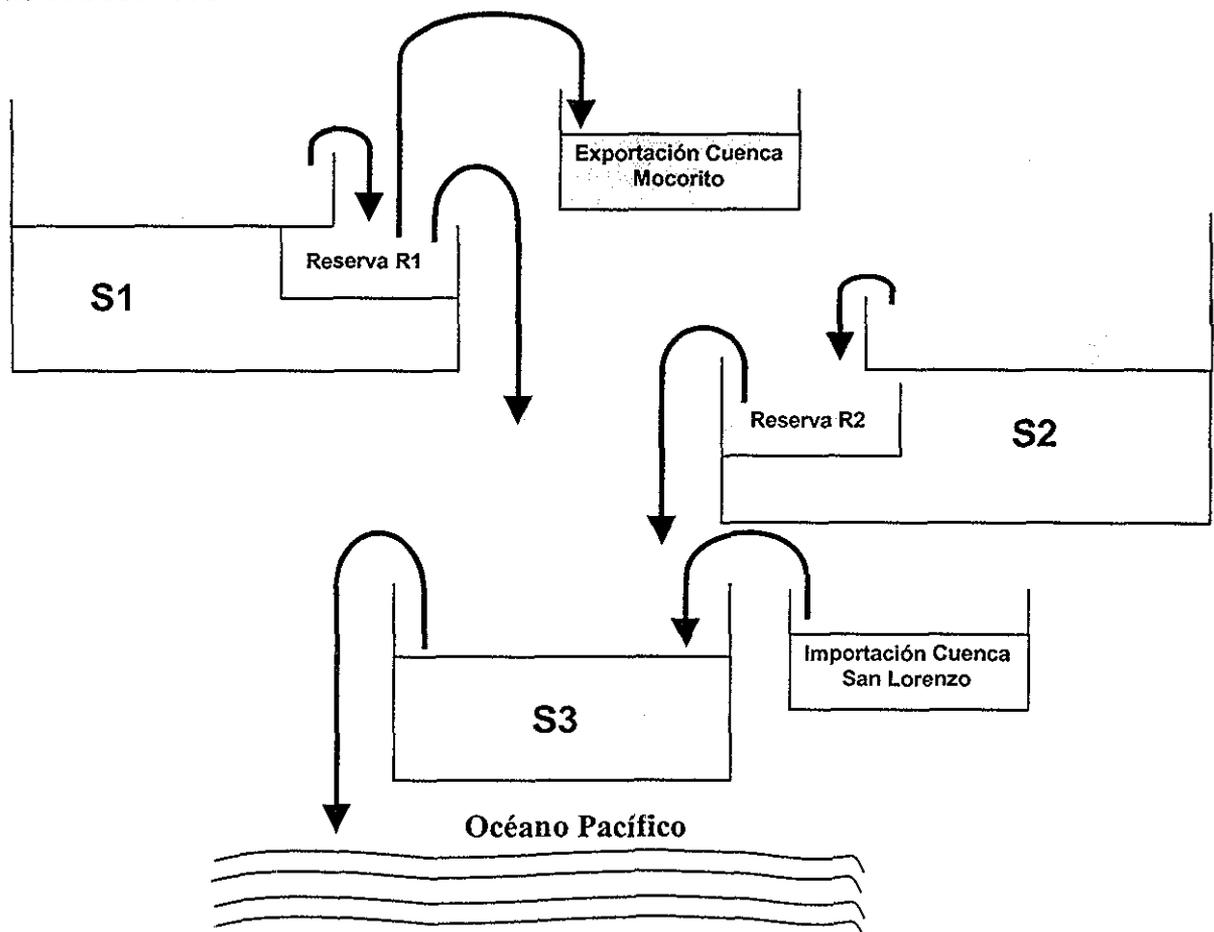
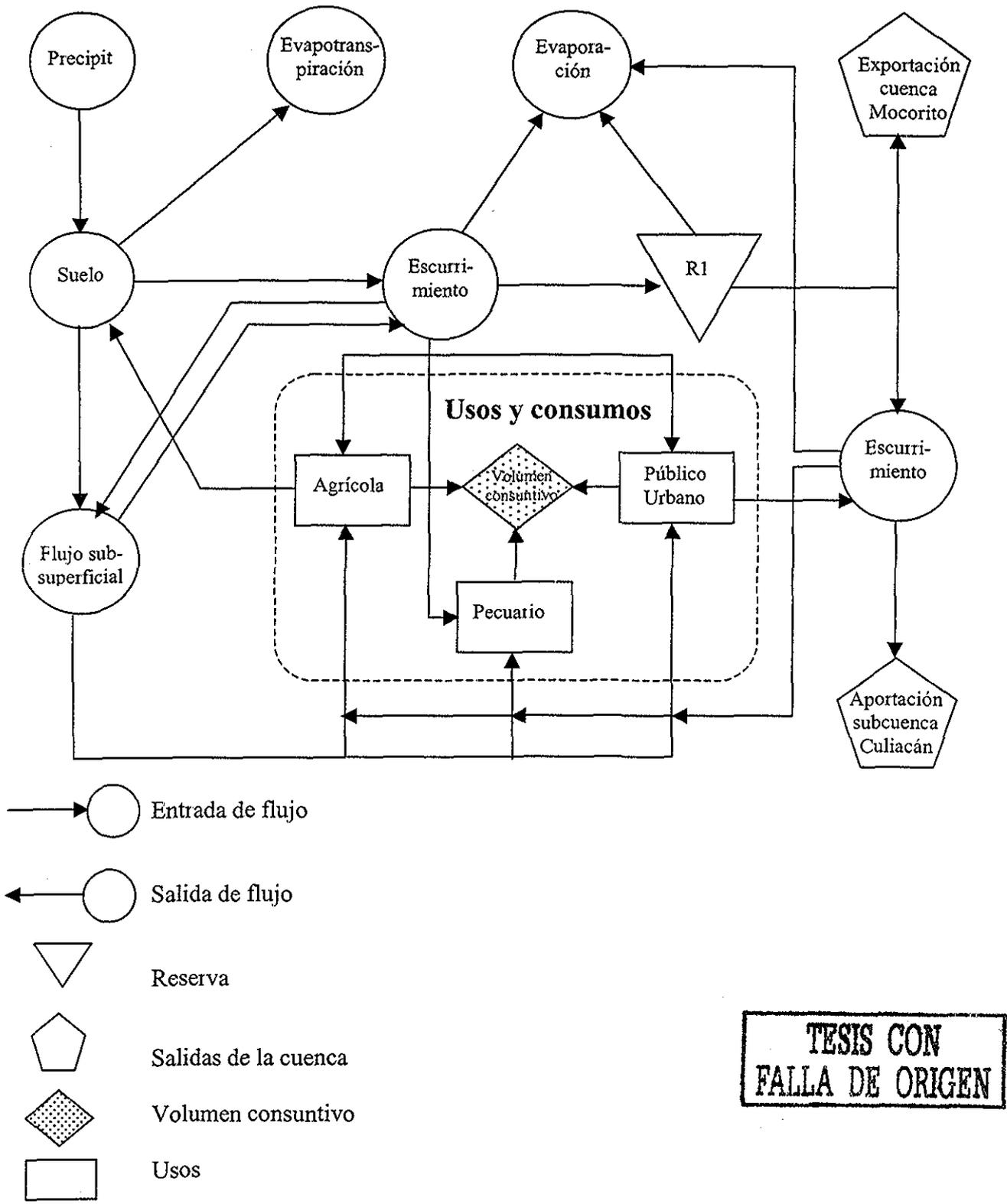


Figura 3.3 Relación del flujo de agua entre cada una de la subcuencas

Los modelos conceptuales del flujo de agua por las subcuencas, nos sirven para identificar las interconexiones físicas entre cada uno de los elementos que forman parte de la cuenca y del modelo a desarrollar. La apreciación gráfica de estos elementos es esencial para establecer las relaciones matemáticas y lógicas en el modelo de simulación.

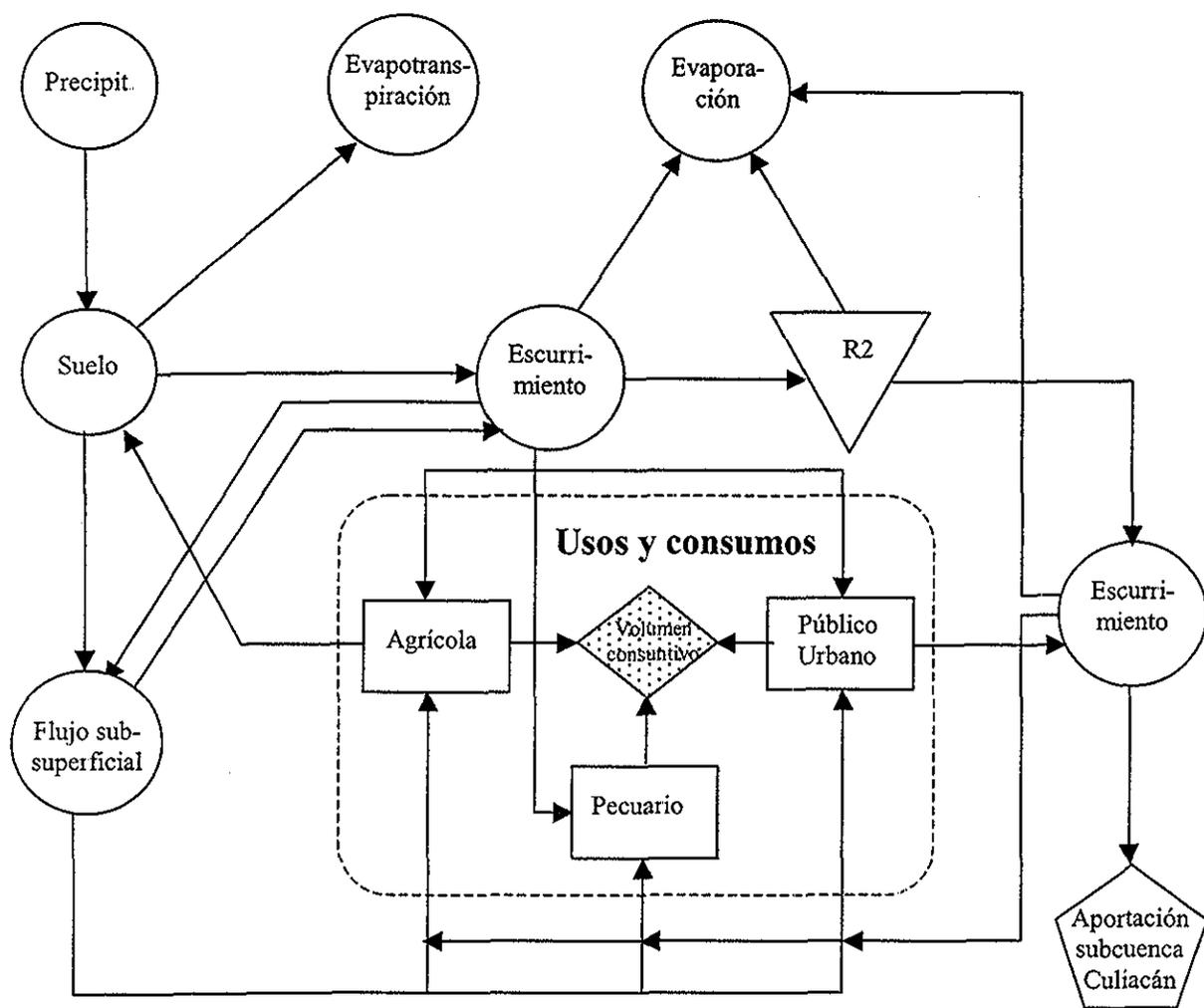
Las figuras 3.4, 3.5 y 3.6 muestran los modelos conceptuales del flujo de agua a través de las tres subcuencas. Estos modelos se construyeron a partir de la información y observación del analista. Cabe señalar que otros modelos pueden utilizarse para

conceptualizar la cuenca, tales como el modelo Standford, Standford modificado, entre otros. La profundización del modelo conceptual depende, una vez más, del grado de exactitud que busque el analista y de la información disponible de la cuenca.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

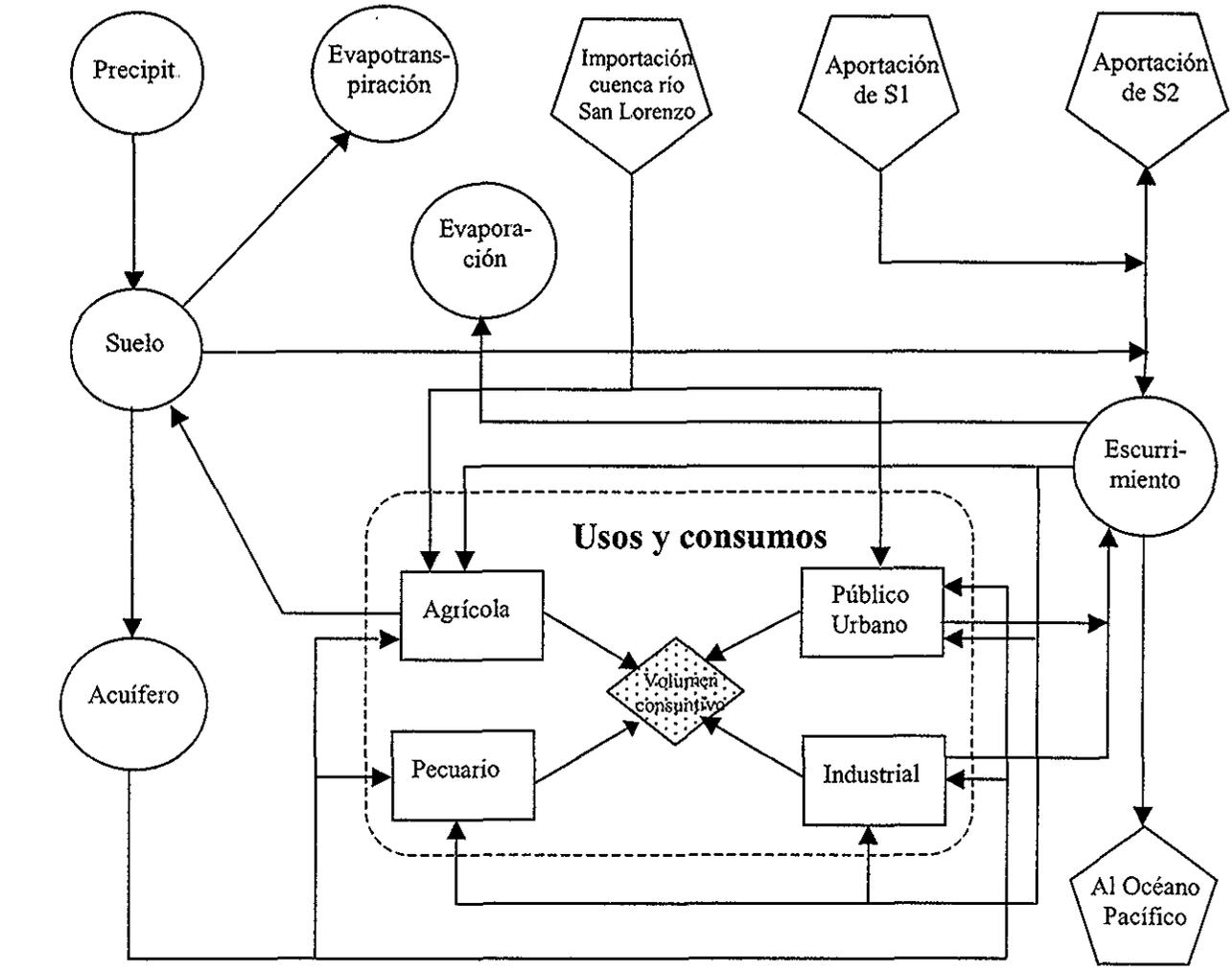
Fig. 3.4 Modelo conceptual del flujo de agua, subcuenca río Humaya (S1)

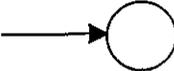
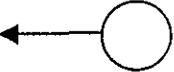


- ○ Entrada de flujo
- ← ○ Salida de flujo
- ▽ Reserva
- ◡ Salidas de la cuenca
- ◊ Volumen consuntivo
- Usos

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. 3.5 Modelo conceptual del flujo de agua, subcuenca río Tamazula (S2)



- 
 Entrada de flujo
- 
 Salida de flujo
- 
 Entradas de otras cuencas o subcuencas
- 
 Salidas de la cuenca
- 
 Volumen consuntivo
- 
 Usos

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. 3.6 Modelo conceptual del flujo de agua, subcuenca Río Culiacán (S3)

A partir de estos modelos conceptuales se establecerán los submodelos matemáticos necesarios para el desarrollo del modelo de simulación. El modelo lluvia – escurrimiento, el submodelo embalses, el submodelo extracciones, el submodelo demográfico y el submodelo balance hidráulico. Estos submodelos son los que se codificarán en el software Stella para simular el funcionamiento integral de la cuenca.

3.3 SUBMODELO LLUVIA - ESCURRIMIENTO

Como parte del ciclo hidrológico, la lluvia se precipita para humedecer primero el terreno y la vegetación, después de saturar la primer capa del suelo inicia la infiltración del agua a capas más profundas del suelo, y al mismo tiempo el agua en exceso de la tormenta da lugar al escurrimiento superficial. Este proceso se puede abstraer de la realidad e imitar su comportamiento real a través de un modelo matemático. El método SCS (Soil Conservation Service) propone un proceso matemático para el cálculo de los escurrimientos en una cuenca a partir de los datos de lluvia, vegetación, suelo y sus condiciones anteriores de humedad. Este método es ampliamente utilizado y recomendado por los expertos en la materia.

Método SCS

El método parte de la hipótesis de que la razón entre el escurrimiento directo (P_e) y la altura de la precipitación (P) y la razón entre la retención en la cuenca (F_a) y la retención potencial máxima (S) son iguales, esto es:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (3.1)$$

Donde:

I_a = precipitación inicial antes del encharcamiento, para la cual no ocurrirá escurrimiento

Del principio de continuidad

$$P_e = P - I_a + F_a \quad (3.2)$$

Combinando (3.1) y (3.2) y despejando P_e se obtiene

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (3.3)$$

Empíricamente se sabe que $I_a = 0.2S$

Por tanto el valor de P_e en mm está dado por:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (3.4)$$

El valor de S depende del número de curva CN y su relación esta dada por la ecuación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3.5)$$

El valor de CN varía de 0 a 100 y depende del tipo y uso del suelo en la cuenca. Estos valores se pueden obtener por medio de la tabla contenida en el anexo 1. Entre mayor sea el valor de CN, menor es la permeabilidad de la cuenca.

Cuando en la cuenca exista más de un tipo de suelo o uso, deberá obtenerse un promedio ponderado de CN. El valor de CN obtenido de las tablas (CNII) se deberá modificar, dependiendo de las condiciones antecedentes de humedad (CAH). La tabla 3.1 muestra esta relación.

Grupo CAH	Lluvia antecedente total de 5 días (mm)	
	Estación inactiva	Estación de crecimiento
I	Menor que 12.7	Menor que 35.56
II	12.7 a 27.94	35.56 a 53.54
III	Sobre 27.94	Sobre 53.54

Tabla 3.1 Clasificación de las condiciones antecedentes de humedad (CAH)

Estación inactiva: Periodo cuando el terreno se encuentra libre de cobertura vegetal

Estación de crecimiento: Periodo cuando el terreno se encuentra cubierto por vegetación

* El grupo CAH II corresponde al valor obtenido directamente de las tablas

En función del grupo CAH que se obtenga de la tabla 3.1., el valor de CN se calculara de acuerdo a las siguientes ecuaciones.

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (3.6)$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (3.7)$$

El método SCS representa una buena opción para el cálculo de escurrimientos en una cuenca. Los datos de escurrimiento obtenidos mediante este método, podrán corroborarse y calibrarse, al comparar los valores calculados con los reales, que son medidos en las estaciones hidrométricas.

3.4 SUBMODELO EMBALSES

El sub-modelo embalses no surge de algún procedimiento matemático profundo, como es el caso del sub-modelo lluvia escurrimiento, más bien obedece al simple principio de continuidad, donde el nivel de almacenamiento en un momento i+1 es igual al nivel de

almacenamiento en el momento i , más las entradas y menos las salidas en ese mismo periodo. Por tanto, la ecuación que determina el nivel de almacenamiento en un embalse queda representada como sigue:

$$N_{i+1} = N_i + \text{Entradas} - \text{Salidas}$$
$$N_{i+1} = N_i + P_e - E_a - I - Ex - D - A \quad (3.8)$$

Donde:

N_{i+1} = Nivel de almacenamiento en el embalse al final del periodo i

N_i = Nivel de almacenamiento en el embalse al inicio del periodo i

P_e = Escurrimiento directo de la subcuenca del embalse durante el periodo i

E_a = Evaporación diaria registrada en el embalse durante el periodo i

I = Infiltraciones al subsuelo en el vaso de almacenamiento durante el periodo i

Ex = Volumen total de extracción del vaso para sus diferentes usos y consumos durante el periodo i

D = Derrames por exceder el nivel de aguas máximo ordinario del embalse

A = Azolves en el periodo i

Es importante señalar que se debe tener cuidado en el manejo de las unidades, se recomienda utilizar miles de metros cúbicos, como unidad de medida para cada una de las variables.

Los valores del escurrimiento en la subcuenca del almacenamiento (P_e) se obtendrán del sub-modelo lluvia escurrimiento. Los correspondientes a la Evaporación (E_a) son proporcionados por la estación climatológica ubicada en el vaso o cerca del él. La infiltración se determina por las características geológicas del terreno donde se localiza el vaso¹⁷. Los volúmenes de extracción son determinados por el sub-modelo de extracciones y las políticas de distribución del agua. Los niveles de almacenamiento obtenidos con este sub-modelo podrán ser calibrados en el sistema Stella al compararlos con los datos reales obtenidos de los balances hidráulicos de cada embalse. Las variables a modificar para la calibración son la infiltración y los azolves, por ser estas las variables cuya medición se vuelve más complicada y por tanto, puede existir un mayor error en su medición.

Las salidas por evaporación del almacenamiento se obtienen, como ya se mencionó, de la estación climatológica más cercana. Estas series están dadas en láminas de evaporación en mm. Para saber cuál es el volumen de evaporación del vaso, necesitamos saber el área o superficie libre del agua para el nivel almacenamiento del vaso en el instante del cálculo. Por tanto, es necesario contar con las curvas áreas-capacidades para el vaso en estudio. Estas curvas nos indican el área superficial que cubre el agua en su punto más alto para un cierto volumen de almacenamiento. La curva áreas –capacidades de un embalse tienen la forma que se muestra en la figura 3.7.

Los azolves son considerados como una salida del vaso debido a que en un principio entran al vaso como aportaciones por escurrimiento directo, según la ecuación de continuidad. Es decir, el azolve se contabiliza en las estaciones de aforo como un volumen que entra al embalse, ya que los azolves están mezclados con el agua, y posteriormente se sedimentan cuando el agua queda en reposo al entrar al almacenamiento.

¹⁷ Debido a la falta de información se usará este dato para calibrar el modelo, lo mismo que los azolves

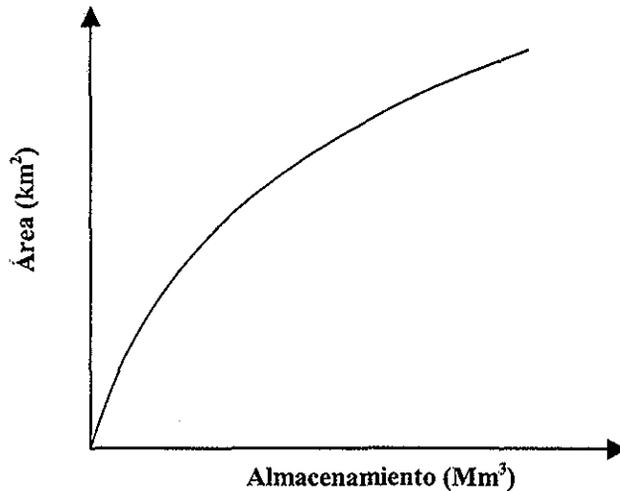


Figura 3.7 Curva típica áreas – capacidades para un embalse

3.5 SUBMODELO EXTRACCIONES

Este submodelo intenta cuantificar los volúmenes de agua que se demandan en la cuenca para cada uno de los diferentes usos y consumos. Para fines de este estudio, se considerarán los siguientes usos:

- Uso agrícola
- Uso público urbano
- Uso industrial
- Uso pecuario

Existen otros usos, según el catálogo de usos de la Comisión Nacional del Agua, tales como el uso acuícola, servicios, turístico, entre otros. Los cuatro usos que se incluirán en el modelo, representan prácticamente el 100% del volumen demandado en la cuenca. De hecho el uso agrícola es el más importante, representando el 92% del volumen total demandado. No se considera el uso para generación de energía eléctrica, ya que es considerado un uso no consuntivo, es decir, el agua no se consume, solo se utiliza para mover las turbinas, por lo que, una vez que el agua pasa por la hidroeléctrica, es aprovechada en otros usos.

La ecuación que define el volumen total de extracciones para cada una de las subcuencas, esta dada por una simple adición de los volúmenes de cada uno de los cuatro principales usos del agua:

$$E_x = D_a + D_{ph} + D_p + D_i \quad (3.9)$$

Donde:

E_x = Volumen total de extracción del vaso para sus diferentes usos y consumos en miles de m^3

D_a = Volumen demandado en la subcuenca para uso agrícola en miles de m^3

- D_{ph} = Volumen demandado en la subcuenca para uso público urbano en miles de m^3
 D_i = Volumen demandado en la subcuenca para uso industrial en miles de m^3
 D_p = Volumen demandado en la subcuenca para uso pecuario en miles de m^3

Ahora nos avocaremos al cálculo de los volúmenes demandados para cada uno de estos usos.

3.5.1 Uso agrícola

Los volúmenes demandados para uso agrícola en la cuenca son básicamente los necesarios para satisfacer los requerimientos de agua del distrito de riego 010, ubicado en la parte baja de la cuenca S3. Existen demandas en las subcuencas S1 y S2 para uso agrícola de temporal, el cual satisface sus necesidades con el agua de lluvia que se infiltra en los terrenos. En estas dos subcuencas no existe agricultura de riego, salvo algunos productores independientes ubicados en las márgenes de los ríos Humaya y Tamazula que se abastecen de las aguas perennes del río.

El volumen de agua que requiere el distrito de riego 010 puede cuantificarse usando información que proporciona la Comisión Nacional del Agua, a través de la Subgerencia de Operación de la Gerencia Regional Pacífico Norte. La información necesaria para el cálculo es el número de hectáreas sembradas por ciclo y tipo de cultivo, así como sus correspondientes láminas netas de agua utilizadas por cada cultivo y las eficiencias del sistema de riego.

El volumen se calcula de la siguiente manera:

$$D_a = [(L_{BC1} * S_1 + L_{BC2} * S_2 + L_{BC3} * S_3 + L_{BC4} * S_4 + \dots + L_{BCN} * S_N) * 10] / (E_r * E_{rma} * E_{rme}) \quad (3.10)$$

Donde:

- D_a = Volumen demandado en la subcuenca para uso agrícola en miles de m^3
 L_{BC1} = Lámina bruta en metros para el cultivo 1
 S_1 = Superficie regada en hectáreas para el cultivo 1
 L_{BCN} = Lámina bruta en metros para el cultivo N
 S_N = Superficie regada en hectáreas para el cultivo N
 E_r = Eficiencia de conducción en el río
 E_{rma} = Eficiencia de conducción en la red mayor
 E_{rme} = Eficiencia de conducción en la red menor

En esta ecuación se incluyen los cultivos del ciclo otoño-invierno, primavera-verano, segundos cultivos y cultivos perennes.

Los volúmenes netos que se utilizan a nivel parcelario en los distritos de riego, difieren mucho de los que son extraídos de las obras de toma en las obras de cabeza (presas). Esto se debe a las grandes pérdidas de conducción que se tienen en el trayecto del agua, desde el punto de su extracción hasta el lugar de su aprovechamiento. El río es el primer trayecto por el que fluye el caudal, posteriormente la red mayor, que corresponde a la red de canales principales y por último la red menor, que son los canales laterales y sublaterales, todo esto antes de llegar hasta al punto de entrega a los módulos de riego.

3.5.2 Uso público urbano

El cálculo del volumen de agua demandado para uso público urbano atenderá la Norma Técnica para el Cálculo de la Demanda de Agua Potable CNA-NT-I-HA-003, emitida por la Gerencia de Ingeniería Básica y Normas Técnicas de la Comisión Nacional del Agua. Según esta norma, el cálculo se obtiene como sigue:

$$D_{ph} = F_f + C_t \quad (3.11)$$

$$C_t = C_{dr} + C_{dm} + C_{dp} + C_c + C_i + C_p + C_e + C_a$$

Donde:

D_{ph} = demanda en determinado periodo de tiempo (diario para nuestro caso) en miles de m^3

F_f = fugas físicas (roturas, pérdidas, derrames, derroches, evaporación, etc.)

C_t = consumo total

C_{dr} = consumo doméstico residencial

C_{dm} = consumo doméstico clase media

C_{dp} = consumo doméstico clase pobre

C_c = consumo comercial y servicios

C_i = consumo industrial¹⁸

C_p = consumo para usos públicos (parques, fuentes, lavado de calles, etc.)

C_e = consumo contra incendio

C_a = consumo agrícola, ganadero, avícola (huertos o granjas familiares) surtidas por el servicio público de agua

Cada uno de los consumos indicados en la ecuación anterior podrán ser obtenidos en los organismos operadores de cada uno de los municipios de la cuenca. Los municipios de Culiacán, Navolato y Badiraguato proporcionarán la información respectiva para el cálculo de las demandas diarias en las poblaciones urbanas y rurales de la cuenca del río Culiacán. Otra opción confiable para la obtención de esta información lo representa el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA).

Existen tablas que la CNA proporciona para calcular estos consumos, pero son aproximadas; lo mejor es obtener la información real de los consumos a través de los organismos que operan los sistemas de agua potable o del REPGA.

3.5.3 Uso industrial

Este uso es difícil de cuantificar, ya que los patrones de consumo son distintos, dependiendo del giro industrial de la empresa. Además existe poca información para plantear un cálculo sistemático de los volúmenes requeridos por tipo de industria. Pero contrario a esto, existe una ventaja para la obtención de estos volúmenes. El único volumen que la CNA mide trimestralmente es precisamente el uso industrial. Cada una de las industrias de la región, y del país, cuentan con medidores totalizadores del volumen de agua que utilizan para sus procesos industriales. En consecuencia, la Subgerencia de

¹⁸ Se incluye el uso industrial porque existen industrias que se abastecen de la red de agua potable, y estas no están incluidas en el padrón de monitoreo de la CNA, mencionado en el apartado 3.5.3 para uso industrial.

Administración del Agua, de la Gerencia Regional Pacífico Norte, cuenta con información disponible de los volúmenes de agua para uso industrial que son extraídos de la cuenca. Estos datos son totalmente confiables, ya que son verificados por personal propio de la dependencia. Otra opción viable para la obtención de esta información es el REPGA.

3.5.4 Uso pecuario

Este volumen es fácil de cuantificar, sólo se requiere saber el número de cabezas de ganado, por tipo, que se encuentran en la cuenca y que utilizan agua de la misma. Además, se requiere saber la dotación de agua que necesita cada cabeza, por tipo de ganado, para satisfacer sus necesidades de abrevadero.

El volumen se calcula con la siguiente ecuación:

$$D_p = (C_B * D_B + C_P * D_P + C_O * D_O + C_C * D_C + C_E * D_E + C_A * D_A) * 10^{-6} \quad (3.12)$$

Donde:

- D_p = Volumen demandado en la subcuenca para uso pecuario en miles de m^3 por día
- C_B = Número de cabezas de ganado bovino en la subcuenca
- D_B = Dotación de agua en litros/cabeza/día para el ganado bovino
- C_P = Número de cabezas de ganado porcino en la subcuenca
- D_P = Dotación de agua en litros/cabeza/día para el ganado porcino
- C_O = Número de cabezas de ganado ovino en la subcuenca
- D_O = Dotación de agua en litros/cabeza/día para el ganado ovino
- C_C = Número de cabezas de ganado caprino en la subcuenca
- D_C = Dotación de agua en litros/cabeza/día para el ganado caprino
- C_E = Número de cabezas de ganado equino en la subcuenca
- D_E = Dotación de agua en litros/cabeza/día para el ganado equino
- C_A = Número de cabezas de aves en la subcuenca
- D_A = Dotación de agua en litros/ave/día para las aves

Las dotaciones de agua para cada tipo de ganado se proporcionan en la tabla 3.2.

Tipo de ganado	Dotación de agua (litros/cabeza/día)
Bovino	80
Porcino	12.5
Ovino	12.5
Caprino	12.5
Equino	80
Aves	0.3

Tabla 3.2 Dotaciones de agua por tipo de ganado

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.6 SUBMODELO DEMOGRÁFICO

La norma técnica Métodos de Proyección de Población CNA-NT-I-HA-001, emitida por la Gerencia de Ingeniería Básica y Normas Técnicas de la Comisión Nacional del Agua, establece el cálculo para realizar proyecciones de población. Es importante señalar que esta norma no proporciona nada nuevo al respecto, ya que estas ecuaciones para proyectar población son ampliamente usadas y recomendadas por otros autores y analistas.

La mayoría de los procedimientos de proyección se basan en la siguiente fórmula que permite conocer la población que habrá en un lugar, después de pasado determinado número de periodos de tiempo (meses, estaciones, semestres, años). Esta fórmula requiere conocer la población inicial, y sólo cubre el caso de tasa constante durante todo el periodo:¹⁹

$$P_{i+n} = P_i (1 + T_c)^n \quad (3.13)$$

Donde:

P_i = Población que existe al iniciar el periodo del tiempo "i". Se recomienda expresar la cantidad de habitantes en miles, para ciudades medianas, y en millones para grandes metrópolis, en ambos casos con sólo un decimal.

P_{i+n} = Población que habrá "n" periodos después de tiempo "i". Es decir para el mes, año, ciclo o temporada i + n.

T_c = Tasa de crecimiento promedio entre cada par de periodos consecutivos expresada en valor real (no en porcentaje). Frecuentemente los periodos y tasas son anuales, sin embargo la fórmula es aplicable a cualquier otro periodo de tiempo (la formula 3.15 indica como calcular T_c en % para periodos precedentes).

n = número de periodos que hay entre P_i y P_{i+n} . Es decir, el tiempo transcurrido entre la condición inicial y final, medido en ciclos homogéneos (meses, años, semestres, etc.).

Cuando durante el periodo se esperan diferentes tasas de crecimiento, se puede aplicar la misma fórmula anterior, pero de manera gradual, para periodos menores. Por ejemplo aplicándola periodo a periodo sería (no aparece el exponente, pues en este caso vale 1):

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 (1 + T_{c1}) \\ P_3 &= P_2 (1 + T_{c2}) \\ &\dots \\ P_n &= P_{n-1} (1 + T_{c_{n-1}}) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Los significados de las variables son los mismos que para la formula 3.13.

El ritmo (tasa) de crecimiento actual se determina aplicando la fórmula 3.15; debiéndose emplear en ella los datos de población más recientes de que se disponga. Preferentemente se deben analizar los cambios ocurridos los dos o tres últimos años. No deben emplearse tendencias deducidas de censos de más de 15 años de antigüedad, ya que la tendencia actual, y las necesidades de planeación, pueden diferir radicalmente de lo ocurrido antes.

¹⁹ La fórmula 3.13 sólo debe usarse para un número muy corto de periodos, ya que en cuestiones de población es altamente improbable que se mantenga constante determinada tasa de crecimiento. Para periodos mayores debe usarse el subconjunto de fórmulas 3.14.

$$T_c\% = ((P_{i+n} / P_i)^{1/n} - 1) * 100 \quad (3.15)$$

El significado de las variables involucradas es igual que en la fórmula 3.13.

Los datos de población para el cálculo de T_c se podrán obtener de los Censo de Población y Vivienda emitidos por INEGI.

3.7 SUBMODELO BALANCE HIDRÁULICO

La metodología para la estimación de la disponibilidad del agua superficial en la cuenca atenderá a la elaborada por la Comisión Nacional del Agua, y mediante la cual, se determinó la disponibilidad relativa de todas las cuencas hidrológicas del país. Estas disponibilidades ya fueron publicadas en el Diario Oficial de la Federación.

Metodología

El proceso de estimación de la disponibilidad de agua superficial en un sistema de cuencas interconectadas, natural o artificialmente, consta de tres fases principales: 1) Estimación del escurrimiento aguas abajo, 2) Distribución de las demandas aguas arriba, 3) Estimación del volumen disponible y 4) Estimación de la disponibilidad relativa.

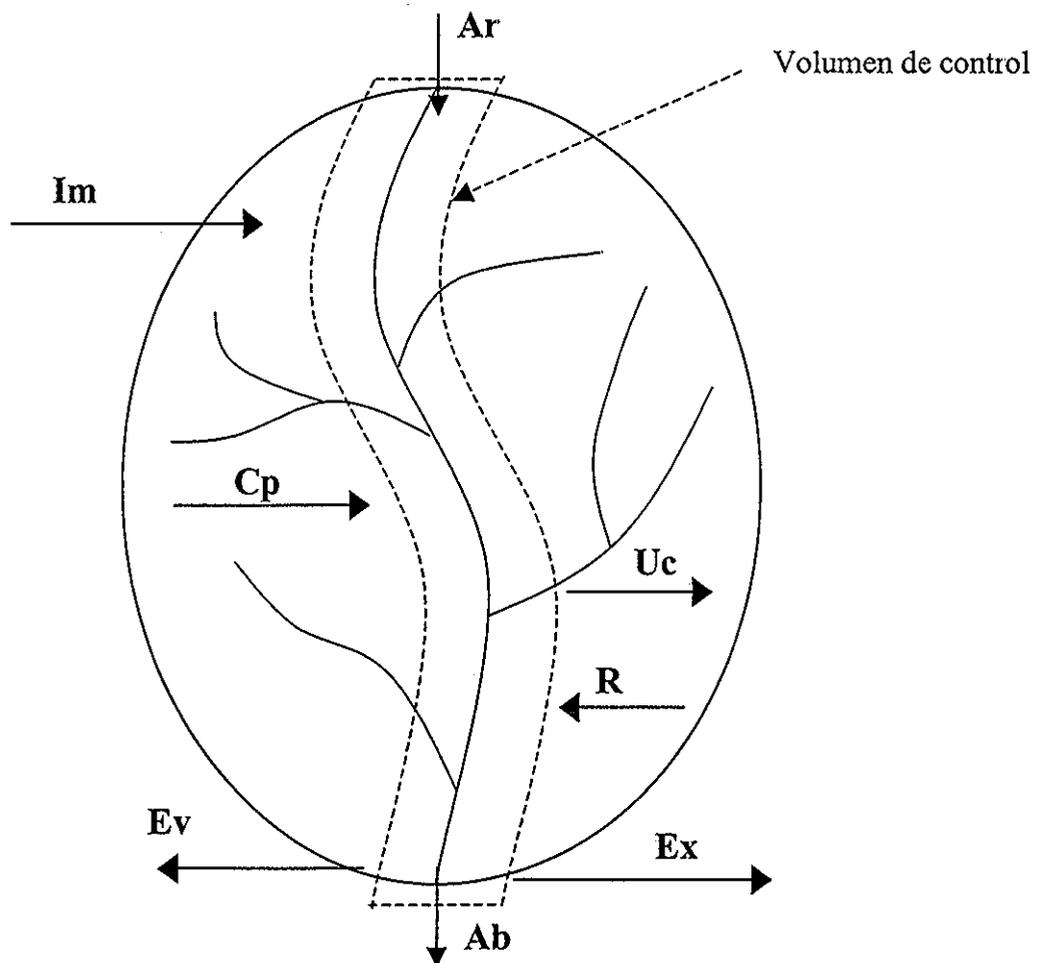


Figura 3.8 Diagrama de una cuenca intermedia

Donde:

Ab = Esgurrimiento aguas abajo
Ar = Esgurrimiento aguas arriba
Cp = Esgurrimiento por cuenca propia
Ev = Evaporación en vasos
Ex = Exportaciones
Im = Importaciones
R = Retornos
Uc = Usos consuntivos

1- Estimación del esgurrimiento aguas abajo

Una manera de obtener la expresión para la estimación del esgurrimiento aguas debajo de una cuenca, consisten aplicar el principio de continuidad a un volumen de control que envuelve a la corriente principal de la cuenca en cuestión como se muestra en la figura 3.8.

La figura 3.8 muestra una cuenca intermedia cuya corriente principal se encuentra dentro de un tubo imaginario, cuyos extremos coinciden con la entrada y salida de a cuenca. El planteamiento analítico de envolver el cauce de la corriente principal en un volumen imaginario para realizar el análisis de entradas y salidas de agua, evita involucrar los términos de esgurrimiento subsuperficial y subterráneo.

El principio de continuidad se aplica a la superficie del volumen de control de la siguiente manera:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \Delta V \quad (3.16)$$

En esta ecuación ΔV representa el cambio anual en el volumen de agua superficial almacenada. Se estima restando el volumen inicial almacenado al principio del año en cuestión del volumen almacenado al final del mismo.

$$\Delta V = V_2 - V_1 \quad (3.17)$$

Donde V_1 y V_2 son los volúmenes almacenados al principio y al final del periodo anual. Obviamente, ΔV puede ser positivo o negativo dependiendo de la magnitudes de V_1 y V_2 .

Identificando cada uno de los términos en la figura 3.8, la ecuación de continuidad se expresa de la siguiente manera:

$$C_p + A_r + R + I_m - (A_b + U_c + E_v + E_x) = \Delta V \quad (3.18)$$

En esta ecuación los retornos R representan la suma de los retornos superficiales, es decir, los volúmenes que se extraen de la red fluvial y que se reingresan a ella por no haber sido utilizados.

Despejando de la ecuación 3.18 el esgurrimiento aguas abajo A_b , tenemos:

$$A_b = C_p + A_r + R + I_m - (U_c + E_v + E_x + \Delta V) \quad (3.19)$$

Que es la expresión para estimar el escurrimiento aguas abajo. Respecto al proceso de estimación de la disponibilidad superficial, la última expresión se aplica sucesivamente a las cuencas parciales del sistema analizado en dirección de aguas arriba hacia aguas abajo.

2- Distribución de las demandas aguas arriba

Aparentemente todo el escurrimiento que sale aguas debajo de una subcuenca podría aprovecharse totalmente dentro de ella, sin embargo, si existen aprovechamientos aguas debajo de esta subcuenca, una fracción de este escurrimiento se utiliza par satisfacerlos parcialmente.

Lo anterior es porque los volúmenes extraídos en el cauce principal de una cuenca intermedia se satisfacen con los volúmenes aportados por los escurrimientos de aguas arriba, con el escurrimiento por cuenca propia y con las importaciones, si es que existen. Esta distribución de la extracción se hace en cada cuenca intermedia de manera proporcional a cada uno de estos conceptos y se procede de aguas abajo hacia aguas arriba.

Al respecto, es conveniente describir como escurrimiento reservado aguas abajo, R_{xy} , de una cuenca X, a la fracción del escurrimiento superficial que sale de la misma y que contribuya a satisfacer las demandas de la cuenca aguas abajo Y, y escurrimiento reservado de cuenca propia, R_{xx} , al que contribuye a la satisfacción de las extracciones dentro de la cuenca X. En ambos casos, los signos los subíndices que acompañan a la literal R, hacen referencia a las cuencas involucradas de la siguiente manera: R_{xy} se lee "volumen reservado de la cuenca X para la cuenca Y" y R_{xx} se lee "volumen reservado de la cuenca X para la cuenca X".

3- Determinación de los volúmenes disponibles

Los volúmenes disponibles de agua superficial en la desembocadura de una cuenca, D_{xy} , sin que causen problemas aguas abajo, se pueden estimar si a los escurrimientos aguas debajo de una cuenca, calculados con al ecuación 3.19, se les disminuyen los volúmenes reservados R_{xy} , con que dicha cuenca contribuye para satisfacer las extracciones aguas abajo. Estos volúmenes son susceptibles de asignarse o concesionarse por parte de CNA.

De acuerdo a lo anterior, el volumen disponible a la salida de la cuenca X para la cuenca Y es:

$$D_{xy} = A_{bx} - R_{xy} \quad (3.20)$$

Así mismo, el volumen remanente disponible por cuenca propia es, para la cuenca X:

$$D_{xx} = A_{bx} - R_{xx} \quad (3.21)$$

4- Disponibilidad relativa en la cuenca

Se entiende por disponibilidad relativa al cociente que resulta de dividir la suma del escurrimiento virgen (cuenca propia) más el escurrimiento aguas arriba, entre la suma de los volúmenes de aguas superficiales destinados a usos consuntivos, más el volumen comprometido.

El volumen comprometido será el volumen reservado de una cuenca X para una cuenca Y (R_{xy}), más el caudal ambiental o volumen ecológico destinado a la preservación de la flora y la fauna de los cauces, y que de acuerdo con el método Tennant, sugerido por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, éste deberá ser al menos el 10% del caudal medio en cada corriente.

Dependiendo del rango en que se encuentra el valor de la Disponibilidad Relativa (Dr), la cuenca se clasificará de acuerdo a la siguiente tabla.

Rango	Clave	Color	Descripción
$Dr \leq 1.0$	1	Rojo	Déficit
$1.0 \leq Dr \leq 2.0$	2	Amarillo	Equilibrio
$2.0 \leq Dr \leq 6.0$	3	Verde	Disponibilidad
$6.0 \leq Dr$	4	Azul	Abundancia

Tabla 3.3 Rangos de la disponibilidad relativa en una cuenca

Los rangos originales fueron modificados debido a que la metodología considera volúmenes de consumo y no de extracción, es decir no están implícitas las pérdidas. En cambio, este modelo ya incluye las pérdidas en todos los usos.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

CAPÍTULO 4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



CODIFICACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

La codificación del modelo de la cuenca se hará por submodelos. Cada submodelo o módulo estará agrupado independientemente, pero a la vez conectado por uno o más elementos. Estos elementos pueden ser entradas o salidas para cada submodelo. A continuación se podrá observar la codificación gráfica de cada uno de ellos, los cuales fueron previamente descritos en el capítulo 3. Estos módulos están codificados en el sistema Stella 6.0.1 y podrán ser analizados más a detalle por el lector, con tan sólo instalar el software *freeshare* que se encuentra en el CD que acompaña a esta tesis y abrir el modelo completo de la cuenca. No es la finalidad de esta tesis mostrar explícitamente en forma impresa cada una de las relaciones lógicas y matemáticas que componen el modelo, ya que el documento final crecería demasiado, razón por la cual el modelo codificado se acompaña en medio magnético. Cualquier duda que surja al leer este impreso, podrá despejarse al consultar el CD anexo.

Para poder llevar a cabo la codificación de los cinco submodelos, se requirió de información de la cuenca, contenida en cartas hidrológicas, topográficas y software técnico. La información que se utilizó es la siguiente:

- Carta hidrológica de aguas superficiales, Esc. 1:250,000 Pericos G13-7, INEGI
- Carta hidrológica de aguas superficiales, Esc. 1:250,000 Culiacán G13-10, INEGI
- Carta topográfica, Esc. 1:250,000 Pericos G13-7, INEGI
- Carta topográfica, Esc. 1:250,000 Culiacán G13-10, INEGI
- Software BANDAS, "Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales", Vol.1, IMTA
- Software ERICK II, "Extractor Rápido de Información Climatológica", v. 2.0, IMTA

4.1 CODIFICACIÓN DEL SUBMODELO LLUVIA-ESCURRIMIENTO

Para codificar el modelo Lluvia-Escorrimento primero es necesario identificar la cuenca en la carta hidrológica de aguas superficiales, indicada en el párrafo anterior. En esta carta se delimito la cuenca y cada una de sus subcuencas, S1, S2 y S3.

La información climatológica, principalmente la precipitación, es indispensable para correr este modelo. Por tanto, se deben identificar y ubicar cada una de las estaciones climatológicas existentes en la cuenca, así como la información histórica contenida. Esta información se puede observar en la tabla 4.1. Las estaciones palomeadas son las que contienen la información más completa y actualizada. La mayoría de estas estaciones se encuentran abandonadas y fuera de operación. Sólo se encuentran funcionando 11 estaciones de un total de 38, lo que representa un 29% de estaciones climatológicas en operación. Este porcentaje deja mucho que desear como medida de efectividad de la red climatológica de la región.

La información de la precipitación diaria de estas 11 estaciones fue obtenida del programa ERICK II, fue procesada para todos los años registrados y se concentro en un solo archivo. Este archivo se encuentra en el CD anexo, en una hoja de cálculo de Excel nombrada "Concentrado-estaciones climatológicas.xls"

Prácticamente todo el escurrimento aprovechable de la cuenca del río Culiacán se genera en las subcuencas S1 y S2, ya que el escurrimento generado en S3, escurre directamente

al mar, a través de los grupos de corrientes, y no sigue un cauce definido debido a la característica plana de la zona (valle de Culiacán). Por tanto, se trabajó sólo con las estaciones climatológicas que se ubican en S1 y S2, correspondiendo a 10 estaciones de las 11 marcadas en la tabla 4.1. La única estación funcionando en S3 es la estación Culiacán, clave 25015.

N°	Clave	Localidad	Latitud	Longitud	Operando
1	10002	Tamazula, Tamazula	24° 50'	106° 35'	√
2	10003	Canelas, Canelas	25° 7'	106° 47'	
3	10006	Topia, Topia	25° 12'	106° 21'	
4	10026	El Tarahumar, Tepehuanes	25° 30'	106° 42'	√
5	10037	La Huerta de Topia, Topia	25° 21'	106° 14'	√
6	10050	Ojito de Camellones, Canelas	25° 04'	105° 59'	√
7	10071	San Miguel de Lobos, Tepehuanes	25° 11'	106° 46'	√
8	10079	Sianori, Topia	25° 14'	106° 59'	
9	10087	Vasco Gil	25° 8'	106° 21'	√
10	10091	Colutla, Tamazula	25° 3'	106° 34'	
11	25001	Sanalona, Culiacán	24° 40'	107° 32'	√
12	25006	Badiraguato, Badiraguato	25° 22'	107° 20'	
13	25010	C.A.A.D.E.S., Culiacán	24° 40'	107° 33'	
14	25014	Culiacán, Culiacán	24° 40'	107° 33'	
15	25015	Culiacán, Culiacán	24° 49'	107° 33'	√
16	25016	Chapultepec, Culiacán	24° 40'	107° 32'	
17	25033	El Varejonal, Badiraguato	25° 06'	107° 23'	√
18	25041	Guatenipa, Badiraguato	25° 21'	107° 24'	√
19	25057	Las Flores (A.A.R.C.), Culiacán	24° 40'	107° 22'	
20	25069	Palos Blancos, Culiacán	24° 56'	107° 23'	
21	25094	Tameapa, Badiraguato	25° 39'	107° 24'	
22	25110	Badiraguato, Badiraguato	25° 22'	107° 24'	√
23	25111	Badiraguato (A.G.L.B.), Badiraguato	25° 21'	107° 24'	
24	25147	Culiacán, Culiacán	24° 40'	107° 47'	
25	25159	Lateral 56, Culiacán	24° 20'	107° 14'	
26	25160	Espinoza, Culiacán	24° 41'	107° 35'	
27	25162	La Curva, Culiacán	24° 43'	107° 19'	
28	25163	Andrew Weiss, Culiacán	25° 02'	107° 29'	
29	25164	Alto de Culiacancito, Culiacán	24° 40'	107° 41'	
30	25165	Bataoto, Culiacán	24° 33'	107° 23'	
31	25166	Costa Rica, Culiacán	24° 33'	107° 49'	
32	25167	San Lorenzo, Culiacán	24° 47'	107° 06'	
33	25168	Pitayal, Culiacán	24° 49'	107° 24'	
34	25169	Sataya, Culiacán	24° 32'	107° 09'	
35	25170	Tamarindo, Culiacán	25° 54'	107° 30'	
36	25171	Navolato, Culiacán	24° 47'	107° 22'	
37	25177	Santiago de los Caballeros, Badiraguato	25° 33'	107° 32'	
38	25179	Lateral 10, Culiacán	24° 40'	107° 23'	

Tabla 4.1 Red de estaciones climatológicas en la Cuenca del río Culiacán

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

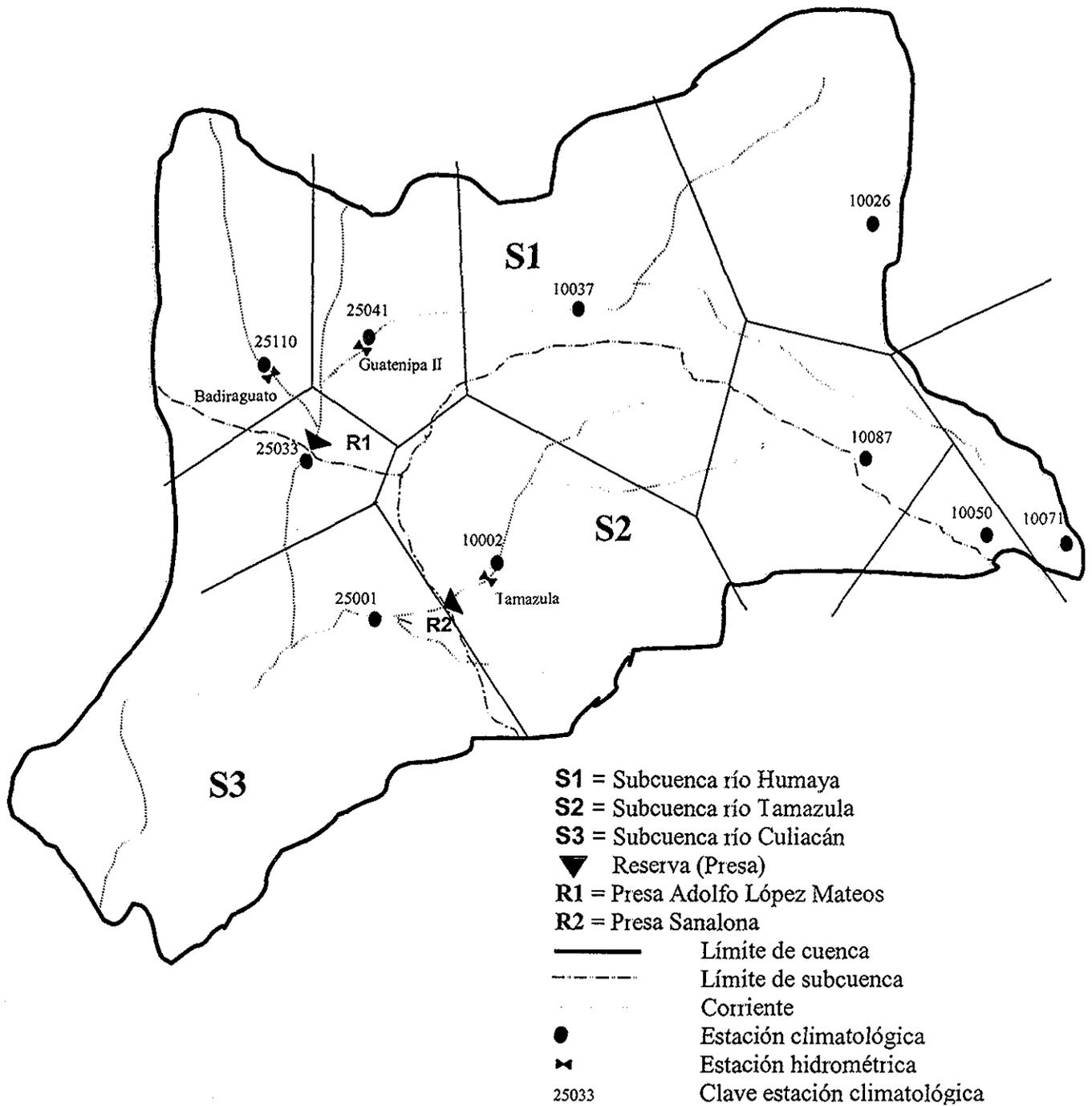


Figura 4.1 Delimitación por Polígonos de Tiessen y ubicación de estaciones climatológicas e hidrométricas

Para el cálculo de la precipitación se utilizó el método de Polígonos de Tiessen. Al delimitar los polígonos se crean áreas de influencia de cada una de las estaciones climatológicas. Eso significa, que la precipitación que está midiendo esa estación sólo aplica para su área de influencia. Con la ayuda de un planímetro, se calcularon cada una de las áreas de influencia en la carta de aguas superficiales editadas por INEGI. La información se concentra en la tabla 4.2, 4.3 y 4.4.

Las superficies totales fueron consideradas hasta las estaciones hidrométricas o de aforo para cada subcuenca. Para el caso de la subcuenca S1 se tomó la información de la estación hidrométrica Guatenipa II y Badiraguato, para la subcuenca S2 se tomó la información de la estación hidrométrica Tamazula. Estas estaciones están ubicadas gráficamente en la figura 4.1. La información de estas estaciones se obtuvo del programa BANDAS, editado por el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). La información hidrométrica correspondiente a las tres estaciones se procesó e incluyó en un archivo único de Excel llamado "Concentrado-estaciones hidrométricas.xls" contenido en el CD anexo.

N°	Clave	Estación	Área de influencia (km ²)
1	10026	El Tarahumar	2,754.75
2	10071	San Miguel de Lobos	711.25
3	10050	Ojito de Camellones	307.50
4	10087	Vasco Gil	755.00
5	10037	La Huerta de Topia	2,254.37
6	25041	Guatenipa	1,469.13
Total			8,252.00

Tabla 4.2 Áreas de influencia por polígonos de Tiessen, estación Guatenipa II (S1)

N°	Clave	Estación	Área de influencia (km ²)
1	10026	Badiraguato	1,018.00

Tabla 4.3 Áreas de influencia por polígonos de Tiessen, estación Badiraguato (S1)

N°	Clave	Estación	Área de influencia (km ²)
1	10037	La huerta	572.50
2	10087	Vasco Gil	437.50
3	10002	Tamazula	1,231.00
Total			2,241.00

Tabla 4.4 Áreas de influencia por polígonos de Tiessen, estación Tamazula (S2)

El método SCS, para el cálculo de escurrimientos, expuesto en el capítulo 3, fue codificado en el programa Stella utilizando la información de las subcuencas S1 y S2. Se codificó un modelo por cada estación de aforo, por tanto resultaron 3 modelos lluvia-

apreciar que la calibración es buena. Gráficamente no se observan diferencias considerables, por tanto podemos decir que la aproximación del modelo es confiable.

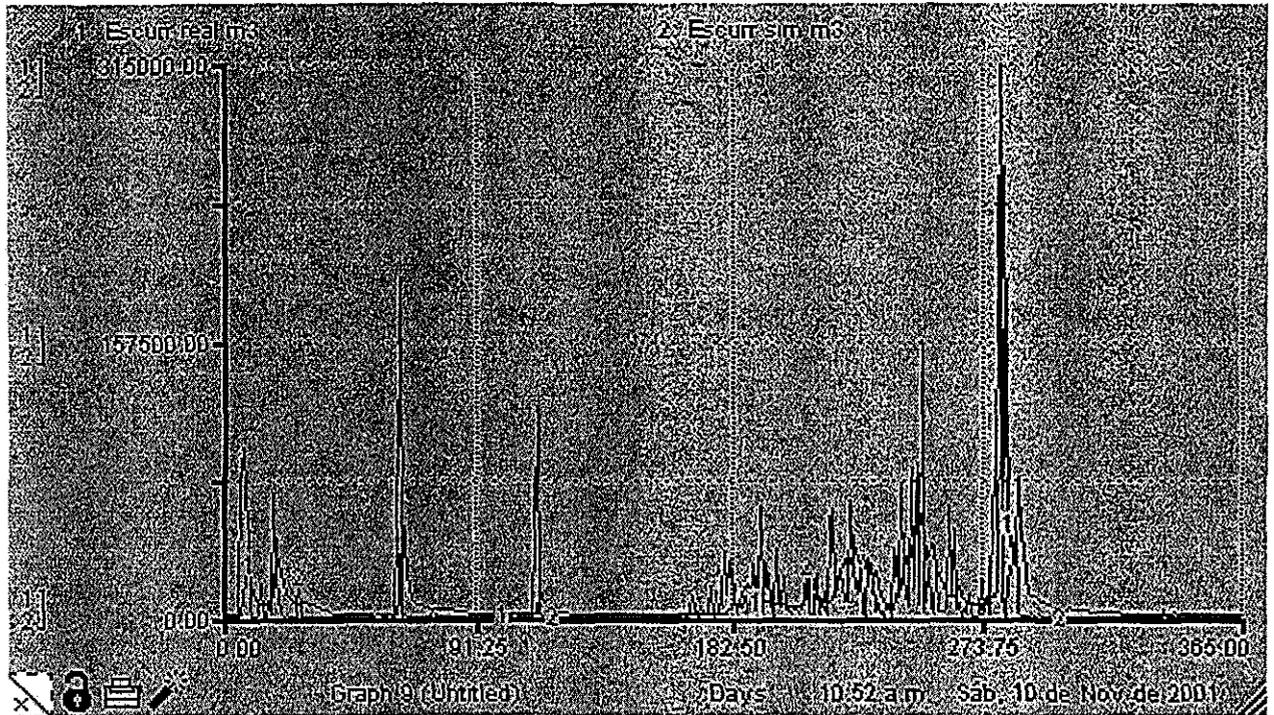


Figura 4.3 Esguurrimientos simulados contra esguurrimientos reales (Guatenipa II)

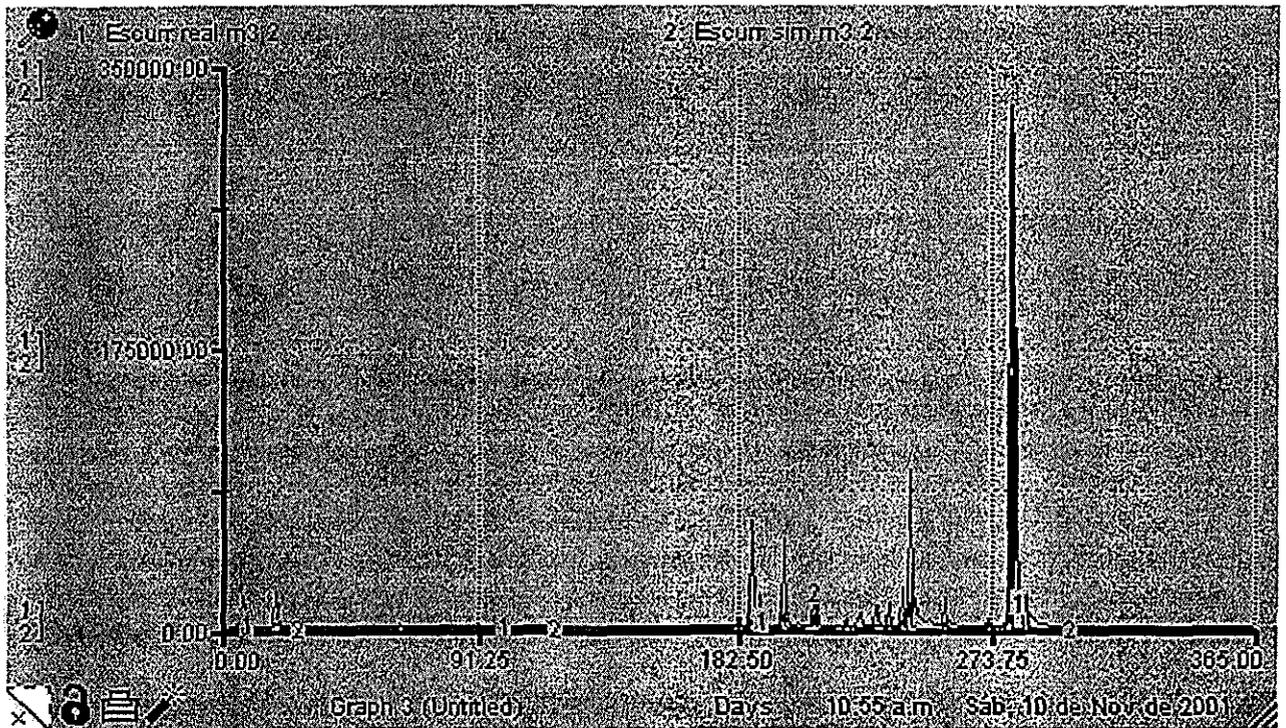


Figura 4.4 Esguurrimientos simulados contra esguurrimientos reales (Badiraguato)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

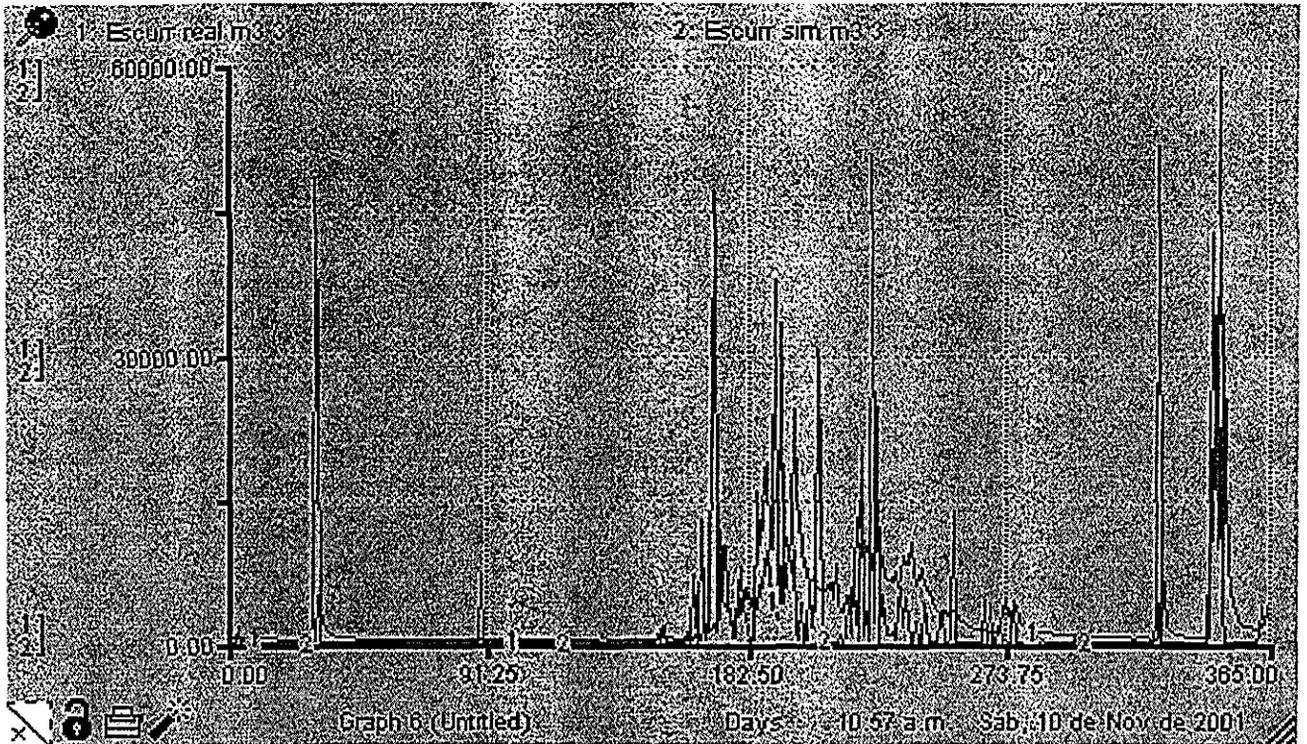


Figura 4.5 Ecurrimientos simulados contra escurrimientos reales (Tamazula)

4.2 CODIFICACIÓN DEL SUBMODELO EMBALSES

El submodelo embalses sólo aplica para las subcuencas S1 y S2, debido a que sólo en éstas existen almacenamientos; por el contrario en la subcuenca S3 no se encuentra ningún embalse. Este submodelo es alimentado por los resultados del submodelo lluvia-escurrimiento, del submodelo extracciones y del submodelo demográfico.

En la tabla 4.5 se detallan las áreas drenadas para cada embalse, desglosado por estación de aforo. Para la parte del área drenada que no tiene estación hidrométrica para su medición, el volumen de escurrimiento se calculará de acuerdo al *factor de escurrimiento* especificado en la tabla 2.8.

Embalse	Hasta la estación:	Área drenada (km ²)
Adolfo López Mateos	Badiraguato	1,018
	Guatenipa	8,252
	Sin estación	1,712
	Total	10,982
Sanalona	Tamazula	2,241
	Sin estación	1,039
	Total	3,280

Tabla 4.5 Áreas drenadas de la presa AdolfoLópez Mateos (S1) y Sanalona (S2)

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

El submodelo embalse se codifica de acuerdo al modelo matemático indicado en el apartado 3.4. Se codificaron dos submodelos embalse, uno para la presa Adolfo López Mateos (S1) y otro para la presa Sanalona (S2). La información de la evaporación del vaso en S1 se obtuvo de la estación climatológica El Varejonal, ubicada en el mismo almacenamiento. Para el vaso de S2 se utilizó la información de evaporación de la estación climatológica Sanalona.

En la figura 4.6 se puede observar la codificación en Stella del submodelo embalse para la presa Adolfo López Mateos. La correspondiente a la presa Sanalona es similar y corresponde a la figura 4.7.

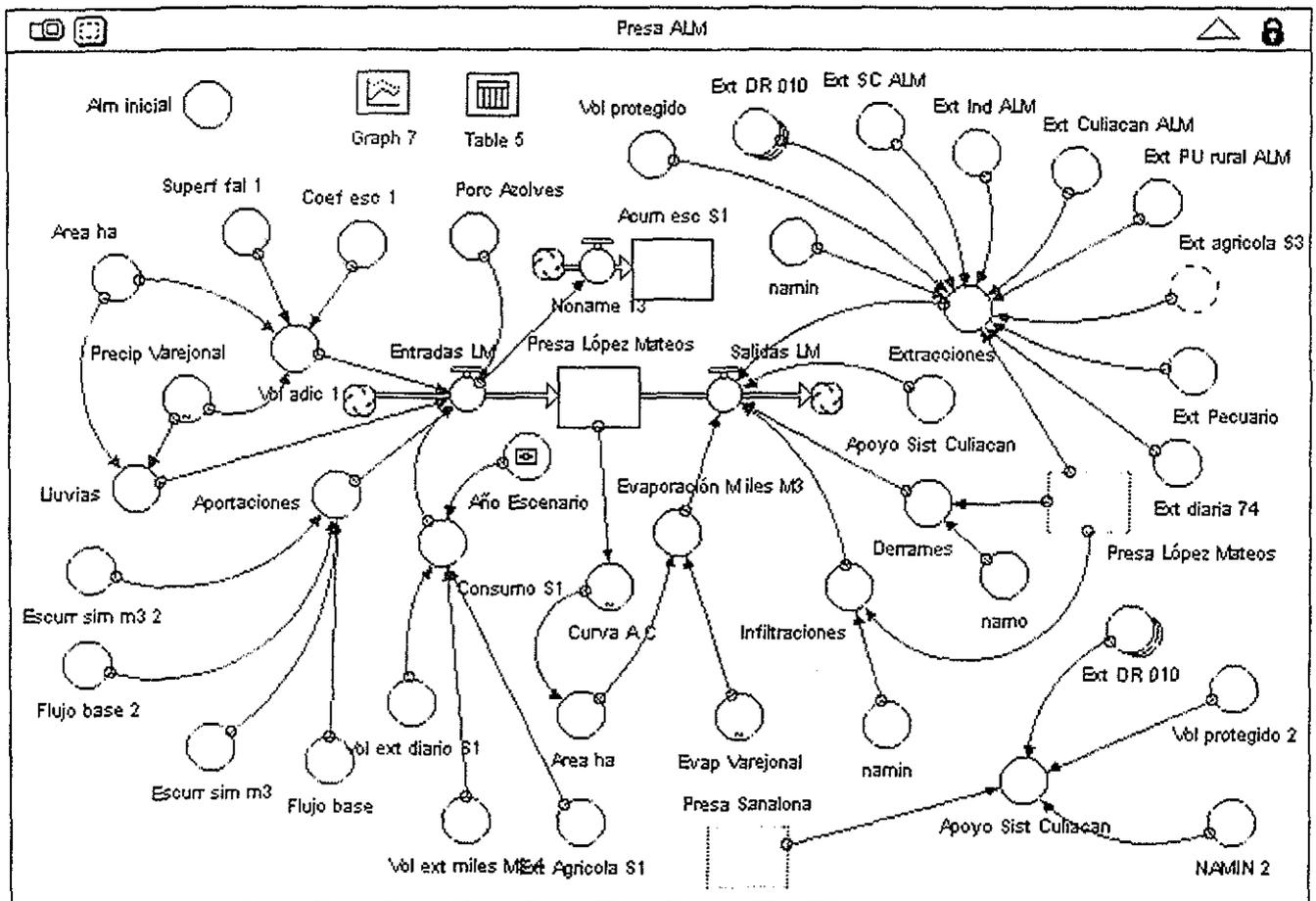


Figura 4.6 Submodelo embalses, presa Adolfo López Mateos (S1)

Se utilizó la información de las estaciones hidrométricas Badiraguato y Guatenipa II como entrada por escurrimiento directo al vaso para calibrar el submodelo de la presa López Mateos y la información de la estación Tamazula se usó para calibrar la presa Sanalona. En el área drenada que no corresponde a ninguna estación de aforo (tabla 4.5.), se utilizó un factor de escurrimiento histórico de 0.22 para los dos embalses.

La curva área capacidades de la presa López Mateos se encuentra contenida en una hoja de Excel llamada "Curva área-capac ALM.xls" y la correspondiente a la presa Sanalona se

puede consultar en el archivo "Curva área-capac SANALONA.xls". Los dos archivos se encuentran en el CD anexo.

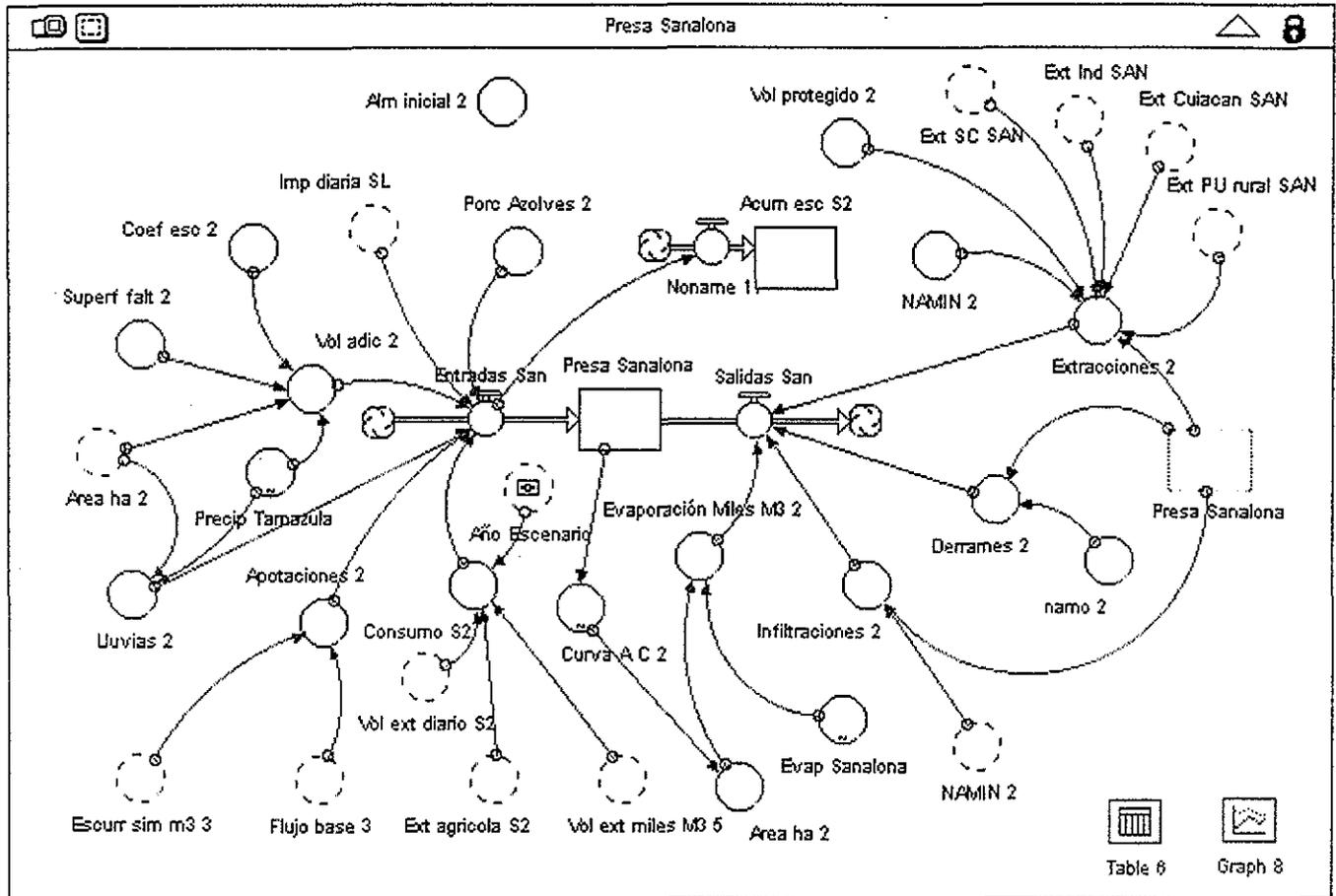


Figura 4.7 Submodelo embalses, presa Sanalona (S2)

En este submodelo se consideró una variable para usos protegidos (Vol protegido). Esta variable incluye el volumen que se protege en ambos embalses para los usos Público Urbano, Industrial y Pecuario. El volumen que se protege es el necesario para satisfacer las necesidades de estos usos por lo menos en dos años más, sin incluir el año actual.

También se incluye en este modelo la estimación de los azolves. Este dato es útil para descontar de las entradas a las presas, lo correspondiente a los azolves que entran junto con el caudal. Según el último estudio de batimetría realizado en la presa Adolfo López Mateos en el año 1990, los azolves acumularon un volumen de 88.039 millones de m^3 en 27 años de operación, lo que corresponde a un azolve anual de 3.26 Millones de m^3 . Este último dato representa el 0.18% del volumen medio anual escurrido en la subcuenca S1. Para la presa Sanalona, el más reciente estudio de batimetría se realizó en el año 1988, acumulando un volumen total de 109.83 millones de m^3 en 39 años de operación, lo que equivale a un azolve de 2.8 millones de m^3 ó 0.43% del volumen medio anual que escurre en la subcuenca S2.

Para calibrar el modelo se escogió un año reciente con escurrimiento promedio, es decir ni seco, ni húmedo. La presa López Mateos se calibró con el año 1996 y la presa Sanalona con el año 1998.

El almacenamiento máximo de la presa Adolfo López Mateos es de 2,365 millones de m³ (NAMO²⁰) y en la presa Sanalona es de 804 millones de m³. A partir de este almacenamiento los volúmenes de agua que entran al vaso salen por derrames hasta llegar al límite inferior del almacenamiento máximo.

La calibración del modelo atendió principalmente a la salida por infiltración, debido a que esta variable no es medida en los vasos, por el contrario, la evaporación, las extracciones y los derrames son medidos. Para que el submodelo de la presa Adolfo López Mateos pudiera calibrarse, se consideraron pérdidas por infiltración de 600 mil m³ diarios, es evidente que este volumen es muy alto, pero de acuerdo con los balances diarios del vaso, proporcionados por CNA, se calcularon estos volúmenes indirectamente y ascienden a más de 1,000 mil m³ diarios. Esto pone en evidencia los grandes errores de medición y por ende en el cálculo de los balances hidráulicos de los vasos por parte de esta dependencia. No es finalidad de esta tesis ahondar en esta problemática, sólo se menciona esto para que el lector tome en cuenta que la información disponible para elaborar este modelo no es del todo confiable, y en ocasiones es necesario hacer consideraciones del tipo lógico. Para la presa Sanalona se consideró una pérdida por infiltración de 400 mil m³ diarios.

4.3 CODIFICACIÓN DEL SUBMODELO EXTRACCIONES

4.3.1 Uso Agrícola

El uso agrícola en la cuenca se desarrolla en el Distrito de Riego 010, ubicado en el valle de Culiacán (S3). Existen además, otros usuarios que utilizan volúmenes para uso agrícola fuera del distrito de riego ubicados en las subcuencas S1, S2 y S3, estos corresponden básicamente a Unidades de Riego o pequeños productores agrícola. Los volúmenes que ahí se consumen son pequeños en comparación con los que extrae el distrito de riego.

El Distrito de Riego 010 está dividido en dos sistemas principales, el sistema Humaya y el sistema Culiacán. De acuerdo al padrón oficial de usuarios, el Distrito de riego 010 tiene una superficie física total de 199,751 hectáreas, de las cuales, 99,098 ha corresponden al Sistema Humaya y 100,653 ha al sistema Culiacán.

El Sistema Humaya se alimenta únicamente de la presa Adolfo López Mateos. En cambio el Sistema Culiacán se alimenta principalmente de la presa Sanalona y se auxilia de las presa Adolfo López Mateos y José López Portillo, esta última corresponde al Distrito de Riego 109 de la cuenca del río San Lorenzo.

Para la codificación del submodelo extracciones, uso agrícola, de acuerdo al apartado 3.5.1, se consideró la demanda existente para un año en el que no existen restricciones de agua y por tanto de cultivo. Es decir, un año abundante, en el que los productores pueden decidir libremente que cultivo sembrar. El año que se tomó para estimar la demanda es el ciclo agrícola 2001-2002. Para este ciclo no hubo restricciones de agua, además refleja las tendencias actuales de cultivo entre los productores de la zona.

²⁰ Nivel de Aguas Máximo Ordinario

Cultivo	Sistema Humaya		Sistema Culiacán	
	Superficie (ha)	Lámina neta (cm)	Superficie (ha)	Lámina neta (cm)
Otoño Invierno				
Algodón	600	64.67	1,439	39.18
Berenjena	180	65.73	932	73.05
Calabaza	1,795	58.45	135	65.74
Cártamo	1,220	23.66	860	16.40
Chile	730	87.75	2,670	63.68
Frijol	11,950	43.30	15,860	31.65
Garbanzo	35,998	26.27	10,745	24.67
Hortalizas	170	50.88	2,120	50.90
Maíz	24,537	71.97	41,777	56.99
Pepino	350	60.71	2,415	63.2
Sorgo	1,980	58.32	2,850	49.04
Tomate	2,360	80.64	6,013	56.13
Trigo	8,375	56.70	450	45.00
Varios	540	45.74	36	140.00
<i>Subtotal</i>	90,785		88,302	
Primavera – verano				
Maíz	2,800	71.00	3,100	56.58
Sorgo	719	54.60	1,038	45.00
Soya	--	--	2,900	43.40
<i>Subtotal</i>	3,519		7,038	
Segundos Cultivos				
Maíz	3,550	71.00	15,100	56.58
Sorgo	350	54.60	8,800	45.00
Soya	21,350	59.80	7,270	43.40
<i>Subtotal</i>	25,250		31,170	
Perennes				
Alfalfa	297	78.20	--	--
Caña	450	86.33	3538	60.87
Forrajes	3,341	77.34	870	51.70
Frutales	696	70.70	363	43.37
Sorgo forrajero	--	--	542	65.00
<i>Subtotal</i>	4,784		5,313	
Total	124,338		131,823	

Tabla 4.6 Plan de cultivos para un ciclo agrícola normal

La tabla 4.6 contiene los tipos de cultivo por ciclo agrícola para un año normal sin restricciones, así como la superficie para cada cultivo y sus láminas netas por sistema.

La tabla 4.7 muestra el concentrado del plan de cultivo anual en hectáreas para un ciclo agrícola normal, divididos por sistema.

**TESIS CON
FALLA DE CÍG**

Ciclo	Sistema Humaya (ha)	Sistema Culiacán (ha)
Otoño – Invierno	90,785	88,302
Primavera – verano	3,519	7,038
Segundos Cultivos	22,250	31,170
Perennes	25,250	31,170
Subtotal	124,348	131,823
Total		256,171

Tabla 4.7 Concentrado del plan de cultivos para un ciclo agrícola normal

Cabe aclarar que las láminas netas no son iguales en ambos sistemas (Humaya y Culiacán). Éstas difieren porque las condiciones del terreno son distintas en ambos sistemas. El tipo de suelo cambia de un sistema a otro al igual que la topografía, lo que ocasiona que el volumen de agua que demanda el cultivo cambie dependiendo de la topografía y permeabilidad del terreno. Otro aspecto a considerar es la tecnificación de riego. Algunos cultivos están más tecnificados que otros, al instalar sistemas de riego por goteo o aspersión que reducen considerablemente las pérdidas por riego.

La ecuación 3.10 se codificó en Stella tomando como información la correspondiente a las tablas 4.6 y 4.7. El modelo se muestra en la figura 4.8.

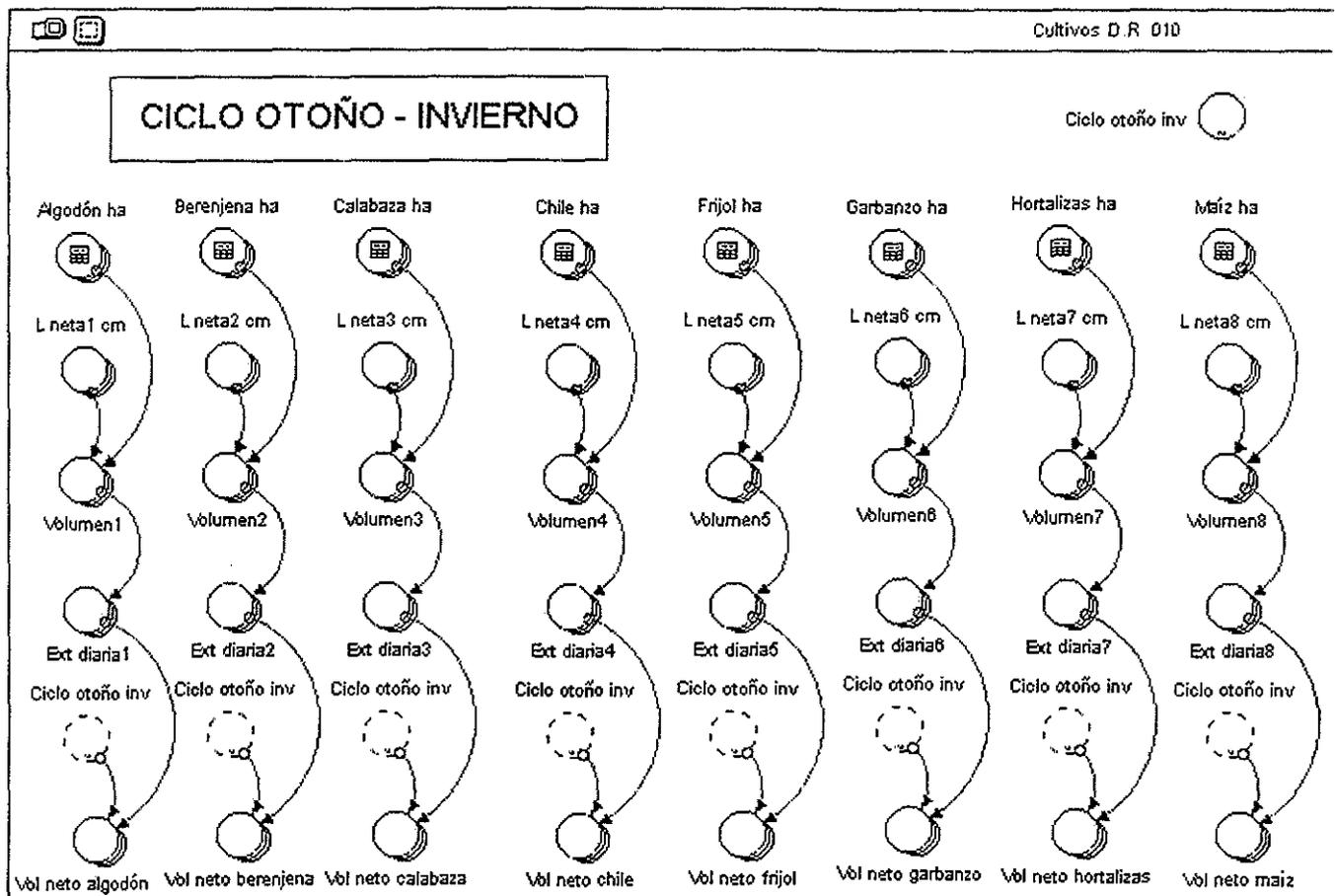


Figura 4.8 Submodelo extracciones, uso agrícola (Plan de cultivos D.R. 010)

Con apoyo del sistema REPDA se obtuvo el volumen agrícola para usuarios fuera del distrito. En la subcuenca S1 se extraen 464,000 m³, en S2 338,000 m³ y en S3 10,667,000 m³ por año.

En la figura 4.9 se puede observar el modelo, codificado en Stella, para el cálculo del volumen de extracción total en el distrito de riego, para ambos sistemas. Note que en este modelo se incluye la variable eficiencia. La eficiencia en el distrito se divide en eficiencia en el río, eficiencia en la red mayor y eficiencia en la red menor. Cada una de estas eficiencias difieren para el Sistema Humaya y el Sistema Culiacán. Con estas tres eficiencias se obtiene una eficiencia global del sistema y por ende, del distrito en su conjunto.

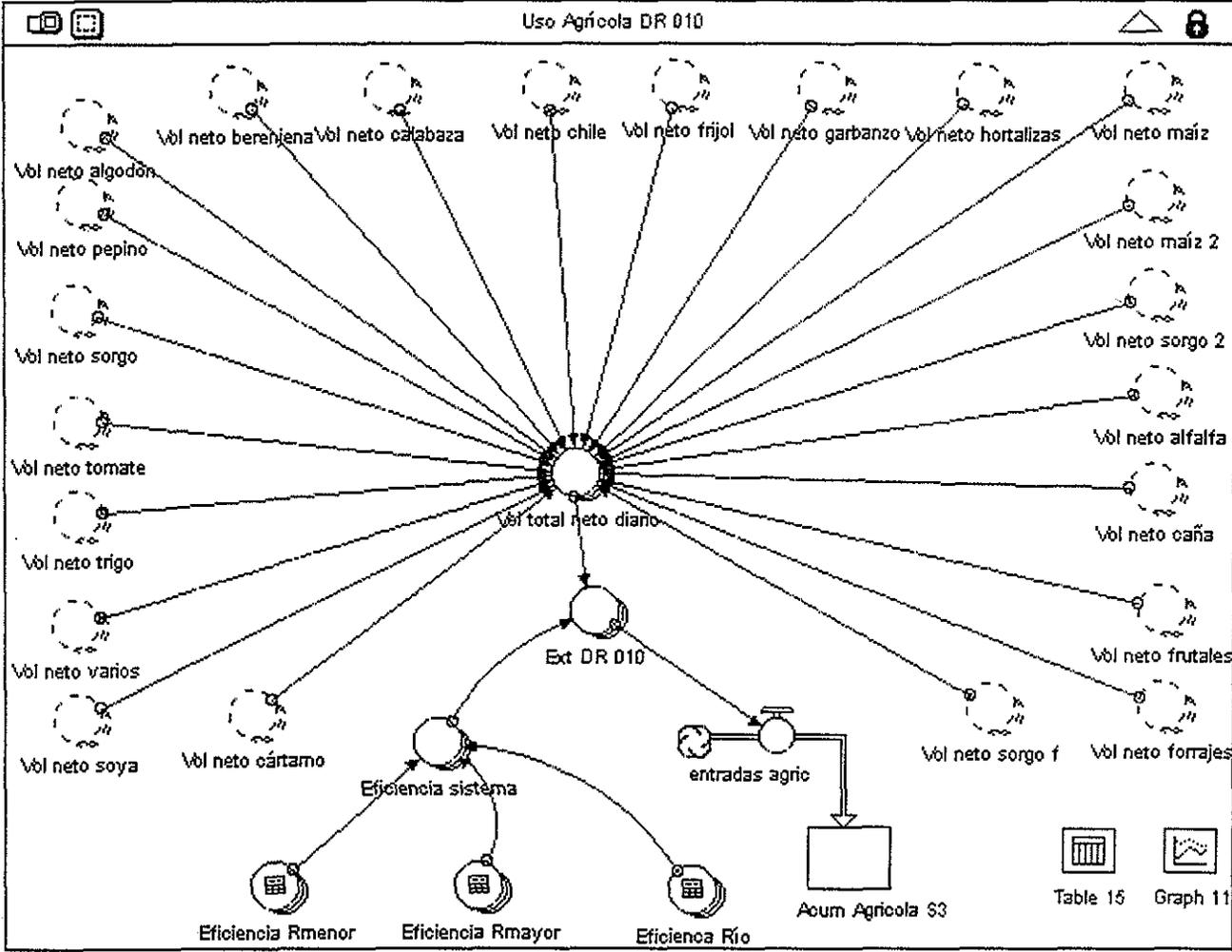


Figura 4.9 Cálculo de volumen de extracción para uso agrícola (D.R. 010)

4.3.2 Uso público urbano

Las dotaciones de agua para las poblaciones fueron obtenidas del estudio técnico "Cobertura de servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento en el Estado de Sinaloa e indicadores de gestión operacional, comercial y financiera de las juntas municipales de agua potable y alcantarillado del Estado de Sinaloa, al cierre del ejercicio

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

2000", elaborado por la Gerencia Regional Pacífico Norte de la Comisión Nacional del Agua. En él se presentan las dotaciones para los 18 municipios del Estado de Sinaloa y sus correspondientes cabeceras municipales. Estas dotaciones incluyen todos los consumos indicados en la ecuación de la Norma Técnica para el Cálculo de la Demanda de Agua Potable CNA-NT-I-HA-003, citada en el apartado 3.5.2.

El modelo de extracciones para uso público urbano codificado en Stella, se creó tomando en cuenta dos tipos de consumidores, estos son: Población urbana y población rural.

Población urbana: Las ciudades de Culiacán, Costa Rica, El Dorado y Navolato.

Población rural: El resto de las localidades.

Para fines de este estudio no se contemplará la ciudad de Navolato y EL Dorado, esto debido a que la extracción para uso público urbano en estas poblaciones es del tipo subterránea. No utilizan aguas superficiales para satisfacer su demanda. Tampoco se incluirá la ciudad de Costa Rica debido a que esta localidad se abastece únicamente de escurrimientos provenientes de la presa López Portillo, correspondiente a la cuenca del río San Lorenzo. Su ubicación geográfica le permite hacer la importación de este volumen a través del Distrito de Riego 109. Por tanto, sólo se considerará, para fines de este estudio, como población urbana a la ciudad de Culiacán y el resto, como población rural.

Las poblaciones se separaron en rural y urbana porque los patrones de consumo son distintos en cada una de ellas. Esto permitirá darle mayor precisión el modelo.

En la tabla 4.8 se muestra la dotación y eficiencia del sistema de la ciudad de Culiacán. Estos datos fueron obtenidos del estudio técnico antes citado. La tabla 4.9 contiene las dotaciones y coberturas del sistema de agua potable en las comunidades rurales. Esta información se utilizó para codificar el modelo, el cual se presenta en las figuras 4.10 y 4.11.

La eficiencia en los sistemas de agua potable en comunidades rurales se supondrá del 100%. En estos sistemas no existe medición para comprobar este valor, pero debido a que los sistemas son pequeños y fácilmente controlables, las pérdidas son muy pequeñas y por tanto despreciables para fines de este estudio. De la tabla 4.9 se obtuvieron los porcentajes promedio de cobertura, por subcuenca, para poblaciones rurales, estas son: para S1, cobertura de 56%, para S2, cobertura de 58% y para S3, cobertura de 75%.

La figura 4.11 contiene la codificación del submodelo extracciones para uso público urbano en poblaciones rurales. Sólo se muestra la parte que corresponde a la subcuenca S1. Para S2 y S3 la codificación es similar. Para más detalles consultar el CD anexo.

Las dotaciones, coberturas y eficiencias se conjuntarán con los datos del submodelo demográfico para la obtención final de los volúmenes de agua demandados en la cuenca para uso público urbano.

Ciudad	Subcuenca	Dotación bruta (Lt/hab/día)	Dotación real (Lt/hab/día)	Pérdidas (%)	Cobertura (%)
Culiacán	S3	298	189	36.5	99

Tabla 4.8 Dotación y eficiencia del sistema Culiacán

Municipio	Cobertura (%)		Dotación (Lt/hab/día)	
	Con sistema de Agua Potable	Sin sistema de Agua Potable	Con sistema de Agua Potable	Sin sistema de Agua Potable
Angostura	75	25	250	150
Badiraguato	43	57	250	150
Cósala	80	20	250	150
Culiacán	70	30	250	150
Mocorito	71	29	250	150
Navolato	79	21	250	150
Canelas	89	11	250	150
Guanacevi	69	31	250	150
Tamazula	19	81	250	150
Tepehuanes	75	25	250	150
Topia	88	12	250	150
Gpe. y Calvo	65	35	250	150

Tabla 4.9 Dotaciones en comunidades rurales

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

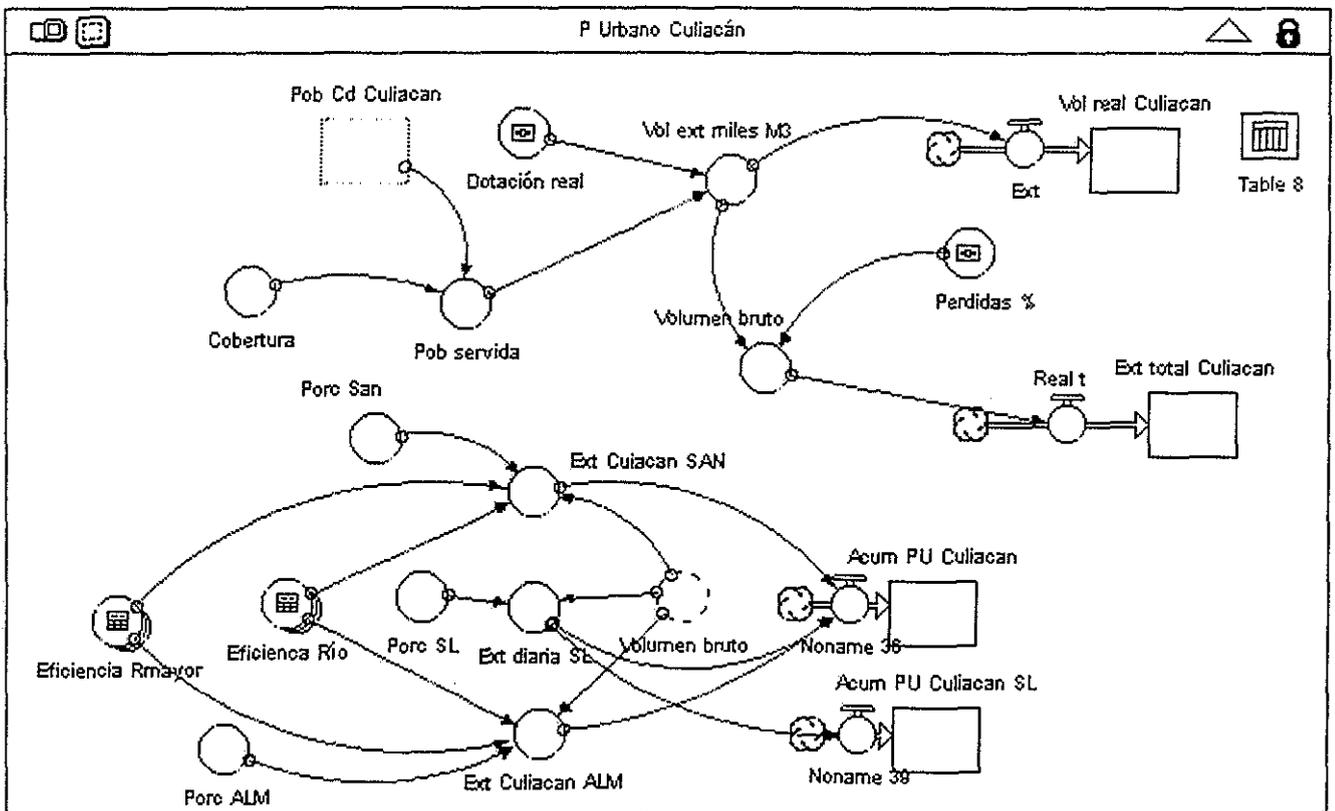


Figura 4.10 Submodelo extracciones, uso público urbano (Ciudad de Culiacán)

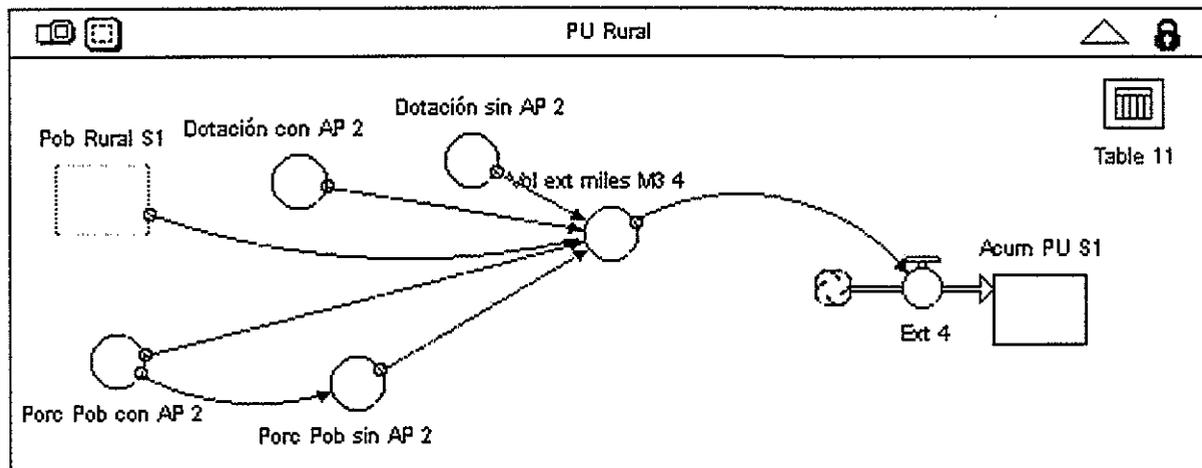


Figura 4.11 Submodelo extracciones, uso público urbano (Población rural)

4.3.3 Uso industrial

Los volúmenes para uso industrial fueron obtenidos del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA). En este sistema se encuentran registrados los títulos de concesión de aguas nacionales para cada una de las cuencas hidrológicas del país. Los datos obtenidos se exponen en la tabla 4.10. Sólo se consideran volúmenes concesionados de agua superficial. Es claramente observable que toda la actividad industrial se lleva a cabo en la subcuenca S3.

Subcuenca	Volumen (m3)
S1	0
S2	0
S3	9,948,596

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 4.10 Demanda para uso industrial por subcuencas

Estos volúmenes actuales de extracción se proyectaron al futuro con una tasa de crecimiento de la economía industrial proporcionado por la Secretaría de Planeación y Desarrollo del Gobierno del Estado de Sinaloa (tercer informe de gobierno), ya que el 100% de la actividad industrial de la cuenca se ubica en la subcuenca S3, en los municipios de Culiacán y Navolato, correspondientes ambos al Estado de Sinaloa.

Para proyectar el estado tendencial más probable de la industria, se tomará como índice de crecimiento anual 3.58%. Este dato se obtuvo como el promedio de una serie histórica del Producto Interno Bruto para la economía industrial del Estado de Sinaloa, que va del año de 1993 a 2000. Ya que no existen proyecciones oficiales disponibles al respecto, este dato recabado es el más preciso para cumplir con el objetivo del estudio (figura 4.12)

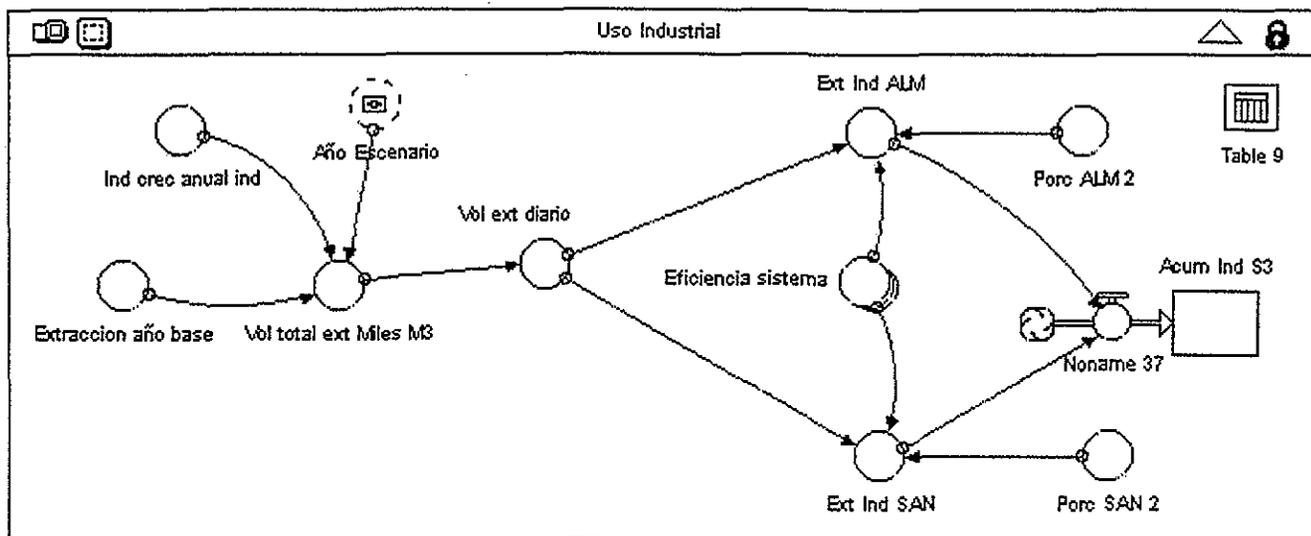


Figura 4.12 Submodelo extracciones, uso industrial

4.3.4 Uso Pecuario

De la misma forma que el uso industrial, el volumen de extracción para uso pecuario fue obtenido del sistema REPDA. Los volúmenes se concentran en la tabla 4.11.

Subcuenca	Volumen (m3)
S1	2,373
S2	62,227
S3	426,885
Total	491,485

Tabla 4.11 Demanda para uso pecuario por subcuencas

Es importante aclarar que el volumen de extracción obtenido del sistema de información REPDA, considera todos los elementos indicados en la ecuación 3.12.

El comportamiento de la industria ganadera en la región muestra un crecimiento histórico promedio anual del 4.07%. Este dato se obtuvo analizando el producto interno bruto en una serie histórica del año 1993 a 2000 de la actividad económica ganadera, según cifras publicadas en el tercer informe de gobierno del Estado de Sinaloa. De la misma forma que para el uso industrial, la proyección tendencial será acorde con el crecimiento promedio de los últimos años (4.07%). La falta de proyecciones oficiales nos orilla a hacer esta suposición.

El modelo codificado en Stella para el uso pecuario se muestra en la figura 4.13.

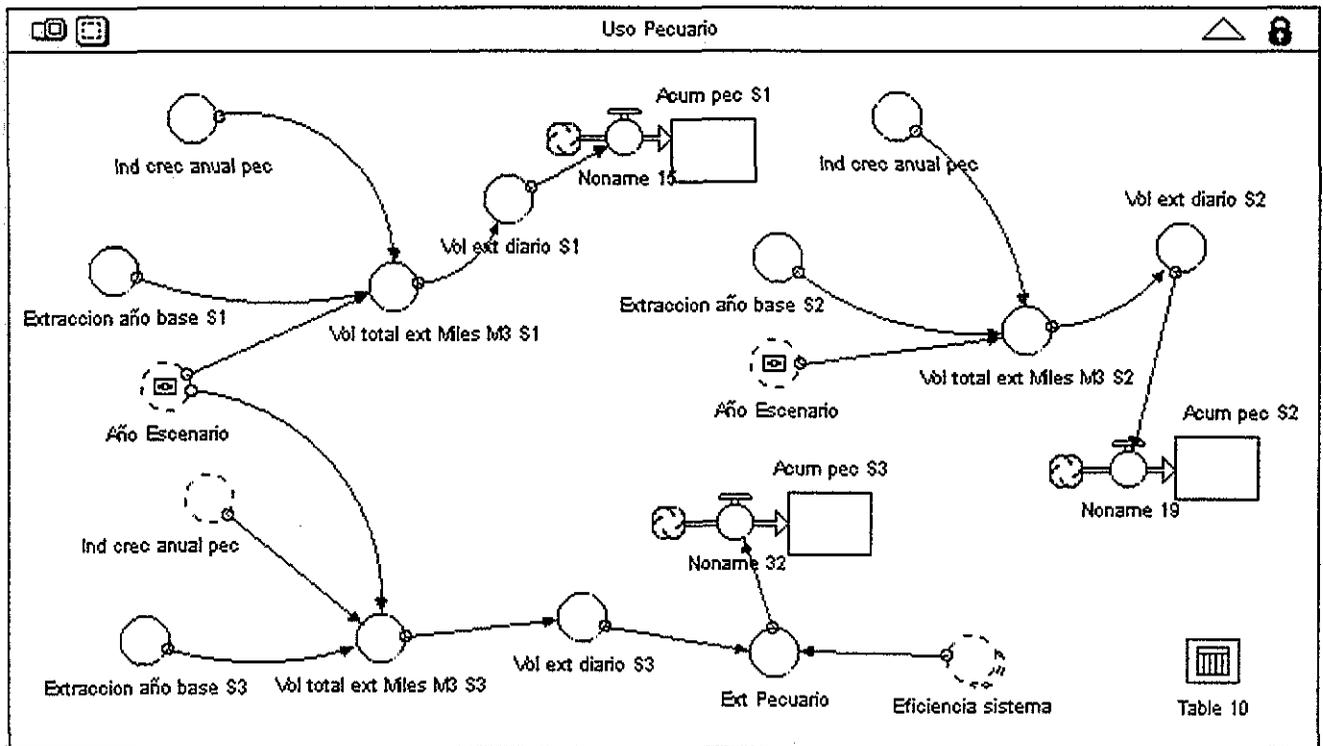


Figura 4.13 Submodelo extracciones, uso pecuario

4.4 CODIFICACIÓN DEL SUBMODELO DEMOGRÁFICO

La base de este submodelo estriba en el cálculo de la población de la cuenca y su proyección al futuro. La información demográfica, proporcionada por INEGI, se clasifica por estados y municipios, por esta razón, se hizo uso de los sistemas de información geográfica para calcular la población ubicada solamente dentro de la cuenca. Por ejemplo, hay municipios que son divididos en dos o más partes por el parteaguas de la cuenca (figura 4.14) y se requiere contabilizar sólo la población de la parte de ese municipio que queda dentro de la cuenca. Para esto, el uso del software *Arc View GIS 3.2a* fue de gran utilidad.

El anexo 2 muestra el comportamiento histórico de los principales municipios y ciudades que se ubican en la cuenca del río Culiacán.

En la figura 4.14 se pueden visualizar los municipios que corresponden a la cuenca del río Culiacán. Note que la mayor parte de ellos son divididos por el parteaguas. En la tabla 4.12 se concentra la información demográfica extraída del sistema de información geográfica por municipio y subcuenca.

Las proyecciones de la población para los años 2010, 2020 y 2030 fueron obtenidas en el Consejo Estatal de Población del Estado de Sinaloa (COESPOSIN). La información se muestra en la tabla 4.13. Estas proyecciones se utilizarán para calcular, con ayuda del submodelo extracciones, los volúmenes para uso público urbano que se consumirán en la cuenca para los tres horizontes de planeación. El cálculo de estas proyecciones obedece a la ecuación 3.13.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

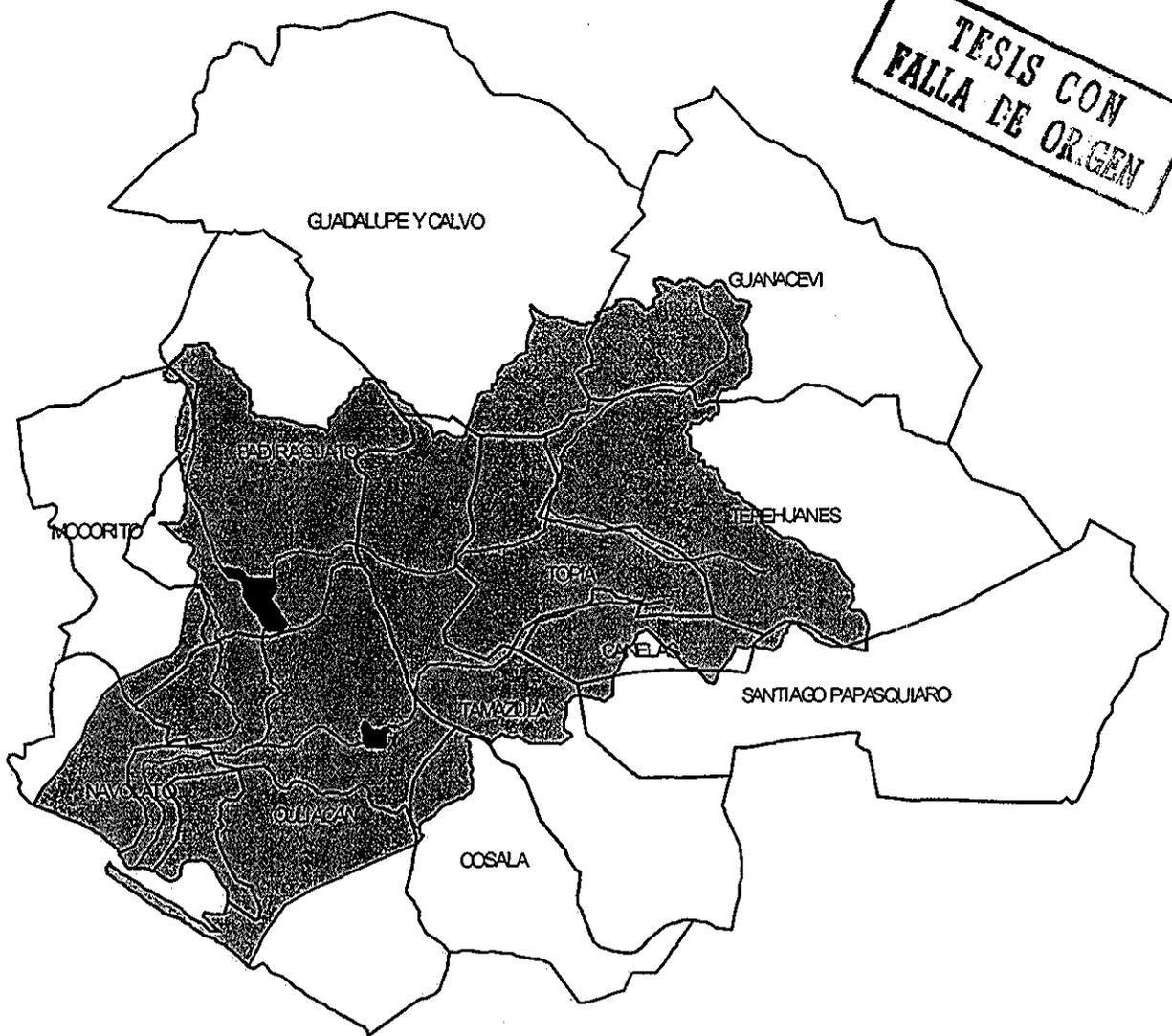


Figura 4.14 Municipios correspondientes a la cuenca del río Culiacán

Estado	Municipio	Población S1	Población S2	Población S3	Población total
Durango	Canelas	1,719	2,579	0	4,298
	Guanacevi	1,610	0	0	1,610
	Tamazula	4,862	7,292	0	12,154
	Tepehuanes	3,724	0	0	3,724
	Topia	6,982	1,745	0	8,727
Sinaloa	Angostura	0	0	10,340	10,340
	Badiraguato	22,645	0	0	22,645
	Cosala	0	1,193	0	1,193
	Culiacán	5,110	10,221	627,700	643,031
	Mocoquito	0	0	10,243	10,243
	Navolato	0	0	119,527	119,527
Chihuahua	Guadalupe y Calvo	4,616	0	0	4,616
Total		51,268	23,030	767,810	842,108

Tabla 4.12 Población en la cuenca por municipio y subcuenca, según Censo 2000

Estado	Municipio	Tipo de población	2000	2010	2020	2030
Durango	Canelas	Rural	4,298	4,342	4,359	4,363
	Guanacevi	Rural	1,610	1,607	1,604	1,603
	Tamazula	Rural	12,154	12,718	13,009	13,096
	Tepehuanes	Rural	3,724	3,503	3,385	3,093
	Topia	Rural	8,727	8,625	8,561	8,539
Sinaloa	Angostura	Rural	10,340	11,391	12,337	13,334
	Badiraguato	Rural	22,645	24,322	25,968	27,582
	Cosalá	Rural	1,193	1,320	1,380	1,462
	Culiacán	Urbana	540,823	602,442	666,906	713,148
		Rural	102,208	119,734	122,914	124,004
	Mocorito	Rural	10,243	11,544	12,560	13,261
	Navolato	Rural	119,527	135,103	148,011	155,749
Chihuahua	Guadalupe y Calvo	Rural	4,616	5,077	5,421	5,665
	Sub total urbana		540,823	602,442	666,906	713,148
	Sub total rural		301,285	339,286	359,509	371,751
	Total		842,108	941,728	1,026,415	1,084,899

Tabla 4.13 Proyección de la población en la cuenca al año 2030

En las tablas 4.12 y 4.13 se incluyó el municipio de Angostura, en el estado de Sinaloa. Esto obedece a que este municipio no se encuentra geográficamente dentro de la cuenca, pero una parte de él sí hace uso de las aguas provenientes de la cuenca del río Culiacán para satisfacer la demanda de agua para uso público urbano, utilizando como fuente de abastecimiento los canales del Distrito de Riego 010 que provienen de la presa Adolfo López Mateos.

A partir de las tablas 4.12 y 4.13 se obtuvo la tabla 4.14, que concentra las poblaciones proyectadas al año 2010, 2020 y 2030 de la población rural y urbana en las tres subcuencas de estudio. Esta es la información que se codificó en Stella (figura 4.15)

Subcuenca	2000		2010		2020		2030	
	P. urbana	P. rural						
S1	--	51,268	--	54,219	--	56,320	--	57,958
S2	--	23,030	--	25,254	--	25,804	--	26,046
S3	540,823	226,987	602,442	259,813	666,906	277,385	713,148	287,747
Total	540,823	301,285	602,442	339,286	666,906	359,509	713,148	371,751

Tabla 4.14 Proyección de la población por tipo y subcuenca

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

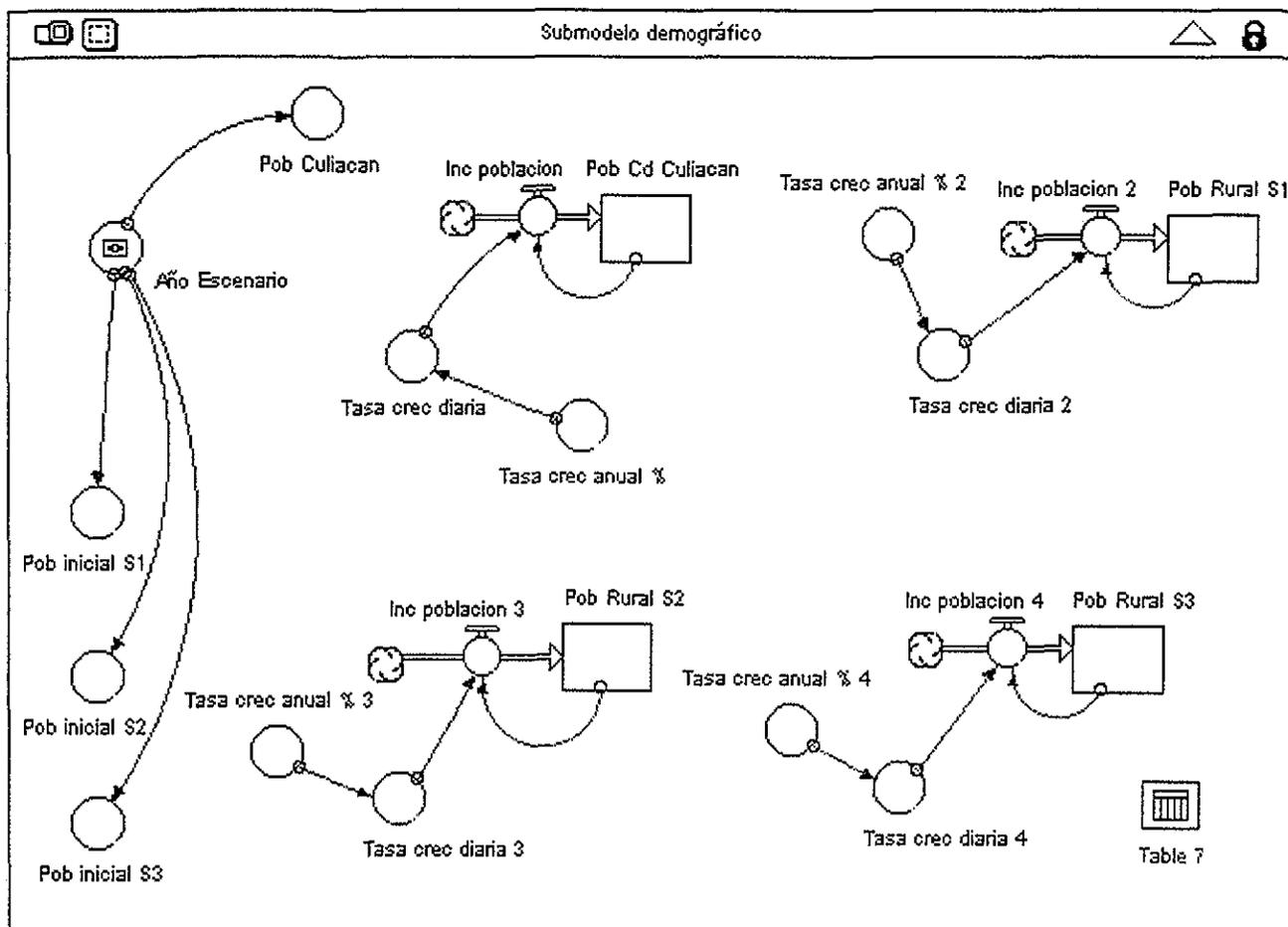


Figura 4.15 Submodelo demográfico

4.5 CODIFICACIÓN DEL BALANCE HIDRÁULICO

De acuerdo a la metodología expuesta en el capítulo 3.7, se codificó el modelo en el sistema Stella. Para este submodelo se supuso que la variación del almacenamiento (ΔV), es igual a cero. La figura 4.16 muestra la codificación, para la subcuenca S1 de la estimación de los escurrimientos aguas abajo (Ab). El modelo es similar para las subcuencas S2 y S3. El modelo correspondiente a los volúmenes reservados (Rxy) se puede consultar en el CD anexo.

Los volúmenes disponibles por subcuenca DS1, DS2 y DS3 fueron calculados con ayuda de la información proporcionada por los submodelos Ab y Rxy. La relación lógica de estas variables también puede ser consultada en el CD anexo.

También se codificó el cálculo de la disponibilidad relativa (D_r), tal y como se muestra en la figura 4.17, donde se incluye el cálculo de las 3 subcuencas.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

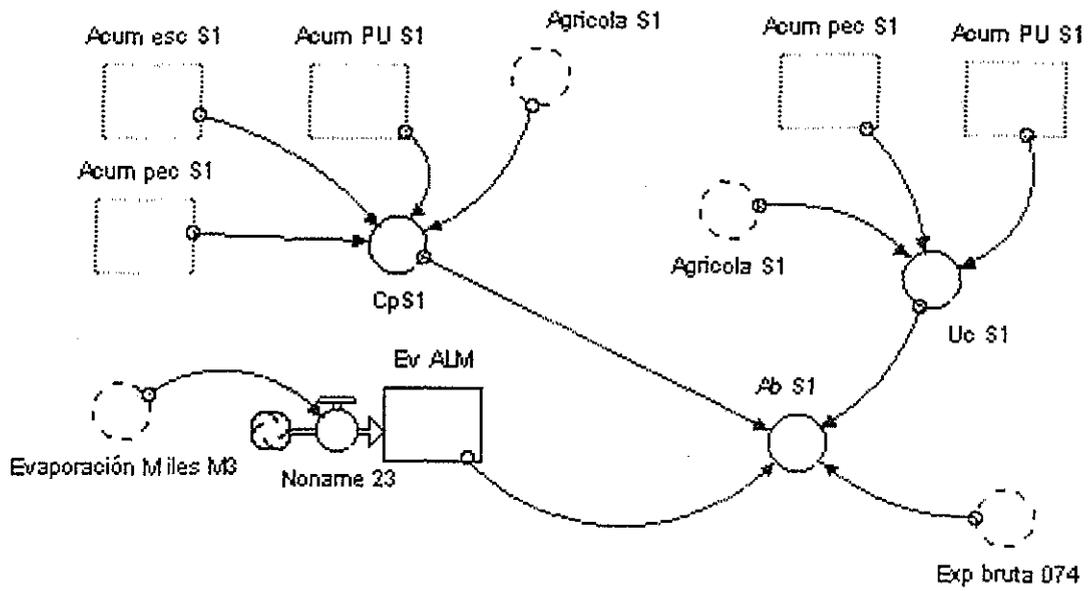


Figura 4.16 Submodelo balance hidráulico (Ab)

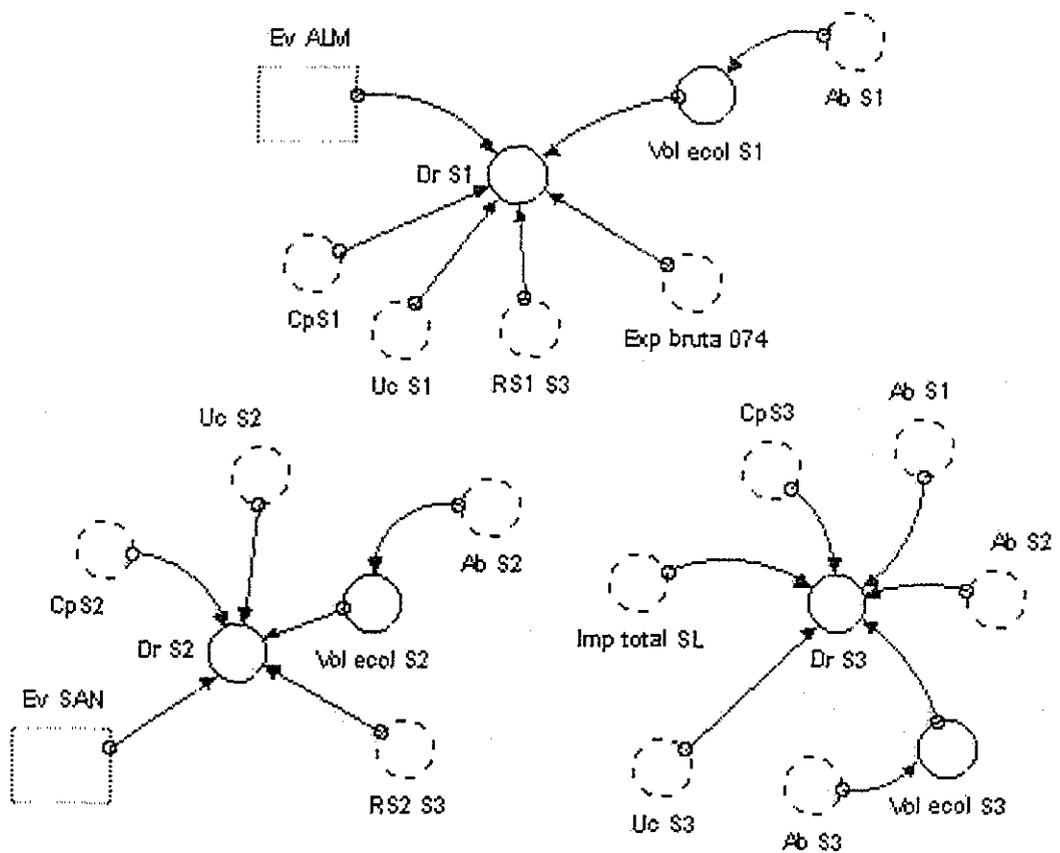


Figura 4.17 Submodelo balance hidráulico(Dr)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

También se incluyó el criterio de la ONU para evaluar la disponibilidad del agua en la cuenca. Este criterio nos dice que una población requiere cuando menos 2,000 m³ de agua, por habitante por año, para poder satisfacer sus necesidades y desarrollarse. En este caso, se consideró el total de la población existente en la cuenca, incluyendo las poblaciones de Costa Rica, El Dorado y Navolato, quienes se abastecen de otras fuentes de agua diferentes a la superficial y que no fueron incluidas en el submodelo demográfico.

La población total resultante es la siguiente:

Año 2000⇒ Población 903,439

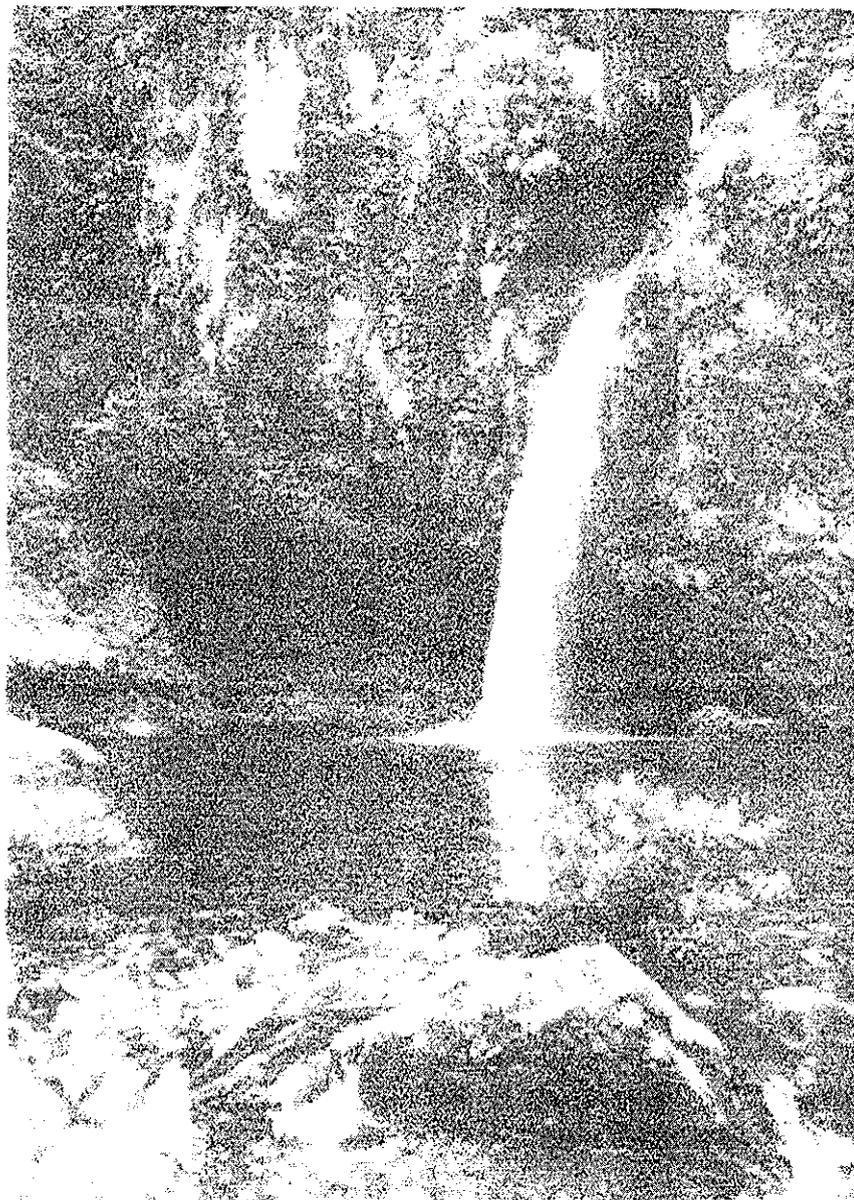
Año 2010⇒ Población 1,009,994

Año 2020⇒ Población 1,100,415

Año 2030⇒ Población 1,164,147

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

CAPÍTULO 5



RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ESCENARIOS

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Este capítulo es la conclusión del estudio. En él se vierten los resultados de la simulación para las condiciones actuales y para diferentes escenarios posibles.

La simulación se realiza para tres niveles de escurrimiento:

- Escurrimiento promedio anual
- Escurrimiento promedio seco
- Escurrimiento promedio húmedo

La simulación se plantea para cuatro escenarios de planeación, estos son: el año 2001, que representa la situación actual de la cuenca, los años 2010, 2020 y 2030 que son horizontes de planeación a mediano y largo plazo.

El escurrimiento promedio anual representa la oferta media del agua en la cuenca y resulta de promediar la serie histórica de escurrimiento anuales medidos en las estaciones de aforo.

El escurrimiento promedio seco es un promedio de los años más secos. No se tomó el año con menor escurrimiento de la serie histórica, debido a que esa situación es muy extrema y poco probable que se presente. Por esta razón se promediaron los años más secos. Como consideración del analista se supuso que un año seco es aquel que corresponde a un escurrimiento total anual menor a 1,800 millones de m³ en las tres estaciones hidrométricas de aforo (Guatenipa, Badiraguato y Tamazula).

La misma consideración se hizo para el escurrimiento abundante. Como consideración del analista se supuso que un año abundante es aquel que corresponde a un escurrimiento total anual mayor a 2,800 millones de m³ en las tres estaciones hidrométricas de aforo (Guatenipa, Badiraguato y Tamazula).

Para determinar el escurrimiento promedio se realizó un simple promedio de los escurrimientos totales medidos en la cuenca. El escurrimiento promedio seco se calculó con el promedio de los años considerados secos. Lo mismo aplicó para el escurrimiento abundante.

Tomando en cuenta las consideraciones arriba indicadas, se tomó un año modelo para cada tipo de escurrimiento. Se procuró que el año seleccionado fuera acorde con los escurrimientos promedio calculados. La precipitación, que son los datos que alimentan el modelo, fue tomada de las series históricas para los años seleccionados.

Años seleccionados para la simulación

Escurrimiento promedio anual	1989
Escurrimiento promedio seco	1982
Escurrimiento promedio húmedo	1984

En el CD anexo se encuentran tres modelos de simulación, uno para cada tipo de escurrimiento. La razón por la que se hizo esto es porque la información de entrada para el modelo (series de precipitación) es muy extensa y diferente para cada tipo de escurrimiento. Cada uno de estos modelos contiene las series de precipitación que le

corresponde, por lo que el lector no tendrá la necesidad de estar añadiendo información climatológica al modelo.

5.1 INTERFASE DEL USUARIO

El diseño de la interfase del usuario es muy amigable. Consta de cuatro pantallas principales. El menú principal, esquema del modelo general, escenarios y resultados.

Los botones de información proporcionan ayuda al usuario. Es importante aclarar que el modelo digital no contiene explícitamente la fuente ni la forma en que se obtuvo la información que alimenta el modelo. Por lo que sí se quiere ahondar en la fuente de alguna variable o consideración lógica- matemática, favor de remitirse al documento de la tesis, el cual también esta contenido en el CD anexo.



Figura 5.1 Pantalla del menú principal

El menú principal es la primera pantalla que aparece al abrir el modelo, y muestra las conexiones hacia las otras fases del modelo (figura 5.1).

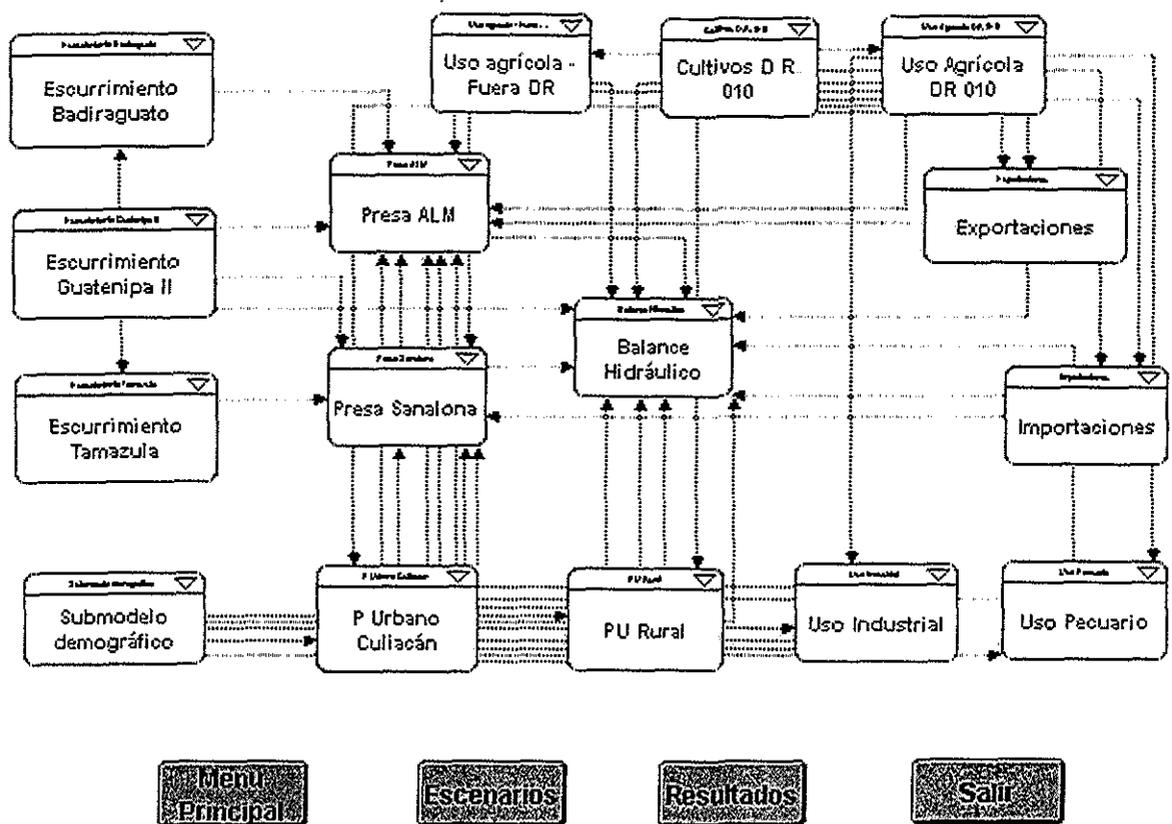


Figura 5.2 Pantalla del modelo general

La figura 5.2 corresponde al esquema general del modelo de simulación. En él se puede observar la interconexión de cada sub- submodelo. Las líneas indican salidas y entradas de información. Como es claramente apreciable existe una alta interconexión de los elementos. El flujo de la información es alto y un submodelo puede ser tanto exportador de información, como importador.

La figura 5.3 contiene los elementos susceptibles de modificarse para llevar a cabo un análisis de escenarios. Estos elementos son: año escenario, que abarca las opciones 2001, 2010, 2020 y 2030; modificación a la lluvia, que permite aumentar o disminuir las precipitaciones fuente del modelo; la dotación real del Sistema de Agua Potable de la ciudad de Culiacán; las pérdidas en porcentaje del Sistema de Agua Potable de la ciudad de Culiacán; las hectáreas por cultivo del plan de riego anual del Distrito de Riego 010 y las eficiencias de conducción del Distrito de Riego 010, divididas por sistema y tramo.

La figura 5.4 despliega los resultados de la simulación para las condiciones indicadas por el operador del modelo. Son principalmente los datos de consumo por subcuenca, escurrimiento total por subcuenca, volumen disponible por subcuenca, disponibilidad relativa, criterio ONU de disponibilidad, volumen ecológico y algunas gráficas de los embalses y escurrimientos simulados.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ESCENARIOS

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Cultivos [ha]	
Alfalfa ha[Culiacan]	0
Alfalfa ha[Humaya]	297
Algodón ha[Culiacan]	1439
Algodón ha[Humaya]	600
Berenjena ha[Culiacan]	932

Eficiencias D.R. 010	
Eficiencia Río[Culiacan]	0.9806
Eficiencia Río[Humaya]	0.9961
Eficiencia Rmayor[Culiacan]	0.8295
Eficiencia Rmayor[Humaya]	0.805
Eficiencia Rmenor[Culiacan]	0.7296
Eficiencia Rmenor[Humaya]	0.7317

Año Escenario

2001 2030

2001

Modif Lluvia

0.0000 2.0000

1.0000

Sistema de Agua Potable Culiacán

Dotación real (Lt/hab/día)

100.000 250.000

189.000

Pérdidas %

0.000 100.000

38.500

- Años Escenario:
- 2001
 - 2010
 - 2020
 - 2030

Información

Detener

Menu Principal

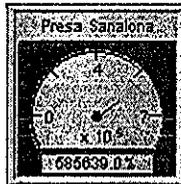
Modelo

Resultados

Salir

Figura 5.3 Pantalla de escenarios

RESULTADOS



CONSUMOS POR SUBCUENCA

Subcuenca S1

Acum. agricola S1	245
Acum. PU S1	4307
Acum. pop. S1	1833
Total	4885

Subcuenca S2

Acum. agricola S2	33
Acum. PU S2	1188
Acum. pop. S2	1197
Total	2318

Disponibilidad relativa por subcuenca

Dr. S1	1.130
Dr. S2	2.114
Dr. S3	2.714

Subcuenca S3

Acum. Agricola S3	2189.316
Acum. PU Culiacan	66.230
Acum. Ind. C3	40.910
Acum. PU Integral S3	40707
Acum. Pop. S3	2163
Total	27079.002

Escurremientos por cuenca propia

Acum. egs S1	2210.650
Acum. egs S2	840.280
C.S.S3	199.000
Total	3250.930

Criterio ONU (m3/hab/año)

Disponibilidad per cápita	2.754
---------------------------	-------

Rangos de disponibilidad relativa

Dr < 1.0	Déficit
1.0 < Dr < 2.0	Equilibrio
2.0 < Dr < 6.0	Disponibilidad
6.0 < Dr	Abundancia

Volumen disponible

Dr S1	43.158
Dr S2	185.157
Dr S3	107.687
Volumen disponible	330.812
V. disponible	387.280

Información

Detener

Esc. acum ALM

Esc. acum SAN

Entradas ALM

Entradas SAN

Pres. ALM

Pres. SAN

Menu Principal

Modelo

Ejecutar

Escenarios

Salir

Figura 5.4 Pantalla de resultados

5.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Ahora se procederá a ejecutar la simulación para los tres escenarios promedio de lluvia.

5.2.1 Esgurrimiento promedio anual

Para la llevar a cabo esta simulación se utilizó el archivo "Modelo - Esgurrimiento promedio anual.STM" contenido en el CD anexo.

* Unidades en miles de m³

	Subcuenca	Año Escenario			
		2001	2010	2020	2030
Esgurrimiento	Cuenca	3,206,108	3,206,108	3,206,108	3,206,108
Consumos	S1	4,331	4,553	4,712	4,838
	S2	2,156	2,350	2,434	2,517
	S3	2,317,314	2,336,170	2,356,924	2,378,902
Disponibilidad	S1	464,417	454,479	443,497	431,498
	S2	199,267	195,014	190,307	185,157
	S3	113,864	112,033	109,938	107,387
Disponibilidad relativa	S1	1.14	1.14	1.13	1.13
	S2	1.17	1.16	1.15	1.14
	S3	1.16	1.16	1.15	1.14
Disponibilidad per cápita	Cuenca	3,549	3,175	2,914	2,754
Volumen ecológico	Cuenca	341,920	340,350	338,607	336,677
Volumen disponible	Cuenca	435,629	421,176	405,134	387,365

Tabla 5.1 Resultados de la simulación para un "esgurrimiento promedio" anual

5.2.2 Esgurrimiento promedio abundante

Para la llevar a cabo esta simulación se utilizó el archivo "Modelo - Esgurrimiento promedio abundante.STM" contenido en el CD anexo.

* Unidades en miles de m³

	Subcuenca	Año Escenario			
		2001	2010	2020	2030
Esgurrimiento	Cuenca	4,697,555	4,697,555	4,697,555	4,697,555
Consumos	S1	4,331	4,553	4,712	4,838
	S2	2,156	2,350	2,434	2,517
	S3	2,317,314	2,336,170	2,356,924	2,378,902
Disponibilidad	S1	1,484,467	1,472,943	1,460,236	1,446,515
	S2	492,909	489,083	484,857	480,286
	S3	256,301	255,520	254,560	253,048
Disponibilidad relativa	S1	1.53	1.52	1.51	1.50
	S2	1.59	1.58	1.57	1.56
	S3	1.55	1.54	1.53	1.52
Disponibilidad per cápita	Cuenca	5,200	4,651	4,269	4,035
Volumen ecológico	Cuenca	626,247	624,655	622,891	620,940
Volumen disponible	Cuenca	1,607,430	1,592,891	1,576,762	1,558,910

Tabla 5.2 Resultados de la simulación para un "esgurrimiento promedio abundante"

5.2.3 Escurrimiento promedio seco

Para la llevar a cabo esta simulación se utilizó el archivo "Modelo - Escurrimiento promedio seco.STM" contenido en el CD anexo.

* Unidades en miles de m³

	Subcuenca	Año Escenario			
		2001	2010	2020	2030
Escurrimiento	Cuenca	2,265,702	2,265,702	2,265,702	2,265,702
Consumos	S1	4,331	4,553	4,712	4,838
	S2	2,156	2,350	2,434	2,517
	S3	2,317,314	2,336,170	2,356,924	2,378,902
Disponibilidad	S1	-75,442	-83,548	-92,532	-102,510
	S2	-43,737	-48,436	-53,641	-59,418
	S3	-27,733	-30,894	-34,424	-38,297
Disponibilidad relativa	S1	0.89	0.88	0.88	0.87
	S2	0.86	0.86	0.85	0.85
	S3	0.88	0.87	0.87	0.86
Disponibilidad per capita	Cuenca	2,508	2,243	2,059	1,946
Volumen ecológico	Cuenca	161,378	159,819	158,090	156,174
Volumen disponible	Cuenca	-308,289	-322,697	-338,686	-356,398

Tabla 5.3 Resultados de la simulación para un "escurrimiento promedio seco" anual

Es claramente observable que de acuerdo a las condiciones actuales, no se presentarán problemas de abasto de agua para las condiciones de escurrimiento promedio y escurrimiento promedio abundante en la cuenca. El único problema que emana de este análisis es la disponibilidad para la condición de escurrimiento promedio seco. Por tanto, se vuelve indispensable elaborar una análisis de escenarios en el que se contemplen cambios en algunas variables futuras que pudieran ocasionar una disminución de la demanda o de las pérdidas de conducción y por ende de la disponibilidad.

5.3 ANÁLISIS DE ESCENARIOS

5.3.1 Disminución de la precipitación

Según investigaciones recientes en otros países, la precipitación en el futuro tenderá a disminuir debido al cambio climático en el planeta. Creemos conveniente analizar un escenario donde se disminuya la precipitación en un 5 y 10% respectivamente para los tres condiciones de escurrimiento.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

* Unidades en miles de m³

Tipo de escurrimiento	Disminución de la lluvia (%)	Año Escenario			
		2001	2010	2020	2030
Promedio	5	225,068	210,621	194,568	176,821
	10	180,024	165,592	149,573	131,830
Promedio abundante	5	1,038,492	1,024,013	1,007,936	990,183
	10	1,331,578	1,317,067	1,301,044	1,283,325
Promedio seco	5	-464,333	-478,715	-494,671	-512,346
	10	-777,627	-791,990	-807,927	-825,577

Tabla 5.4 Disponibilidad en la cuenca con disminución de la precipitación

De la tabla 5.4 rescatamos el hecho de que los escenarios actuales y futuros para condiciones de lluvia promedio y promedio abundante no representan una amenaza de disponibilidad para la población. Por el contrario, aquí se reafirma el hecho de que la condición de escurrimiento promedio seco es un problema añejo en esta cuenca por los periodos de sequía que normalmente azotan la región.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

5.3.2 Escenarios para aumentar disponibilidad

A continuación realizaremos un análisis de escenarios por aproximaciones sucesivas para determinar las condiciones de la cuenca que permitan la satisfacción de la demanda en condiciones de escurrimiento promedio seco.

Dism. lluvia (%)	Año Escenario				Acciones
	2001	2010	2020	2030	
0	49,302	38,422	26,965	12,480	Aumentar eficiencia del Distrito de Riego Sistema Humaya = 0.72 Sistema Culiacán = 0.71 Dotación real A.P. Culiacán = 150 l/hab/día Pérdidas red= 20%
5	38,749	28,824	17,771	5,229	Aumentar eficiencia del Distrito de Riego Sistema Humaya = 0.79 Sistema Culiacán = 0.78 Dotación real A.P. Culiacán = 150 l/hab/día Pérdidas red= 20%
10	-21,452	-29,125	-37,702	-47,026	No existe escenario factible que permita satisfacer la demanda.

Tabla 5.5 Acciones para incrementar la disponibilidad con presencia de escurrimiento promedio seco

Del análisis de escenarios podemos concluir que la demanda en la cuenca es satisfecha para la condición de escurrimiento promedio, considerando las condiciones actuales de operación e incluyendo una disminución de la lluvia del 5 y 10% de la precipitación original.

El escenario que presenta problemas para satisfacer las demandas de extracción de agua en la cuenca del río Culiacán es la condición de escurrimiento promedio seco. Una forma de hacer frente a este problema actual (y también futuro) es modificando las condiciones de abastecimiento, principalmente las eficiencias de conducción del Distrito de Riego 010.

También se puede recuperar agua si se disminuye la dotación de agua para uso doméstico en la ciudad de Culiacán y sus correspondientes pérdidas en la red de abastecimiento. Aunque, los volúmenes que se pueden recuperar en la red de agua potable de Culiacán son muy pequeños, comparándolos con los que se recuperan de la red hidroagrícola del distrito de riego. Combinando estos factores se pueden proponer acciones para recuperar agua y satisfacer la demanda para un año seco. Como se observa en la tabla 5.5, si mejoramos las eficiencias del sistema de riego en combinación con una disminución de la dotación de agua potable urbano y de las pérdidas en la red, se logra equilibrar el consumo de agua en la cuenca y satisfacer la demanda, con un pequeño superávit para las condiciones actuales de lluvia y también para una disminución del 5% de la precipitación. De esta forma se garantiza el agua en un horizonte a 30 años para un año seco con variaciones de la lluvia de -5%. En cambio, no sucede lo mismo para una disminución de la lluvia del -10%; en este caso no existe un posible escenario que permita satisfacer la demanda, inclusive considerando eficiencias del distrito de 0.99, 10% de pérdidas en la red y dotaciones de 120 l/hab/día, situación totalmente utópica.

Por lo anterior podemos decir que no existen opciones viables que permitan satisfacer la demanda para un escenario remoto y poco probable, como lo es la disminución de la lluvia en un 10%. En este caso, la única alternativa actual es la importación de agua de otras cuencas aledañas o la implantación de nuevas tecnologías de riego que permitan efficientizar aún más los riegos y con ello disminuir las láminas netas de consumo.

CONCLUSIONES

Se rescatan elementos importantes en la conclusión de esta tesis. Si bien es cierto que la Comisión Nacional del Agua declara a la cuenca del río Culiacán como una cuenca en déficit para una condición de escurrimiento promedio, también es cierto que dicha apreciación se contrapone con los resultados obtenidos en este trabajo. ¿Cuál es la razón de esta diferencia? La CNA comete un error grave al hacer el cálculo de la disponibilidad. La metodología empleada fue elaborada considerando volúmenes de consumo y no volúmenes extraídos, éstos últimos incluyen pérdidas por conducción. Sin embargo, el cálculo de la disponibilidad se realiza considerando volúmenes extraídos, lo que ocasiona que se sobreestimen las demandas de agua en la cuenca. Además el volumen de extracción para uso público urbano e industrial son muy grandes y no corresponden a los reportados por el REPDA.

Según el modelo de simulación, la satisfacción de la demanda de agua en esta cuenca se cumple para condiciones de lluvia promedio y promedio abundante hasta el año 2030. La condición de escurrimiento promedio seco representa una amenaza bajo las condiciones actuales de operación de la cuenca. El déficit de agua que presenta este escenario puede ser sustituido mediante algunas acciones de mejora en la eficiencia global de conducción del Distrito de Riego 010, esto significa aumentar la eficiencia al 70% para garantizar el abastecimiento de agua en los cuatro escenarios prospectivos de planeación, además de otras medidas de menor inversión en el sistema de agua potable de la ciudad de Culiacán.

Una continuidad en la política actual del manejo del agua ocasionaría un mayor desabasto en el futuro, por ello, las acciones que se plantean para corregir el curso actual son indispensables para asegurar el abasto del líquido, en cantidad suficiente, a la población actual y futura bajo un escenario de escurrimiento seco.

Es de todos sabido que la presencia de sequías en la región ocasionan desabasto de agua, para el uso agrícola principalmente, situación que puede preverse con tan solo establecer medidas de eficientización de los sistemas de conducción del distrito de riego principalmente.

La única situación de déficit que no encuentra solución factible, en el ámbito de influencia de este estudio, es el escenario de escurrimiento promedio seco aunado a una disminución de la lluvia del 10%. Esta situación es, desde luego, poco probable de que se presente, más no imposible. Aún así, el periodo de retorno de este escenario sería demasiado grande, lo que no representa un peligro latente para la población.

Durante la realización de esta investigación, se pudo constatar que la información que la Comisión Nacional del Agua resguarda y proporciona al público para su utilización, es incompleta, dispersa, y en ocasiones se contrapone con otra información que emite la misma dependencia. La situación de la red hidroclimatológica de medición es deficiente, sólo el 30% de las estaciones climatológicas existentes en la cuenca se encuentran funcionando. Esto evidencia la falta de atención por parte de las autoridades para contar con datos hidrometeorológicos completos y confiables. Sin duda alguna, la falta de información impide en ocasiones obtener mejores resultados en este tipo de estudios.

Los datos recogidos de los balances hidráulicos en los vasos de almacenamiento no son acordes con la ecuación de continuidad. Las aportaciones a estos vasos se realizan mediante aportaciones deducidas, que muchas veces son negativas, lo que obviamente significa deficiencia en las mediciones. Además, los datos que proporcionan las estaciones de aforo en la entrada de los vasos difieren de las aportaciones que se reportan como entradas al vaso.

Otra conclusión a la que se puede llegar, y que fue planteada como una hipótesis al inicio del documento, es el hecho de que este estudio establece un proceso estructurado para poder evaluar la disponibilidad del agua superficial en otras cuencas del país. Tomando en consideración que el tipo de información que se obtuvo para modelar la cuenca del río Culiacán, se puede obtener de la misma forma en el resto del territorio nacional, la modelación de otra cuenca, con la metodología aquí planteada es posible. Sin duda habrá características especiales en otras cuencas que tendrán que considerarse, pero la estructura del modelo será en esencia la misma.

Si bien es cierto que en un principio se delimitó la problemática en estudio en cuanto a cantidad y no a calidad, también es importante mencionar que la reutilización de las aguas es una medida adecuada, en el manejo integral de una cuenca. En la cuenca del río Culiacán existe una planta de tratamiento de aguas negras, recientemente inaugurada y funcionando actualmente en fase de prueba. Una vez que esta planta funcione normalmente, aportará un volumen de agua cercano a los 48 millones de m³ anuales. Este volumen es considerable y sin duda de mucha utilidad en presencia de sequías. Una cultura de reuso del agua es siempre recomendable para contribuir a un ambiente de desarrollo sustentable en la cuenca.

En conclusión podemos decir que la situación en la cuenca para los escenarios más probables es una situación de equilibrio, donde la oferta de agua satisface la demanda.

ANEXO 1

Números de curva de escurrimiento según el uso de la tierra y el grupo hidrológico del suelo (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a=0.2S$).

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada ^a : sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobres, sin hierbas	45	66	77	83
cubierta buena ^b	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
condiciones aceptables : cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial ^c :				
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable ^d			
1/8 acre o menos	65	77	85	90
1/4 acre	38	61	75	83
1/3 acre	30	57	72	81
1/2 acre	25	54	70	80
1 acre	20	51	68	79
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. ^e	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentado con cunetas y alcantarillas	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
Tierra	72	82	87	89

Fuente: Hidrología aplicada, Ven Te Chow, David R. Maidment y Larry W. Mays, McGraw-Hill, 1ra. ed., 1994, pag. 154

^a Para una descripción más detallada de los números de curva para usos agrícolas de la tierra, remitirse a Soil Conservation Service, 1972, Cap 9

^b Una buena cubierta está protegida del pastizaje, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.

^c Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y de los accesos se dirige hacia la calle, con un mínimo de agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.

^d Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva.

^e En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de curva.

ANEXO 2

Comportamiento demográfico de los principales municipios y ciudades de la cuenca del río Culiacán.

Población por municipio

	AÑO								
	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	1995	2000
Culiacán	71,348	93,346	147,106	208,982	360,412	560,011	601,123	696,262	745,537
Tasa de crecimiento (%)		2.72	4.65	3.57	5.60	4.51	2.73	2.98	2.18
Badiraguato	22,258	26,505	27,615	28,138	29,252	39,170	37,988	40,298	37,757
Tasa de crecimiento (%)		1.76	0.41	0.19	0.39	2.96	-0.31	1.19	-0.06
Mocorito	29,330	36,797	44,606	55,256	49,025	59,687	51,674	52,026	50,082
Tasa de crecimiento (%)		2.29	1.94	2.16	-1.19	1.99	-1.43	0.14	-0.31
Navolato							131,973	132,365	145,622
Tasa de crecimiento (%)								0.06	0.99

Población por ciudad

	AÑO								
	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	1995	2000
Culiacán	18,202	22,025	48,936	85,024	167,956	304,826	415,046	505,518	540,823
Tasa de crecimiento (%)		1.92	8.31	5.68	7.04	6.14	3.13	4.02	2.68
Badiraguato	706	753	666	792	1,280	2,070	2,904	3,165	3,490
Tasa de crecimiento (%)		0.65	-1.22	1.75	4.92	4.92	3.44	1.74	1.86
Navolato	4,875	5,151	7,133	9,188	12,799	16,710	20,938	24,340	26,095
Tasa de crecimiento (%)		0.55	3.31	2.56	3.37	2.70	2.28	3.06	2.23
El Dorado	5,171	4,728	5,142	6,423	NO_D	9,990	11,991	13,343	13,575
Tasa de crecimiento (%)		-0.89	0.84	2.25	--	--	1.84	2.16	1.25
Costa Rica			6,613	NO_D	11,795	18,055	20,899	21,452	21,661
Tasa de crecimiento (%)						4.35	1.47	0.52	0.36

 Conteo

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

BIBLIOGRAFÍA

1. A completion report on systems simulation for management of a total water resources, Texas Water Development Board, 1969
2. Aplicación de un algoritmo de flujo en redes a la simulación de sistemas hidráulicos, Rueda Lujano Fernando, 1974, tesis de licenciatura.
3. Cobertura de servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento en el Estado de Sinaloa e indicadores de gestión operacional, comercial y financiera de las juntas municipales de agua potable y alcantarillado del Estado de Sinaloa, al cierre del ejercicio 2000, CNA, 2001
4. Compendio Básico del Agua en México, CNA, 1999
5. El ciclo hidrológico, Hebert del Valle Florencia, Universidad Autónoma de Chapingo, 1991
6. Estadísticas del Medio Ambiente, México 1997, SEMARNAP
7. Estimación de la disponibilidad hídrica en cuencas, Gerencia de Planeación Hidráulica, CNA, 1999
8. Fundamentos de Hidrología de Superficie, Francisco Javier Aparicio Mijares, Limusa, 1999
9. Hidrología aplicada, Ven Te Chow, David R. Maidment y Larry W. Mays, McGraw-Hill, 1ra. ed., 1994
10. Hidrología para ingenieros, Ray K. Linsley, Max A. Kohler y Joseph Paulhus, McGraw-Hill, 2da. ed., 1988
11. Hidrologic Modeling of Small Watersheds, C. T. Haan, H. P. Johnson y D. L. Brakensiek, American Society of Agricultural Engineers, 1982
12. Hydrologic Simulation of the Brandywine Basin, Huang, Shu-Li; Keenan, JD, Water Resources Bolletin vol. 23 no.3, 1987
13. Irrigation Principles and Practices, Vaughn E. Hansen, Orson W. Israelsen, Glen E. Stringham, Ed. Wiley, 4ta. Edición, 1979
14. Lineamientos Regionales (región III Pacífico Norte), Gerencia de planeación hidráulica, Comisión Nacional del Agua, 2000
15. Los consejos de cuenca en México –Definiciones y Alcances–, CNA
16. Modelo de simulación de una cuenca hidrológica (Memoria), Secretaria de Recursos Hidráulicos, 1974
17. Modelo de simulación hidrológica de la cuenca del río Lerma, Secretaria de Recursos Hidráulicos, Plan Nacional Hidráulico.
18. Modelos de apoyo a la planeación, Gerencia de planeación hidráulica, Comisión Nacional del Agua, 2000, CD.
19. Notas de clase, Jorge A. Hidalgo Toledo, DEPMI-UNAM, Campus Morelos, 2001-03-12
20. Planeación del aprovechamiento de los recursos hidráulicos de una cuenca: Simulador de sistemas hidráulicos, Gonzalez Villarreal Fernando y Domínguez M. Ramón, Simposium Internacional sobre la planificación de recursos hidráulicos.
21. Programa Hidráulico 1995-2000, Poder Ejecutivo Federal
22. River Basin Simulation Models: Guidelines for Their Use in Water Resorces Planning. Strzepek, KM; Marks, DH, Water Resources Bolletin vol. 17 no.1, 1981
23. Simulation and Decision making: The Platte River Basin in Nebraska, Gilliland, MW; Becker, L; Cady, R, Water Resources Bolletin vol. 21 no.2, 1985

24. The use of simulation models in the evaluation of alternative water allocation decisions in Central México, Fernando Javier González Villarreal
25. Un modelo digital de cuencas para la simulación de escurrimientos directos, Sancho y Cervera Jaime Ernesto, 1972, tesis de licenciatura.
26. Water distribution sytems: Simulation and sizing, Walski Thomas M. and Gesler Johannes, 1990
27. Watershed Hydrology, Peter E. Black, Prentice Hall, 1991