

# METODOLOGÍA APLICADA EN EL ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA PRODUCCIÓN DE CULTIVOS BIOENERGÉTICOS SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS: EL CASO DEL SISTEMA CHIRA

Cayo L. Ramos Taipe

## 4.1 INTRODUCCIÓN

El análisis de evaluación de la sostenibilidad del recurso hídrico ante el crecimiento de la actividad agrícola (demanda hídrica agrícola) en el Valle de Chira causada por la incorporación de cultivos bioenergéticos para producción de biocombustibles (etanol), se realizó por medio de la aplicación de sistema *Water Evaluation and Planning* (WEAP).

WEAP es una herramienta de computación para la planificación integrada de los recursos hídricos. WEAP provee un marco conceptual completo, flexible y amigable para analizar políticas y directrices en el manejo del agua. El modelo WEAP se basa en el principio de contabilidad del balance de agua, y es aplicable a sistemas de agua potable y a sistemas agrícolas, cuencas individuales o sistemas más complejos.

El análisis de escenarios es fundamental en WEAP. Los escenarios se usan para explorar la respuesta del modelo a una amplia gama de preguntas, como por ejemplo, qué sucede si a) los patrones económicos o demográficos cambian; b) los requerimientos del ecosistema son más estrictos; c) la combinación de cultivos cambia; d) la eficiencia en irrigación mejora; e) se usa mayor cantidad de agua subterránea; f) las reglas de operación de los embalses cambian; g) el cambio climático altera la demanda y las fuentes de agua; h) la contaminación afecta la calidad del agua y otros.

El modelamiento del sistema hidráulico Chira Piura, estará definido en el modelo con todas las fuentes de agua (ríos Chira y Piura), agua subterránea, todas las demandas de los usuarios y con todas las obras hidráulicas que comprende el sistema de manera que pueda reproducirse el comportamiento del sistema y la distribución de agua según las prioridades de la demanda y la preferencia de las ofertas.

El proceso de evaluación incluyó en una primera fase el levantamiento de información sobre la oferta y demanda de agua en el sistema hidráulico Chira Piura. Esta información es



utilizada para definir los balances de agua dentro del sistema y la asignación de agua entre los diferentes usuarios. Al establecer las prioridades de asignación pueden ser simulados diferentes regímenes de derechos de agua y los escenarios alternativos reflejan los cambios en la gestión del agua.

## 4.2 OFERTA HÍDRICA

La oferta hídrica del Sistema Chira Piura, está representada por los aportes de los ríos Chira y Piura, cuyos registros históricos datan del año 1925, en el caso del Piura y desde 1938 para el río Chira.

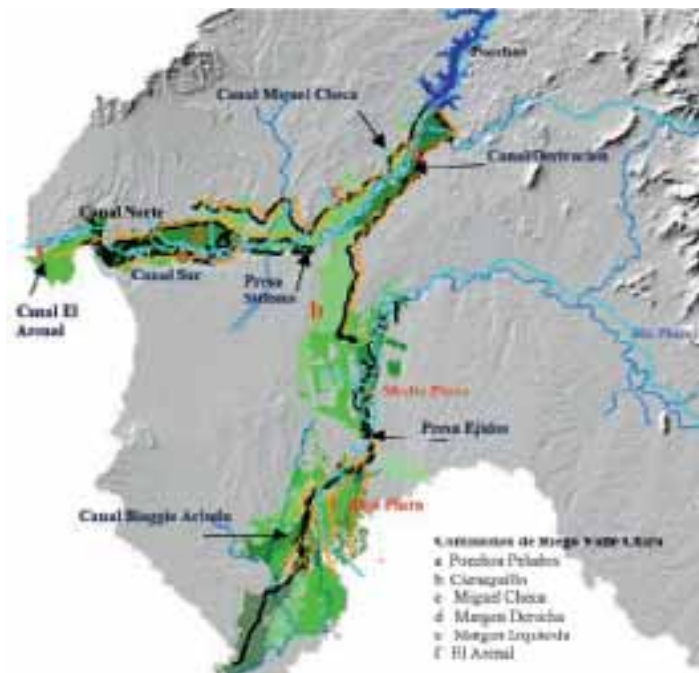
### 4.2.1 ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

La estación Ardilla (Figura 4.1), en el Río Chira, considerada como estación de ingreso al sistema está ubicada en el río Chira a unos 4,0 km aguas arriba del embalse Poechos; sus coordenadas son: 04° 31' 00" Latitud Sur, 80° 26' 00" Longitud Oeste a una altitud de 150,0 msnm.

La Estación Sánchez Cerro en el río Piura, cuenta con un registro histórico 1925/2009, sus coordenadas son: 05°11'55" Latitud Sur, 80°37'20" Longitud Oeste a una altitud de 23,3 msnm.

Figura 4.1

#### Infraestructura hidráulica del Sistema Chira-Piura y Comisiones de Riego



Fuente: elaboración propia

#### 4.2.2 SERIE DE TIEMPO DE LAS DESCARGAS

Para los requerimientos de estos análisis, se emplearon los datos históricos de los caudales del río Chira y del río Piura. Los hidrogramas de caudales medios mensuales de los recursos hídricos superficiales de la cuenca del río Chira, aguas arriba del embalse Poechos, registrados en la estación Ardilla, para el período enero 1938 a octubre 2008 y del río Piura en la Estación Puente Sánchez Cerro, aguas arriba del aporte del canal de derivación Daniel Escobar, identificado como recurso propio de la cuenca del río Piura, se observan en la Figura 4.2 y en los Cuadros 4.1 y 4.2, los descriptores estadísticos de las series de caudales medios mensuales del río Chira son continuos y mayores a los del río Piura; este presenta valores de caudal cero en muchas ocasiones, especialmente durante los meses de agosto a enero donde la frecuencia es mayor. Durante el período de registro se han detectado dos años con caudal cero en todo el año.

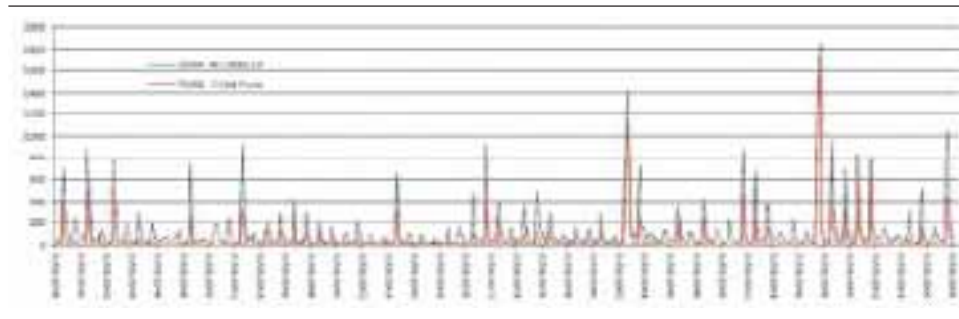
Cuadro 4.1

**Característica de la escorrentía anual de los ríos Chira y Piura**

Río	Estación	Período de registro	Area de la cuenca km <sup>2</sup>	Escorrentía media Anual Hm <sup>3</sup>	Cv de la escorrentía anual	Porcentaje de años cero %
Chira	Ardilla	1937-2008	19 095	3 450,80	0,88	0
Piura	Sánchez Cerro	1925-2008	12 216	1 147,38	1,76	2,4

Figura 4.2

**Hidrograma de caudales medios mensuales (Enero 1938 a Octubre 2008) del río Piura y del río Chira (Hm<sup>3</sup>)**



Fuente: elaboración propia

Cuadro 4.2

**Estadística de la escorrentía mensual para los ríos Chira y Piura**

Río	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<i>Promedio Hm<sup>3</sup>=160m<sup>3</sup></i>												
Chira	216,2	454,6	901,0	765,1	358,8	215,8	139,7	92,2	67,7	68,6	63,4	107,8
Piura	47,5	174,2	383,6	297,8	118,3	59,6	28,8	14,1	6,3	5,2	3,7	8,4
<i>Máximo Hm<sup>3</sup></i>												
Chira	2 249,3	3 076,4	4 498,0	4 826,3	2 485,8	1 562,4	450,5	324,6	193,8	292,5	165,2	863,9
Piura	1 893,0	2 965,6	4 443,7	3 129,1	2 299,6	1 352,2	318,2	105,1	41,5	32,8	24,5	288,3
<i>Mínimo Hm<sup>3</sup></i>												
Chira	28,9	28,0	71,8	97,4	30,9	24,8	37,9	17,1	14,5	14,3	11,3	11,1
Piura	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Desviación estandar Hm<sup>3</sup></i>												
Chira	339,9	538,1	846,1	835,7	374,2	211,0	86,3	57,9	37,8	42,2	36,6	115,1
Piura	225,5	388,3	618,5	527,6	270,7	151,0	44,1	19,3	8,7	7,9	5,8	33,6
<i>Coefficiente de variabilidad</i>												
Chira	1,6	1,2	0,9	1,1	1,0	1,0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1,1
Piura	4,7	2,2	1,6	1,8	2,3	2,5	1,5	1,4	1,4	1,5	1,5	4,0
<i>Porcentaje de caudales igual a cero</i>												
Chira	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Piura	38	11	4	4	4	6	7	15	29	39	40	43

Fuente: elaboración propia

Un análisis detallado de los registros del río Chira (Estación Ardilla) y del río Piura (Estaciones Sánchez Cerro), muestra un salto climatológico natural de los registros ocurridos en la serie, entre los años posteriores al 1976 y los años anteriores con una notoria variación, donde los valores de caudales son mayores en la segunda etapa, como se aprecia en la Figura 4.3, lo mismo puede ser explicado por la PDO, *Pacific Decadal Oscillation*.

La PDO puede ser descrita como un patrón de variabilidad climática del Pacífico parecida al fenómeno del Niño (ENSO) de larga duración, ya que ambas oscilaciones climáticas tienen influencia espacial similar pero diferente duración. Dos características diferencian la PDO del ENSO; primero los eventos del PDO del siglo XX tuvieron una persistencia de 20 a 30 años, mientras la duración típica del ENSO es de 6 a 18 meses. En segundo lugar, el dominio espacial de la PDO es más notorio en el Pacífico Norte y menos notorio en los trópicos; esto es lo contrario el ENSO.

Muchos estudios encontraron evidencias de dos ciclos completos del ciclo de la PDO para el siglo pasado: régimen "frío" de la PDO prevaleció entre 1890 - 1924 y 1947 - 1976, mientras que el régimen "caliente" de la PDO dominó entre 1925 - 1946 y 1977 - 1990, (Mantua *et al.*, 1997; Minobe 1997). Ver Figura 4.5.

Figura 4.3

**Índices de PDO y caudales medios mensuales estandarizados del Río Chira**



Fuente: elaboración propia

Este patrón de clima, en el hemisferio norte, afecta las temperaturas de las costas del mar y las temperaturas superficiales del continente, así como las escorrentías de los principales sistemas fluviales de la costa oeste, desde Alaska hasta California. (Nathan J. Mantua *et al.*, 1997)

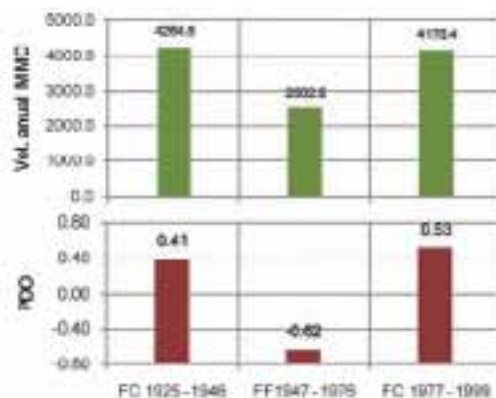
En el caso de las descargas del río Chira, se puede observar una señal clara de la correspondencia entre los cambios de grandes períodos de la magnitud en la descarga que se correlacionan bien con las fases de la PDO.

Durante la Fase Caliente (1925-1946) de la PDO, el caudal medio es de 4 264,8 Hm<sup>3</sup> (evaluados en la serie 1937-1946), valor superior a la media histórica (3 500 Hm<sup>3</sup>); igualmente, en la segunda Fase Caliente (1977- ~2000) se muestra un aumento, con una media de 4 176,5 Hm<sup>3</sup>. En cambio, para la Fase Fría (1947-1976) los caudales disminuyen sensiblemente a 2 502,5 Hm<sup>3</sup>, inferior al valor medio histórico. Figuras 4.3 y 4.4.

Esto acusa una buena correlación del patrón climático de la Oscilación Decadal del Pacífico sobre la escorrentía del río Chira y probablemente en otros ríos de la costa norte del Perú.

Figura 4.4

**Fase Caliente (FC) y Fase Fría (FF) del PDO y caudal promedio (Hm<sup>3</sup>) en cada fase del río Chira**



Fuente: elaboración propia

Según Minobe (1997) en el siglo XX se ha notado una fluctuación más enérgica de la PDO por lo que las periodicidades podrían variar entre uno de 15 a 25 años.

Se puede concluir que existen evidencias que muestran que las descargas del río Chira tienen una alternancia, conforme cambian las fases de la PDO y que en el futuro es probable que estos cambios sean más frecuentes. Sin embargo, la señal en los últimos años no es muy clara tiene alternancia de mayor frecuencia y, por lo tanto, se pueden considerar dos escenarios: uno optimista por el cual la fase caliente podría prolongarse un par de décadas más y otro pesimista por el cual la fase fría se presentaría muy pronto y las descargas del río Chira, se verían disminuidas considerablemente. En el presente trabajo se analizó el primer escenario.

### 4.3 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA

#### 4.3.1 DEMANDA HÍDRICA AGRÍCOLA

La demanda de agua agrícola se ha determinado con el cálculo de las necesidades fisiológicas de los cultivos predominantes en los valles de Chira (Figura 4.5) y Medio y Bajo Piura (Figura 4.6), según la Ecuación de FAO Penman-Monteith y los coeficientes de cultivo, descritos en el manual 56 de la FAO (Richard G. Allen, 2006).

Las áreas bajo riego actuales, según cifras oficiales de PROFODUA (Programa de Formalización de Derechos de Uso de Agua, Dic. 2009), organizados en Comisión de Regantes del Valle Chira (Cuadro 4.3) y las del valle del Medio y Bajo Piura (Cuadro 5) ascienden a 41 133,3 ha y 43 182,3 ha, respectivamente.

Las áreas nuevas (Figura 4.5) que se incorporaran a la agricultura para la producción de caña de azúcar con fines de producción de biodiesel, ascienden a 23 976 ha; de ellas 6 000 ha pertenecen a COMISA, 10 675 ha a MAPLE, 3 090 ha a CAÑA BRAVA en la primera etapa y 4 211 ha en una segunda etapa<sup>7</sup>.

Las áreas nuevas serían desarrolladas con el abastecimiento conjunto de las aguas superficiales sobrantes del sistema y la explotación de las aguas subterráneas del acuífero del valle de Chira.

<sup>7</sup> COMISA y MAPLE son compañías privadas con inversiones propuestas en producción de etanol en el país.

Cuadro 4.3

**Áreas bajo riego Valle de Chira**

Comision de regantes	N° Predios	Extension (ha)	Area potencial de Cultivo (ha)	Area Bajo Riego permanente (ha)
Poechos pelados	4 821	4 930,85	4 411,72	4 831,00
Cieneguillo	1 642	7 711,18	6 649,28	3 364,35
Miguel Checa	13 870	10 736,47	10 119,51	12 150,67
Margen derecha	6 977	11 524,13	10 828,77	1 544,87
Margen izquierda	3 548	4 289,50	4 164,19	11 878,70
El arenal	4 375	4 076,85	3 781,61	4 158,25
Daniel Escobar		3 979,28	3 979,28	3 205,50
<b>Total</b>	<b>35233</b>	<b>47248,26</b>	<b>43934,35</b>	<b>41133,34</b>

Fuente: Elaboración propia. Información profodua Chira Piura

Figura 4.5

**Imagen de Satélite de los valles Chira, Medio y Bajo Piura y Cuenca Chira Piura**

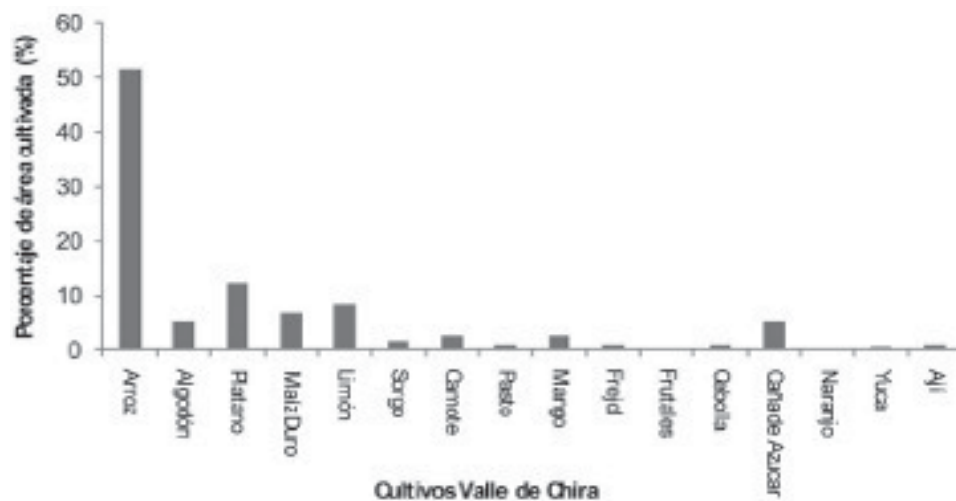


Fuente: elaboración propia

Los cultivos que predominan en las cédulas de cultivo son: arroz (50 por ciento), plátano (11 por ciento) y limón (10 por ciento) en el valle de Chira y el algodón (40 por ciento), arroz (28 por ciento) y maíz (17 por ciento) en el valle de Piura. Ver Figuras 4.6 y 4.7.

Figura 4.6

#### Cédula de cultivo del Valle Chira



Fuente: elaboración propia

Las áreas de cultivo pueden ser ampliadas hasta 43 934 ha en Chira y 49 305 ha en Piura, aunque existen tierras eriazas que pueden ser incorporadas a la agricultura con permiso del Ministerio de Agricultura.

El número de predios asciende a 35 233 unidades en Chira y a 77 638 unidades en Piura; son valles de marcado minifundio ya que la propiedad media es de 1,34 ha/predio en el Valle de Chira y 0,66 ha/predio en el valle de Piura (Cuadro 4.4).



Cuadro 4.4

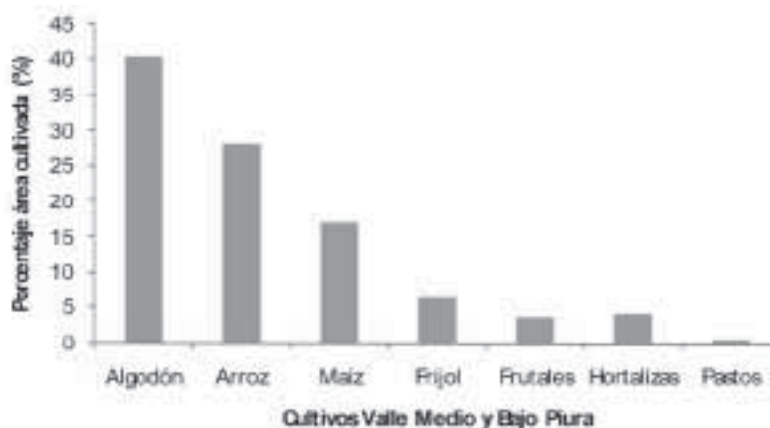
**Áreas bajo riego Valle Medio y Bajo Piura y Sechura**

Comision de Regantes	Nº Predios	Nº Usuarios	Extensión (ha)	Área potencial de cultivo (ha)	Área bajo riego permanente (ha)
Medio Piura margen derecha	2 083	1 146	8 624,30	7 741,68	2 400,93
Medio Piura margen izquierda	1 799	715	7 829,92	7 224,72	1 309,25
Castilla - Tacala	434	253	1 790,41	1 565,74	594,85
La bruja	7 651	2 094	3 787,85	3 714,62	2 865,49
Puyuntala	9 584	3 060	3 668,90	3 648,67	3 897,22
Palo Parado	2 549	577	1 299,73	1 294,41	1 171,80
Cumbibira	4 321	963	2 183,47	2 168,10	2 287,48
Shaz	5 115	1 266	1 488,12	1 484,18	1 626,49
Casarana	7 558	2 435	2 377,67	2 364,42	5 561,30
Sinchao parte alta	2 361	970	860.3584	855,8077	2053,61
Chato	3 735	1 573	2 785,90	2 629,54	2 180,75
Seminario	4 087	1 616	2 582,44	2 546,64	2 480,35
Parte alta Sechura	6 987	3 069	1 833,68	1 818,69	3 004,15
San Andres	6 994	2 935	3 578,66	3 541,76	3 966,22
Muñuela margen izquierda	6 081	2 309	3 240,79	3 205,69	3 834,93
Muñuela margen derecha	6 299	2 502	3 540,10	3 500,68	3 947,50
<b>Áreas en condición de permiso</b>	<b>735</b>	<b>484</b>	<b>3 818,57</b>	<b>2 672,32</b>	<b>2 672,32</b>
<b>Total</b>	<b>77 638</b>	<b>27 483</b>	<b>51 472,31</b>	<b>49 305,34</b>	<b>43 182,32</b>

Fuente: Administración Técnico de Riego del Medio y Bajo Piura, PROFODUA – PIURA, DIC. 2008

Figura 4.7

**Cédula de cultivo del Valle Medio y Bajo Piura**



Fuente: elaboración propia

Durante los últimos 26 años, los cultivos sembrados en el valle de Chira han ido cambiando constantemente; sin embargo, se puede distinguir un crecimiento de las preferencias en los cultivos de plátano, limón sutil, arroz, mango y recientemente caña de azúcar con propósitos de obtener biocombustibles. Ver Figuras 4.8, 4.9 y 4.10.

Figura 4.8

**Evolución de los cultivos de limón, mango y plátano en el valle de Chira (hectáreas cultivadas)**

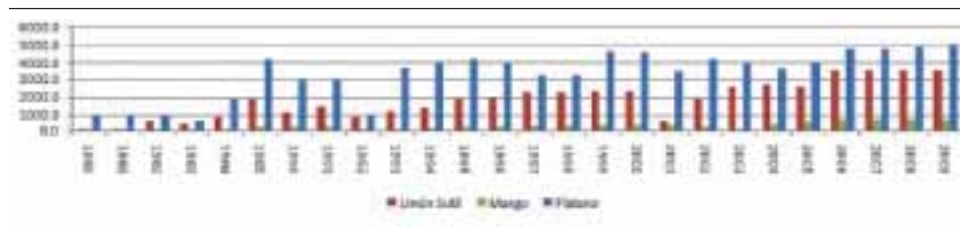


Figura 4.9

**Evolución de los cultivos sorgo y caña de azúcar en el valle de Chira (hectáreas cultivadas)**

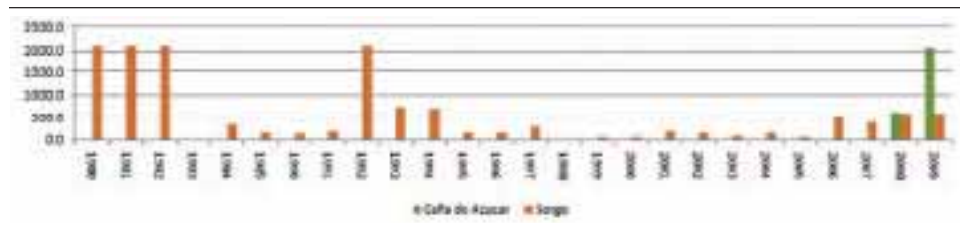
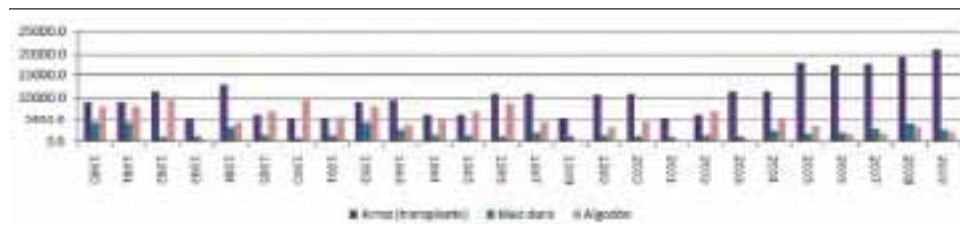


Figura 4.10

**Evolución de los cultivos de arroz, maíz duro y algodón en el valle de Chira (hectáreas cultivadas)**



Por el contrario, los cultivos que están experimentando cada vez menor preferencia son el sorgo, el algodón y el maíz.

*Requerimientos climáticos para la evapotranspiración*

La evapotranspiración es la cantidad de agua transpirada por el cultivo y evaporada desde la superficie del suelo, agua que retorna a la atmósfera, durante el período vegetativo del cultivo, bajo condiciones climáticas específicas. Es, por lo tanto, una guía para orientar la cantidad de agua a agregar en el suelo para el desarrollo de los cultivos. La información climática corresponde a la estación de Chilaco para el Río Chira (Cuadro 4.5) y la estación Miraflores (Cuadro 4.6) para el río Piura.

Una mención especial merecen los requerimientos térmicos de los cultivos ya que están más asociados a las temperaturas medias diurnas; la amplitud del régimen térmico

( $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ ) indica la fluctuación de la energía disponible en el medio para la traslocación de fotosintatos a los órganos de acumulación y de reserva de la planta.

Cuadro 4.5

**Evapotranspiración en la Estación Chilaco**  
**Altitud: 90 msnm Latitud: -4.7 grados. (Sur) Longitud: -80.51 grados. (Oeste)**

Mes	T max (°C)	T min (°C)	Humedad (%)	Vel . Viento (Km/ d)	Brillo solar (Horas)	Rad. Solar (MJ/m2/d)	ETo (mm/d)	ETo (mm/mes)
Enero	30,6	16,1	67	371,5	6,6	19,7	6	186
Febrero	31,4	16,5	69	371,5	6,3	19,6	6,04	187,24
Marzo	31,1	16,3	73	345,6	6,8	20,2	5,7	159,6
Abril	30,3	15,9	73	328,3	7	19,5	5,33	165,23
Mayo	27,6	14,5	74	319,7	6,8	17,8	4,53	135,9
Junio	26,3	13,8	75	328,3	6,3	16,3	4,12	127,72
Julio	25,1	13,2	74	328,3	6,4	16,7	4,05	121,5
Agosto	25	13,1	72	354,2	7,3	19,3	4,52	140,12
Septiembre	25,3	13,3	71	380,2	7,5	20,8	4,91	152,21
Octubre	25,9	13,8	71	380,2	7,5	21,3	5,09	152,7
Noviembre	26,9	14,1	70	388,8	7,4	20,9	5,32	164,92
Diciembre	28,7	15,1	68	397,4	7,4	20,7	5,78	173,4
Promedio	30,7	19,3	67,7	223,2	6,8	19	4,95	1 866,54

Cuadro 4.6

**Evapotranspiración en la Estación Miraflores**  
**Altitud: 30 msnm Latitud:-5.17 grados. (Sur) Longitud:-80.61grados. (Oeste)**

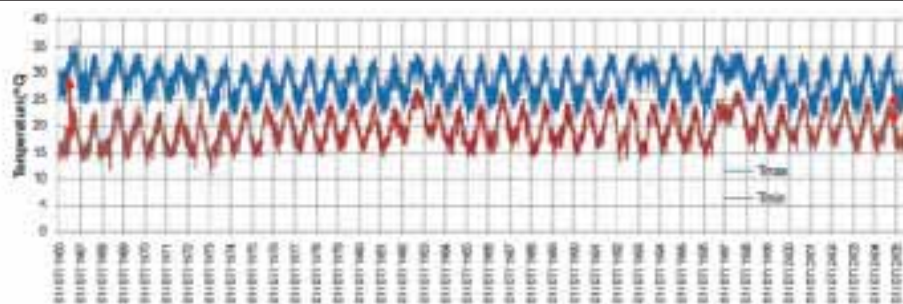
Mes	T max (°C)	T min (°C)	Humedad (%)	Vel . Viento (Km/ d)	Brillo solar (Horas)	Rad. Solar (MJ/m2/d)	ETo (mm/d)	ETo (mm/mes)
Enero	33,3	21,8	61,8	216	6,7	18,3	5,34	165,54
Febrero	34	22,9	63,5	181,4	6,1	19,3	5,41	167,71
Marzo	34	22,6	64,8	164,2	6,6	19,9	5,31	148,68
Abril	32,5	21,3	66,2	198,7	7	19,5	5,17	160,27
Mayo	30,5	19,2	68,8	216	7	18	4,62	138,6
Junio	28,5	17,8	71,6	216	6,3	16,2	4,01	124,31
Julio	27,5	16,9	71,9	207,4	6,2	16,4	3,89	116,7
Agosto	27,8	16,9	71,4	241,9	6,6	18,2	4,38	135,78
Septiembre	28,7	16,9	69,5	285,1	7,3	20,5	5,13	159,03
Octubre	29,5	17,5	68,9	267,8	7,2	20,8	5,29	158,7
Noviembre	30,3	18,1	67,6	241,9	7,2	20,7	5,31	164,61
Diciembre	31,9	20	65,8	241,9	7,1	20,3	5,55	166,5
Promedio	30,7	9,3	67,7	223,2	6,8	19	4,95	1 806,43

La estación meteorológica La Esperanza, ubicada en el valle de Piura, cuenta con una serie larga de temperatura. Como se puede apreciar en la Figura 4.11, los valores de  $T_{\max}$  y  $T_{\min}$  tienen pendientes opuestas, lo que indica que ambos valores tienden a juntarse con el paso de los años, lo cual no es conveniente para la agricultura, porque influye directamente

en el requerimiento hídrico y la calidad de los productos; esto puede influir en el cambio de los requerimientos hídricos de los cultivos, incluida la caña de azúcar.

Figura 4.11

**Variación de la temperatura máxima y mínima, estación La Esperanza**  
**Latitud: 04°55'04" Longitud: 81°03'38" Altitud: 12 msnm.**



Bajo las características antes descritas de los valles de Chira y Piura, la magnitud de las demandas en cada valle son 853,9 Hm<sup>3</sup> y 808,5 Hm<sup>3</sup>, con la variabilidad que se muestra en la Cuadro 4.7.

Cuadro 4.7

**Demanda hídrica agrícola (Hm<sup>3</sup>)**

Valle	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Total
Chira	75,2	80,7	86,9	80,4	83,8	83,1	75,0	81,4	68,3	59,0	18,2	61,9	853,9
M y B Piura	98,2	101,2	91,4	56,9	49,7	49,1	67,6	88,0	80,6	62,1	14,1	49,4	808,5
<b>Total</b>	<b>173,4</b>	<b>181,9</b>	<b>178,3</b>	<b>137,2</b>	<b>133,5</b>	<b>132,2</b>	<b>142,6</b>	<b>169,5</b>	<b>148,9</b>	<b>121,1</b>	<b>32,3</b>	<b>111,3</b>	<b>1 662,3</b>

En condiciones de crecimiento de la ocupación de las áreas potenciales y de las áreas nuevas con cultivos bioenergéticos (Escenario 4), la demanda se incrementa a los siguientes valores: 984,4 Hm<sup>3</sup> en Chira, 947,62 Hm<sup>3</sup> en Piura y 424,64 Hm<sup>3</sup> en las áreas nuevas de caña, como se muestra en la Cuadro 4.8.

Cuadro 4.8

**Demanda hídrica agrícola (Hm<sup>3</sup>)**

Valle	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Total
Valle de Chira	89,81	96,7	101,92	89,83	92,27	91,38	84,09	93,12	80,50	69,69	26,25	69,06	984,40
Valle de Piura	113,76	117,37	106,43	68,29	59,12	58,79	81,22	104,00	92,11	70,84	18,42	57,27	947,62
Áreas con caña	36,42	34,52	34,90	32,33	25,53	43,42	37,60	39,71	35,08	32,57	33,33	39,22	424,64
<b>Total</b>	<b>239,99</b>	<b>248,35</b>	<b>243,26</b>	<b>190,46</b>	<b>176,91</b>	<b>93,59</b>	<b>202,91</b>	<b>236,83</b>	<b>207,69</b>	<b>173,10</b>	<b>78,01</b>	<b>165,56</b>	<b>2 356,66</b>

### 4.3.2 DEMANDA HÍDRICA POBLACIONAL

La demanda hídrica poblacional se consideró cambiante en el tiempo a una tasa de cambio igual a la tasa de crecimiento poblacional informada por el INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática); esto ayuda a mantener el criterio de sostenibilidad del crecimiento de la demanda de agua por considerar una simulación dinámica (Cuadro 4.9).

Cuadro 4.9

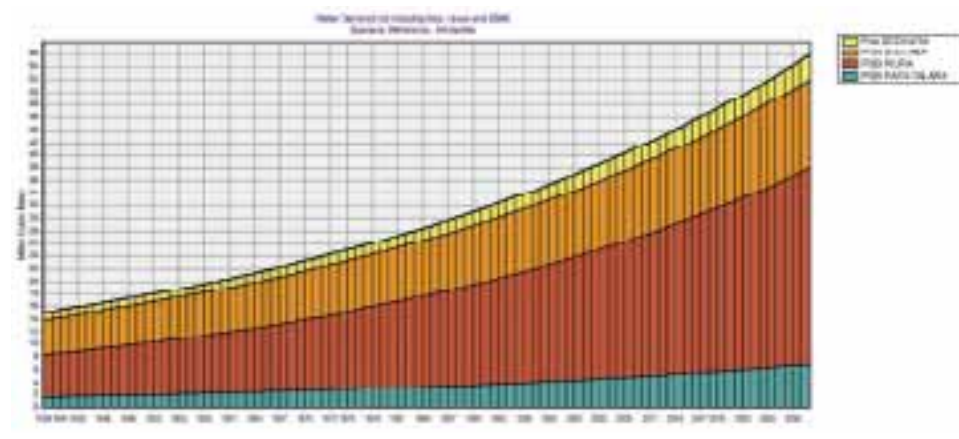
#### Requerimiento de agua poblacional

Población	Unidad	Censo 2007	Tasa crecimiento	Pob. Estimada 2030	Consumo l/día/hab
Sullana	Hab	251608	1.0%	316312	120
Piura	Hab	569540	1.7%	839278	120
Paíta Talara	Hab	108535	1.6%	156359	120
Sechura	Hab	62319	1.5%	87768	120
<b>Total</b>		<b>992002</b>		<b>1399719</b>	

Las demandas ascienden a 14,94 Hm<sup>3</sup> al inicio de la simulación (1939); en el año de 2007 este valor pasa a 39,66 Hm<sup>3</sup> y a finales del período (2030) la demanda asciende a 55,71 Hm<sup>3</sup>. Ver Figura 4.12.

Figura 4.12

#### Variación de la demanda hídrica de la población



### 4.3.3 DEMANDA HÍDRICA AMBIENTAL

El requerimiento ecológico del sistema es complejo y requiere extensos monitoreos e investigaciones. McMahon (1993) revisó las diferentes metodologías existentes que varían de empíricas a complejos modelos hidrogeocológicos como el Modelo de Simulación de Hábitats Físicos (PHABSIM).

En los ríos del Perú, la metodología más usada es el caudal mínimo necesario (*Qecol*), conocido también como el método de bloques, que determina los requerimientos de caudal en el río para sostener el medio ambiente y el ecosistema existente. El *Qecol* se determina por lo general en un taller multidisciplinario y teniendo como valores deseados de caudal mínimo de flujo mensual; los valores así determinados son oficializados por las instituciones locales o nacionales.

Para el Río Chira, el caudal ecológico es 5 m<sup>3</sup>/s para todos los meses, entendiendo que la restricción será más viable durante los meses de estiaje, ya que durante los meses de avenida siempre será superado este valor; por ello sería conveniente determinar el requerimiento de caudal variable en el tiempo. Para el caso del río Piura el caudal ecológico es igual a 2 m<sup>3</sup>/s; el mismo proviene generalmente del mismo río, pero en algunas ocasiones hay transvase del río Chira. (Cuadro 4.10).

Cuadro 4.10

**Demanda Ecológica Hm<sup>3</sup>**

Ríos	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Total
Chira	12,96	13,39	13,39	13,39	13,39	12,96	13,39	13,39	12,10	13,39	12,96	13,39	<b>158,11</b>
Piura	5,18	5,36	5,36	5,36	5,36	5,18	5,36	5,36	4,84	5,36	5,18	5,36	<b>63,24</b>

Fuente: Resoluciones Administrativas aprobando Caudal Ecológico Río Chira – Río Piura

**4.3.3 DEMANDA HÍDRICA ENERGÉTICA E INDUSTRIAL**

La producción industrial está compuesta por centros de transformación de productos agrícolas, centro de embalaje y producción de diversas clases de bebidas (Cuadro 4.11).

Cuadro 4.11

**Demanda Industrial Hm<sup>3</sup>**

Usos	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Total
Industrial	0.104	0.094	0.104	0.101	0.104	0.101	0.104	0.104	0.101	0.104	0.101	0.104	<b>1.226</b>
Piscícola (agua y eco acuicola)	16,32	16,87	16,32	16,87	16,87	15,24	16,87	16,32	16,87	16,32	16,87	16,87	<b>198,61</b>

Fuente: Balance Hídrico 2004 – 2005, Profodua 2008.

**4.3.4 PÉRDIDAS EN LOS CANALES**

Las pérdidas están principalmente referidas a las originadas en los canales de conducción: Canal Miguel Checa, Canal de Derivación, Canal Norte y Sur y los canales del Medio y Bajo Piura.

Las pérdidas estimadas en el Sistema en el valle de Chira y Medio y Bajo Piura, tomando como base el Estudio “Determinación del Porcentaje de Pérdidas en el Sistema Secundario Chira Piura (años 2006 al 2008)”, del Proyecto Especial Chira Piura, Dirección

de Operaciones y Mantenimiento (Tadeo Ramos, 2009) y el Reporte de las Características Hidráulicas del Canal Miguel Checa del PECHP son:

*Valle de Piura:* JU Sechura 31,6 por ciento, JU Medio y Bajo Piura 31,48 por ciento (canal Biaggio Arbulu).

*Valle de Chira:* CR Poechos Pelados 38,24 por ciento, CR Daniel Escobar 13,7 por ciento, CR Cieneguillo 40,87 por ciento, CR Miguel Checa 45,78 por ciento, CR Margen Derecha 37,36 por ciento, CR Margen Izquierda 45,29 por ciento y CR El Arenal 33,02 por ciento.

En el modelamiento del Sistema, las pérdidas en los canales y las parcelas son consideradas como volúmenes de agua que pueden ser recuperables y potencialmente utilizables en el riego de tierras del sistema. Las aguas de pérdida, excepto la evaporación, tienen dos opciones posibles: discurrir al cauce del río aguas abajo del punto aprovechado y/o contribuir al volumen del acuífero. En el modelo propuesto, ambas pueden ser representadas porque las aguas de retorno son captadas en las bocatomas del Canal Norte o por las tomas de los áreas nuevas de cultivos para biocombustible aguas abajo de la presa Sullana. Las aguas infiltradas al acuífero también pueden ser utilizadas con el bombeo de éstas hacia las tierras con cultivos bioenergéticos.

#### 4.4 ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD Y RIESGO DEL SISTEMA

##### 4.4.1 FALLA

La siguiente descripción de confiabilidad se basa en el supuesto de que el régimen previsto en un tiempo  $t$  dado, puede ser en un estado satisfactorio (es decir, no falla)  $NF$  o insatisfactorio (es decir, fracaso) estado  $F$ . Este estudio se basa en los sistemas de abastecimiento de agua, y, por lo tanto, el estado  $NF$  se produce cuando el suministro de agua es capaz de satisfacer la demanda de agua y el estado  $F$  cuando la oferta no satisface la demanda (déficit). En el paso del tiempo  $t$  al tiempo  $t + 1$ , el sistema puede permanecer en el mismo estado o cambiar a otro estado. La duración del estado  $j$ -ésimo período de falla se denota  $d(j)$  y el volumen de déficit correspondiente se denota  $v(j)$ ,  $j = 1, \dots, M$ , donde  $M$  es el número total de sucesos de fallas. Las definiciones de  $d(j)$  y  $V(j)$  se ilustran para un solo evento de falla en la Figura 4.13. El volumen de déficit del evento de falla se calcula como la diferencia acumulada entre la demanda y la disponibilidad:

$$v(j) = \sum_{t=1}^{d(j)} [D(t) - Y(t)]$$

donde  $d(j)$  es la duración de la falla,  $D(t)$  y  $Y(t)$  son la demanda de agua y la oferta actual respectivamente.

#### 4.4.2 CONFIABILIDAD

El criterio de desempeño de los sistemas de recursos hídricos más antiguo y más ampliamente usado, es la confiabilidad, definido por Hashimoto *et al.* (1982) como:

$$Rel = P\{S \in NF\}$$

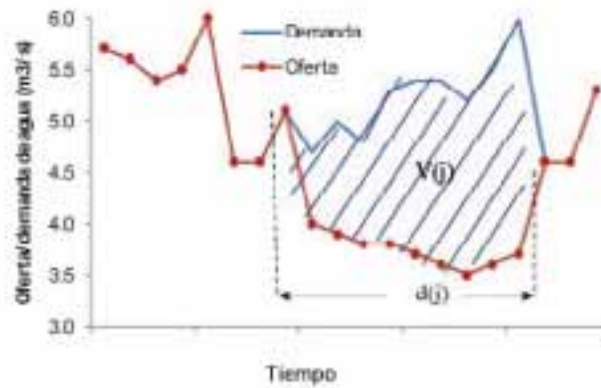
donde  $S$  es la variable de estado del sistema. El concepto más ampliamente aceptado y aplicado de ocurrencia de confiabilidad puede ser estimado como:

$$Rel = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M d(j)}{T}$$

donde  $d(j)$  es la duración de la  $j$ -ésima falla,  $M$  es el número de fallas y  $T$  es el número total de intervalos de tiempo.

Figura 4.13

**Características de la duración y el volumen de un evento de falla**



#### 4.4.3 RESILIENCIA

La resiliencia es la medida de la rapidez del sistema en regresar a un estado satisfactorio desde un estado de falla. Hashimoto *et al.* (1982) definen resiliencia como una probabilidad condicional:

$$Res = P\{S(t+1) \in NF / S(t) \in F\}$$

donde  $S(t)$  es la variable de estado del sistema. Esta definición de resiliencia es igual a la inversa del promedio de la duración de las fallas, es decir:

$$Res_1 = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j) \right\}^{-1}$$

donde  $d(j)$  es la duración de la falla (déficit) y  $M$  es el número total de fallas. Moy *et al.* (1986) definieron resiliencia como la duración máxima consecutiva de falla en la cual se



queda el sistema. La resiliencia se expresa como la inversa de la duración máxima:

$$Res_2 = \left\{ \max_j \{d(j)\} \right\}^{-1}$$

Algunos autores argumentan que la definición basada en los valores máximos son mejores que los basados en valores medios.

#### 4.4.4 VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad es una medida del daño probable de la falla y fue definida por Hashimoto *et al.* (1982) como:

$$Vul = \sum_{j \in F} e(j)h(j)$$

donde  $h(j)$  es el resultado más severo del estado de falla en el tiempo  $j$  y  $e(j)$  es la probabilidad de  $h(j)$  de ser el resultado más severo en el estado insatisfactorio.

Hashimoto *et al.* (1982) y Jinno *et al.* (1995) basaron su vulnerabilidad en el déficit total de agua experimentado durante toda la duración en  $F$ , es decir, déficit de volumen. Esta definición es muy adecuada para sistemas con embalses y puede ser estimada como el valor medio de los déficits:

$$Vul_1 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M v(j)$$

En resumen en la literatura están disponible dos conjuntos diferentes de estimadores de resiliencia y vulnerabilidad. Un conjunto de estimadores se centra en la media de las características del defecto observado, mientras que el otro se centra en las propiedades de los valores máximos observados de las propiedades del fracaso.

### 4.5 MODELAMIENTO HIDROLÓGICO

#### 4.5.1 GENERALIDADES

El proceso de modelamiento hidrológico del Sistema Chira Piura, fue realizado con la ayuda de un programa de cómputo WEAP21.

#### 4.5.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Es una herramienta de computación para la planificación integrada de los recursos hídricos. WEAP provee un marco conceptual completo, flexible y amigable para analizar políticas y directrices en el manejo del agua.

Actualmente muchas regiones enfrentan grandes retos en el manejo de recursos hídricos, incluyendo la asignación de los limitados recursos de agua, el mantenimiento de la calidad del agua y la definición de políticas de manejo del recurso. Para enfrentar estos retos, los modelos convencionales orientados al suministro de agua no siempre son adecuados.

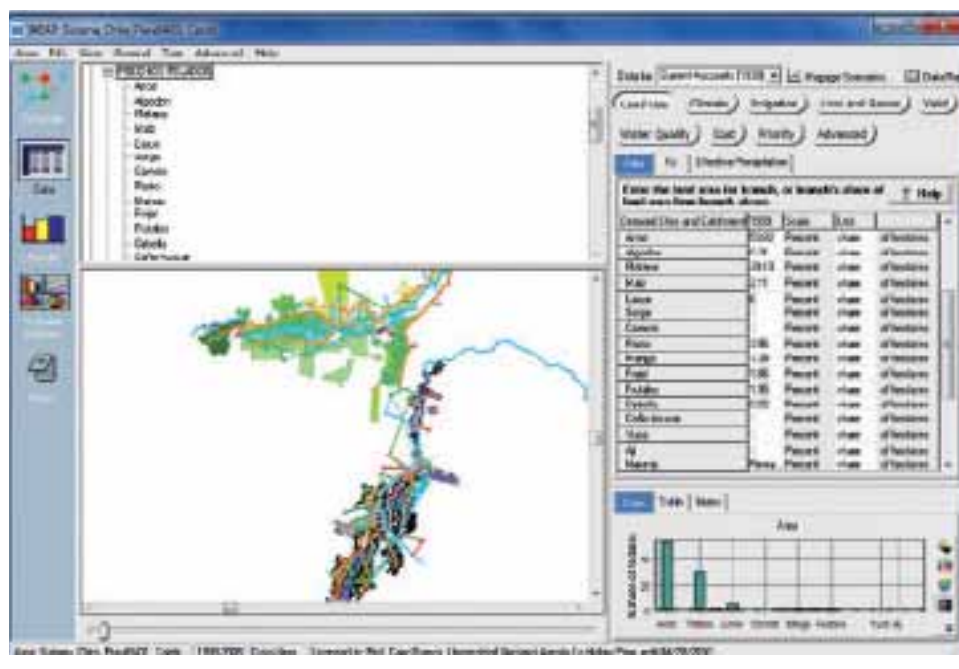
El modelo WEAP se basa en el principio de contabilidad del balance de agua y es aplicable a sistemas de agua potable y sistemas agrícolas, cuencas individuales, o sistemas más complejos.

El análisis de escenarios es fundamental en WEAP. Los escenarios se usan para explorar la respuesta del modelo a una amplia gama de preguntas, como por ejemplo, qué sucede si: a) los patrones económicos o demográficos cambian; b) los requerimientos del ecosistema son más estrictos; c) la combinación de cultivos cambia; d) la eficiencia de la irrigación mejora; e) se usa mayor cantidad de agua subterránea; f) las reglas de operación de los embalses cambian; g) el cambio climático altera la demanda y las fuentes de agua; h) la contaminación afecta la calidad del agua y otros.

### 4.5.3 FORMULACIÓN DEL MODELO

El Modelamiento del Sistema hidráulico Chira Piura, estará definido en el modelo con todas las fuentes de agua (río Chira y Piura), agua subterránea, todas las demandas de los usuarios y con todas las obras hidráulicas que comprende el sistema de manera que pueda reproducirse el comportamiento del Sistema y la distribución de agua según las prioridades de la demanda y la preferencia de las ofertas (Figura 4.14).

Figura 4.14  
Modelo Hidrológico del Sistema Hidráulico Chira Piura en WEAP

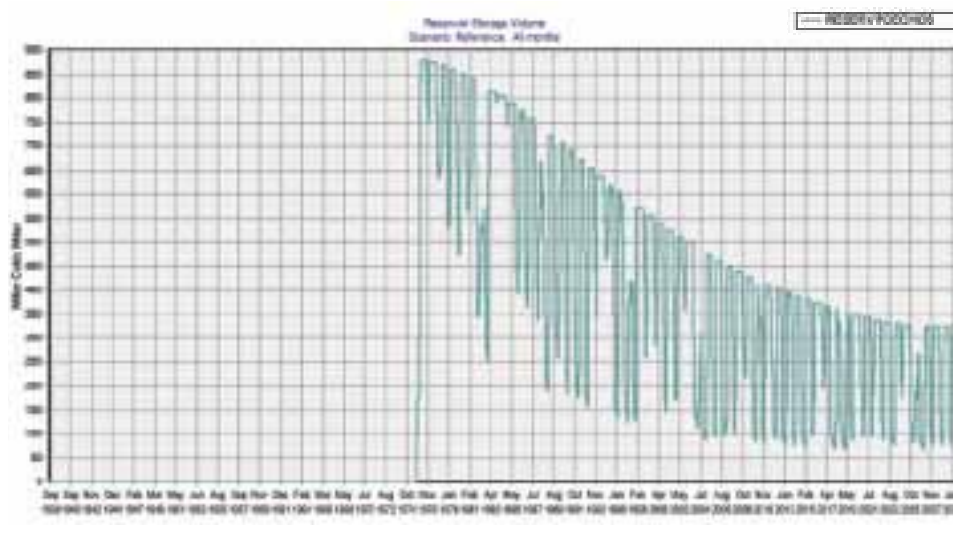


Una obra restrictiva del sistema es el Embalse de Poechos ya que dependerá del almacenamiento de este embalse la posibilidad de abastecer con agua a mayor o menor área de cultivo. Esta obra ha venido perdiendo volumen útil de almacenamiento por el

progresivo proceso de colmatación que viene sufriendo, debido básicamente a la carga de sedimento de la escorrentía en la cuenca (Figura 4.15).

Figura 4.15

**Variación del volumen del Embalse Poechos**



De acuerdo al comportamiento histórico de la colmatación y manteniendo esta tendencia se espera que a finales del 2030 el volumen útil del embalse alcance un volumen de 360 Hm<sup>3</sup> en la cota 103 y 400 Hm<sup>3</sup> en la cota 104,1, siempre que no hayan eventos severos como El Niño 1982 y 1998; en tal caso el valor del volumen útil sería aun menor.

Las características del embalse determinadas por las batimetrías efectuadas por el Proyecto Especial Chira Piura se muestran en la Cuadro 4.12.

Cuadro 4.12

**Característica Geométrica del Embalse Poechos**

Nivel Característico	Cota (msnm)	1976	1999	2005	2008(&)
		Volumen (MMC)	Volumen (MMC)	Volumen (MMC)	Volumen (MMC)
	60,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	73,5	40,0	13,9	11,9	10,4
	76,0	70,0	19,8	16,7	14,5
	76,5	80,0	28,9	23,5	20,1
Vol Muerto	81,0	130,0	39,5	33,4	29,1
Cota del Canal	84,0	180,0	55,0	46,4	40,3
Derivacion	86,0	220,0	75,4	63,6	55,2
Daniel Escobar	88,5	270,0	102,9	87,1	75,8
Cota min.	91,0	360,0	138,7	117,8	102,9
Operacion	93,5	410,0	186,1	158,6	139,0
	95,0	485,0	247,0	208,9	181,7
	98,5	610,0	326,4	276,5	265
	101,0	760,0	427,2	363,1	342,7
*	103,0	880,0	556,9	474,7	441,0
	104,0	890,0	604,0	540,4	491,0
**	105,0	900,0	653,7	556,2	510,9
Cota limite***	106,2	1000,0	701,5	598,1	549,2

\* Nivel de operación ordinaria.

El nivel de Operación actual es el 104 msnm, aprobado por el Comité.

\*\* Nivel de vertedero, nunca a llegado y no debe llegar por razones de sequiridad.

\*\*\* Nivel de eventos máximos extraordinarios hasta la fecha el agua nunca llegó a este nivel.

(&) Campaña de medición de perfiles y sedimentos acumulados, se determinó el volumen a la cota 103 y el resto de valores fue estimado.

**4.5.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO**

El modelo fue calibrado con las descargas registradas en el Puente Sullana para el período de los años 1976 – 2008 y los volúmenes registrados en el embalse Poechos en el mismo período. El modelo muestra una buena correlación y una calibración satisfactoria como puede apreciarse en las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18, donde las masas anuales y mensuales calculadas tienen un comportamiento similar a las masas anuales y mensuales registradas en los puntos de comparación. Presentan un coeficiente de correlación Pearson de 0,95 por ciento, lo cual indica una buena representación del sistema.

Figura 4.16

**Volumen del embalse Poechos simulado y medido en Hm<sup>3</sup>**

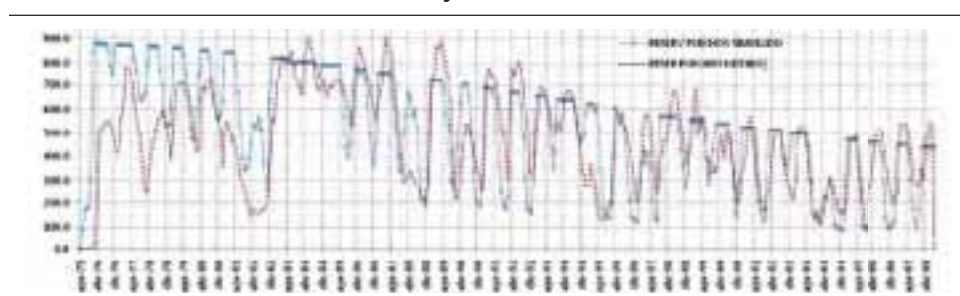


Figura 4.17

Comparación de los caudales simulados y medidos en la Estación Sullana (Hm<sup>3</sup>)

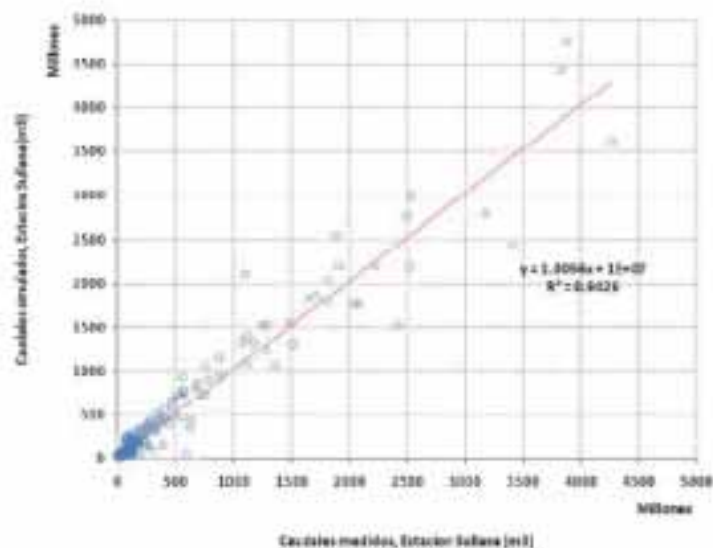
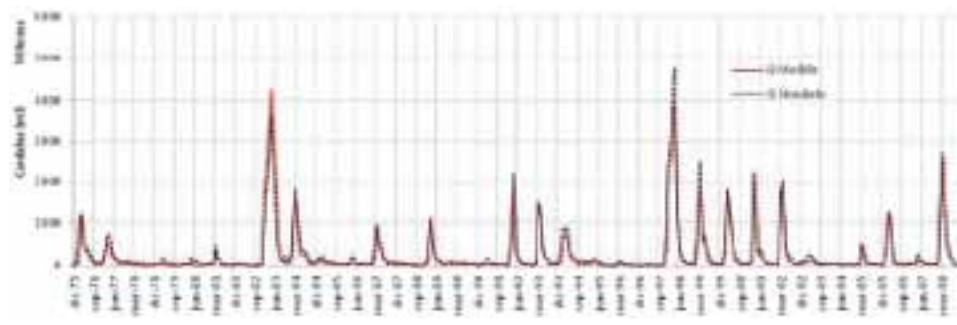


Figura 4.18

Volumen medio mensual Estación Sullana (simulado y medido) Hm<sup>3</sup>



## REFERENCIAS

**Actualización** del Estudio de Asignación de Agua en Bloques de Riego para la Consolidación del Programa de Formalización de Derechos de Uso de Agua en el Valle Chira, del agosto 2009.

**Actualización** del Estudio de Conformación de Bloques de Riego para la Consolidación del Programa de Formalización de Derechos de Uso de Agua en el Valle Chira, aprobado mediante Resolución Administrativa N° 025-2009-ANA-ALA CHIRA, del 25.12.2009.

**B. Srdjevic y D. Obradovic**, Reliability-Risk Concept In Evaluating Control Strategies For Multireservoir Water Resources System, IFAC Large Scale Systems, Londres, 1995.

**Caracterización** hídrica y adecuación entre la oferta y la demanda en el ámbito de la cuenca binacional Catamayo - Chira, Consorcio ATA - UNP -UNL, Loja – Piura, Perú, 2003.

**Castillo Casanova Abner**, Gobierno Regional de Piura, Dirección de Operación y Mantenimiento División Poechos Canal Derivación, Medición de Sedimentos Presa Poechos, 2007.

**David Yates, Jack Sieber, David Purkey y Annette Huber-Lee**, parte 1 y 2, 2005, International Water Resources Association, "WEAP21 – A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model".

**Diagnóstico** de gestión de la oferta de agua en las cuencas Chira – Piura. Proyecto Especial Chira-Piura - INADE en Julio 2001.

**Diagnóstico** de la red de estaciones hidrológicas de nueve proyectos hidráulicos de la costa, INADE-SENAMHI, Octubre 2001.

**Estudio** Hidrológico de sedimentación del reservorio, determinación de los límites de inundación aguas debajo de la presa Poechos, Energoprojekt Hidroinzenjering, Diciembre 2000.

**Estudio** Propuesta de Asignación de Agua en Bloques (Volúmenes Anuales y Mensuales) para la Formalización de Derechos de Uso de Agua del Valle del Chira, 2004.

**Hashimoto, T., Loucks, D. P. y Stedinger, J.** (1982) Reliability, resilience and vulnerability for water resources system performance evaluation. *Water Resour. Res.* 18(1), 14–20. *Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI)*, Estadística y proyección poblacional, y perfil socio demográfico del departamento de Piura, (<http://www.inci.gob.pe>)

**José Carlos de Araújo y Pedro Henrique Augusto Medeiros.** Water availability reduction in reservoirs for different sediment yield scenarios in a semiarid watershed.

**McMahon, T. A.** (1993). Hydrologic Design for Water Use. Chapter 27 in Handbook of Hydrology (ed. D. R. Maidment), McGraw-Hill, Estados Unidos de América.

**Minobe, S.** 1997: A 50-70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophysical Research Letters*, Vol 24, pp 683-686.

**Moy, W-S, Cohon, J. L. y ReVelle, C. S.** (1986) A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir. *Water Resources Research*, 22(4), 489-498.

**Nathan J. Mantua, Steven R. Hare, Yuan Zhang, John M. Wallace y Robert C. Francis.** "A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997. <http://jisao.washington.edu/pdo>.

**Plan de gestión** de la oferta de agua en las cuencas de los proyectos hidráulicos de costa del INADE, Asesores Técnicos Asociados, Agosto 2002.

**Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes y Martin Smith,** "Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos", FAO 56, Roma 2006.

**Thomas Rodding Kjeldsen.** Sustainability Assessment of Water Resources Systems, Sustainability Assessment of Water Resources Systems, 2001.

**Waqar A. Jehangir, Hugh Turrall y I. Masih.** Water productivity of rice crop in irrigated areas, 4th International Crop Science Congress. 2004.

([http://www.cropsscience.org.au/icsc2004/poster/1/2/959\\_jehangir.htm](http://www.cropsscience.org.au/icsc2004/poster/1/2/959_jehangir.htm))

**Tadeo Ramos,** 2009, Determinacion del porcentaje de pérdidas en el sistema secundario Chira Piura (años 2006 al 2008), Proyecto Especial Chira Piura, Direccion de Operaciones y Mantenimiento.

**Jinno, K., Zongxue, X. Kawamura, A. y Tajiri, K.** (1995) Risk assessment of a water supply system during drought. *Water Resour. Devel.* 11(2), 185-204