

Simposio y Capacitación Profesional
'Hidrología Andina para el manejo de los recursos hídricos: conceptos y
herramientas'
17 – 20 de Noviembre 2015, Santiago, Chile

Modelización de Recursos Hídricos con
WEAP, Uso en Cuencas Criosféricas y
Revisión de Aplicaciones en Los Andes

Juan Ramirez
TH Köln ITT



Centro UC
Cambio Global

Contenidos:

I. Introduccion al Modelo WEAP.

II. Modelización de Glaciares en WEAP

III. Revisión de Aplicaciones en Los Andes

I. Introducción al Modelo

- WEAP (Water Evaluation and Planning System) pertenece al Stockholm Environment Institute (SEI) fue desarrollado en 1988.
- La primera aplicación fue en la región del lago Aral-Asia Central en 1989.
- WEAP se ha aplicado en estudios en más de un centenar de países, incluyendo en el área de los Andes: Chile, Bolivia, Perú, Ecuador, etc.
- Es bien conocido en Chile:
 - Centro de Cambio Global- Universidad de Chile,
 - Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA),
 - Juntas de Vigilancia (Huasco),
 - ...

Aspectos principales

- **Sistema integrado de planificación de recursos hídricos** (oferta y demanda + desarrollo de escenarios) con diversos módulos disponibles: agua subterránea, reservorios, generación hidroeléctrica, finanzas, calidad de agua.
- **Interfaz gráfica basada en SIG para apoyo visual** (no para análisis, geoprocésamiento).
- **Permite programación, construcción de variables y ecuaciones** creadas por el usuario.
- **Enlaces a otros modelos:** MODFLOW, Qual2k, LEAP, etc.
- **Un año gratis de licencia** a las organizaciones sin fines de lucro, gubernamentales o académicas con sede en **países en desarrollo**.

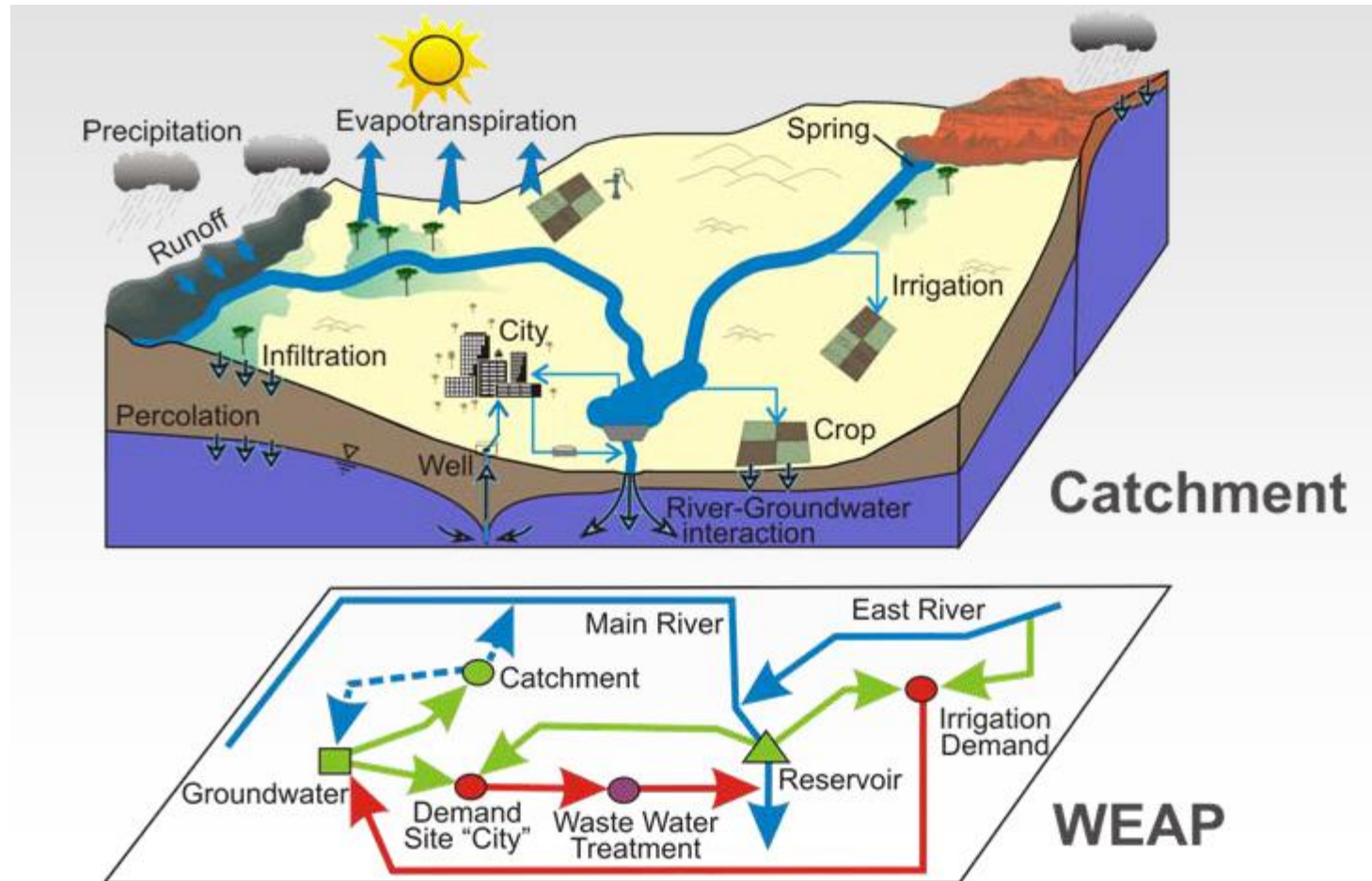
El Enfoque del Modelo

I. Representación del sistema en un área (normalmente una cuenca) en términos de:

- Suministros (por ejemplo, ríos, arroyos, aguas subterráneas, embalses y desalinizadoras).
- Lugares de demanda (por ejemplo, uso doméstico, industrial, agricultura y ecosistemas).
- Lugares de captación, líneas de transmisión.
- Lugares de generación de contaminación y de tratamiento de aguas residuales

II. Se conectan los suministros con los lugares de demanda (node-link architecture) para desarrollar la red.

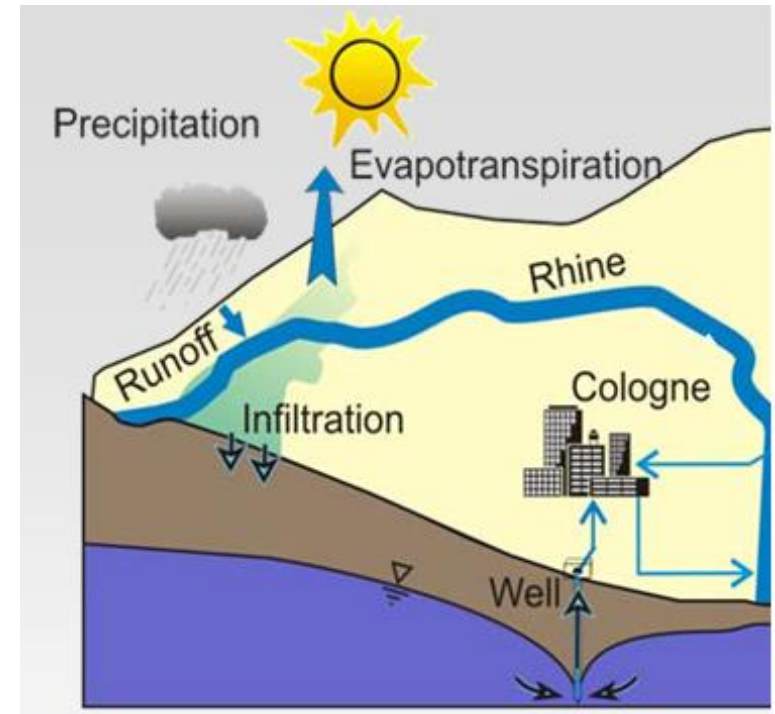
Representación de una Cuenca en WEAP



BGR, 2010

Ejemplo Datos Requeridos

- Caudal cabecera [m^3/s]
- Área [ha]
- Precipitación [mm/month]
- Evapotranspiration [mm/month]
- Infiltración [mm/month]
- Demanda de agua [m^3/year]
- Extracciones de agua [m^3/s]
- Caudal de retorno [m^3/s]
- Volumen Inicial de Agua Subterránea [m^3]



BGR, 2010

Relaciones conocidas:

- | | | |
|------------------------|---|--|
| • Runoff | = | Precipitation – Evapotranspiration – Deep Infiltration |
| • Water Demand Cologne | = | Well Abstraction + River Abstraction – Losses Water |
| • Return Flow Cologne | = | Demand Cologne – Consumption |
| • Groundwater Storage | = | Initial Storage + Infiltration – Well abstraction) |

Asignación de Recursos Hídricos



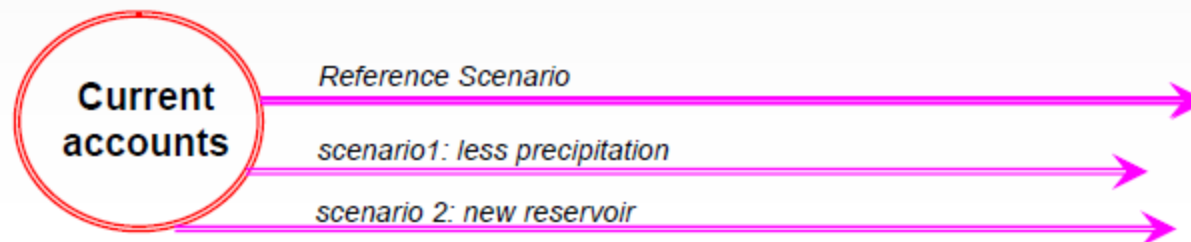
A cada sitio de demanda se le asigna una prioridad y además una preferencia entre los suministros disponibles:

- Determina el orden en el que se cumplen las demandas
- Determina orden en el que se utilizan fuentes

Desarrollo de Escenarios

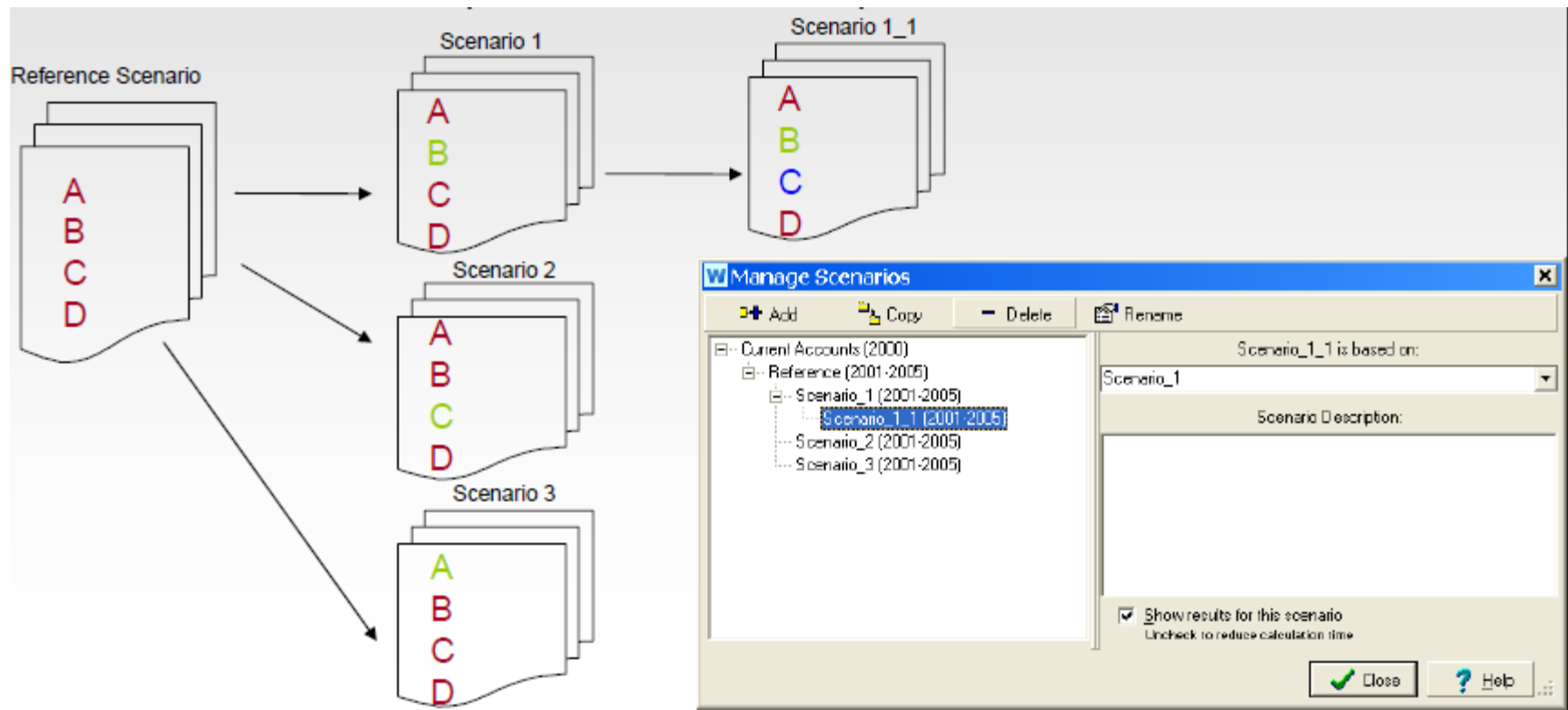
La modelación de escenarios funciona de esta manera:

- I. En primer lugar, se elige un año "estado actual" para servir como el año base del modelo; el estado actual es el conjunto de datos del que se construyen los escenarios.
- II. Un escenario "Referencia" se establece a partir del estado actual para simular una probable evolución del sistema sin intervención.
- III. Por último, "que pasa si" escenarios se pueden crear para alterar el "Escenario de Referencia" y evaluar los efectos de cambios en las políticas y/o tecnologías



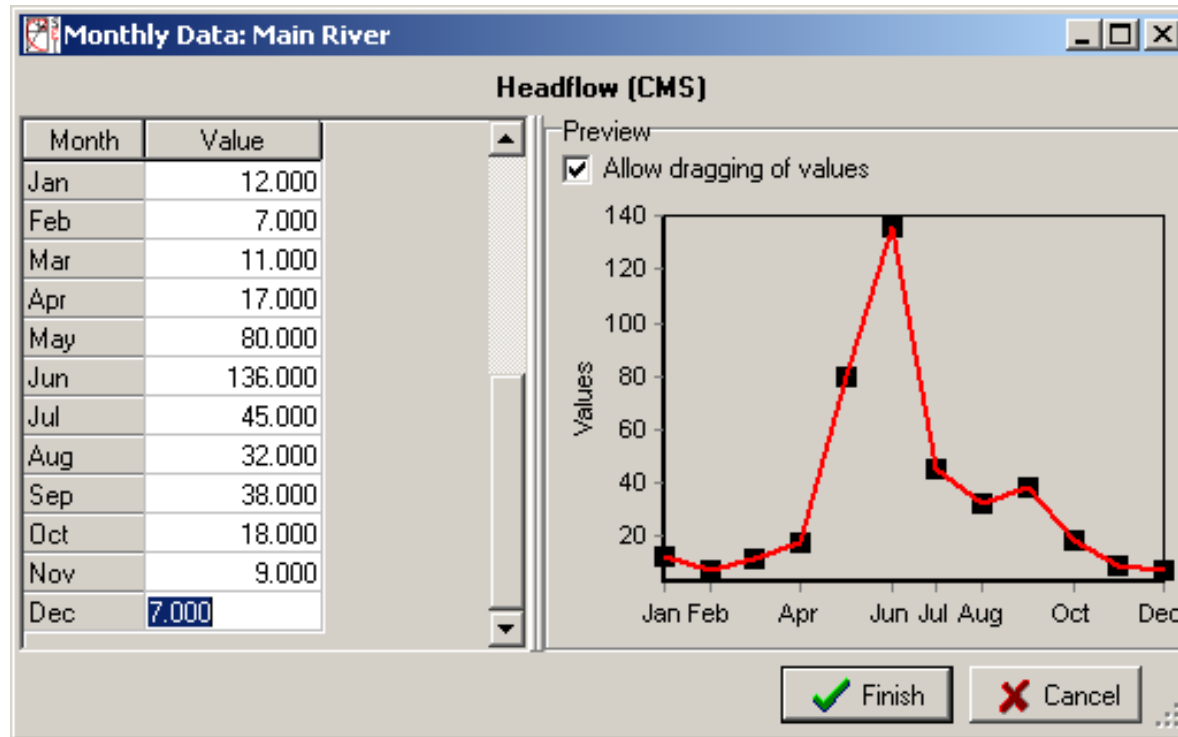
Manejo de los Escenarios

- Un concepto importante en el uso de escenarios es la idea de herencia de escenario. Esto permite crear jerarquías de escenarios que heredan expresiones por defecto de su escenario de origen.



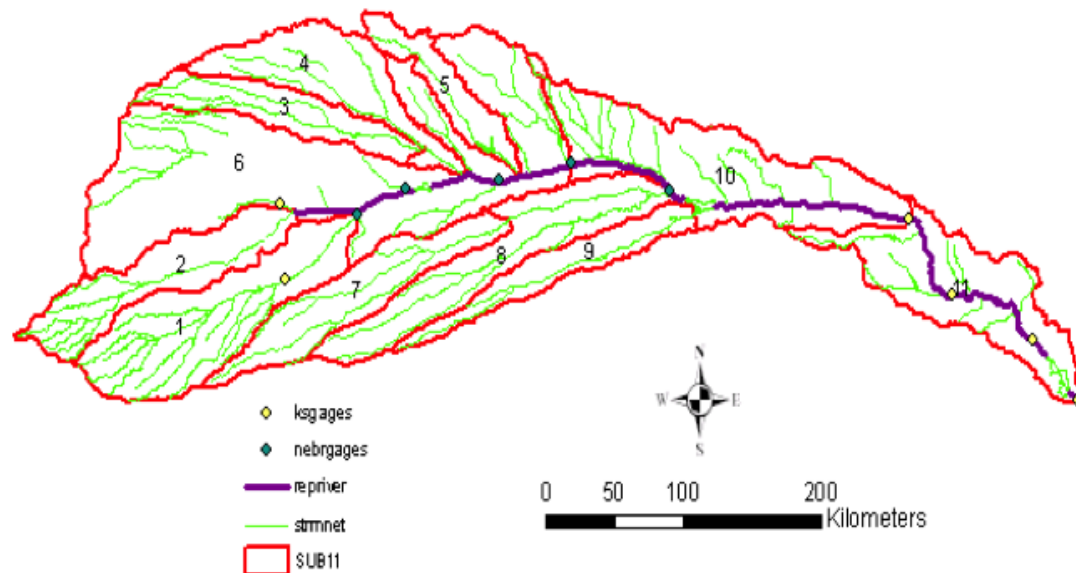
Oferta de Agua

1. La Oferta de agua puede ser definida por el usuario usando series de tiempo disponibles de caudal (preferiblemente en la cabecera de los ríos) y la red hidrográfica.

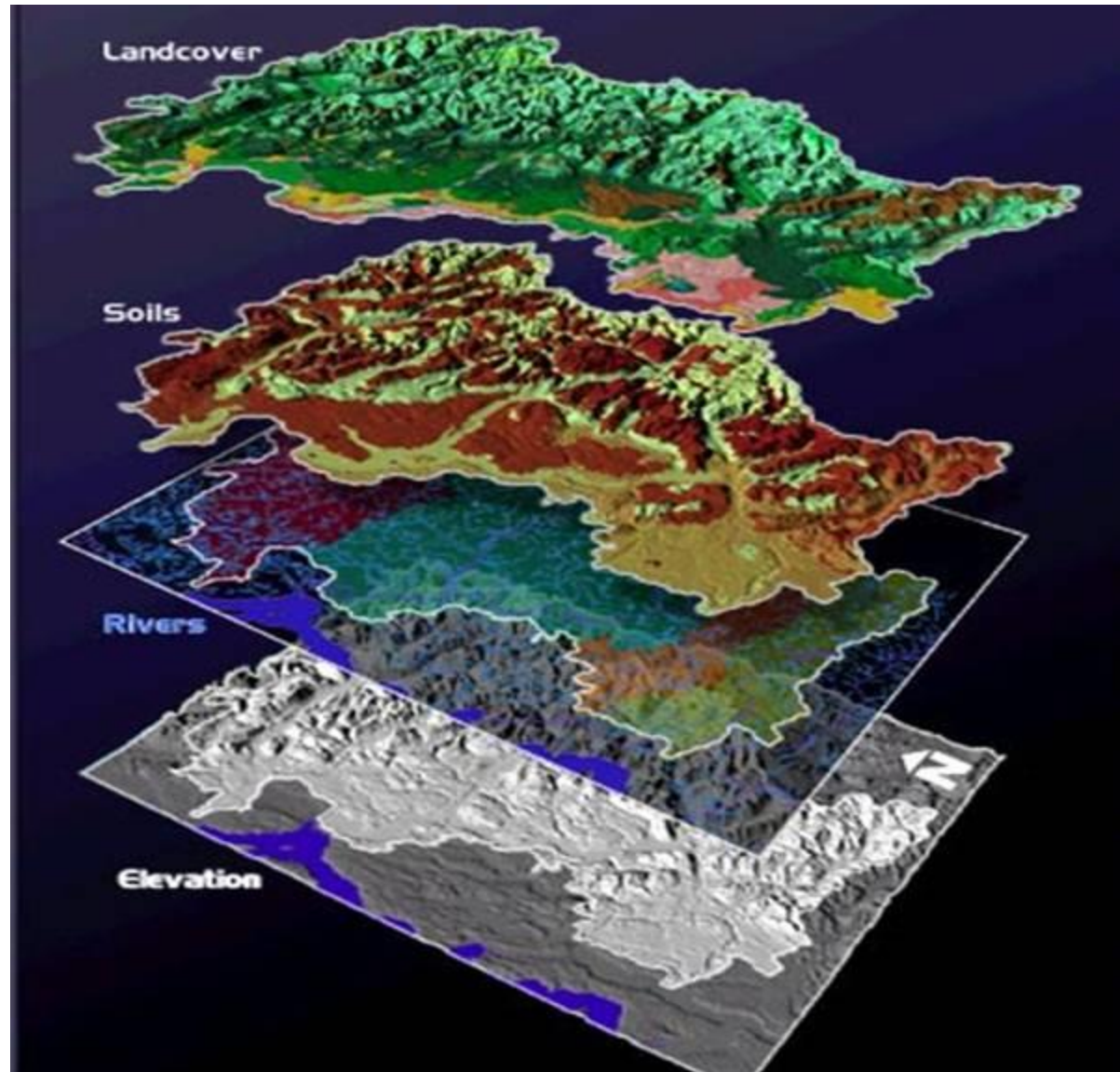


El método de transposición de caudales puede ayudar cuando no existen datos en los puntos de interés.

2. También la oferta de agua puede ser calculada usando la hidrología de la cuenca. El modelo hidrológico en WEAP es semi-distribuido, el área de estudio total se divide en sub-cuencas adyacentes (catchments). Los datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad, viento) se aplican uniformemente dentro de cada subcuenca, las cuales están divididas por el uso/cobertura de suelo.



Uso de GIS Software
y capas para geo-
procesamiento y
preparar los datos
para el modelo.



Métodos para la simulación de la hidrología de la cuenca I

- 1. Método Demanda del Riego Solo;** es el método más simple, utiliza los coeficientes de los cultivos para calcular la EP/demanda de riego de los cultivos en la cuenca. No simula procesos de escorrentía, infiltración o cambios en la humedad de suelo.
- 2. Método Precipitación –Escorrentía (Coeficiente Simplificado);** también usa los coeficientes de los cultivos, pero simula el resto de la precipitación como escorrentía hacia un río y/o hacia agua subterránea.
- 3. Método Precipitación –Escorrentía (humedad de suelo);** es más complejo, representa la cuenca con dos capas de suelo, además del potencial para la acumulación de nieve. En la capa superior simula la evapotranspiración, la escorrentía, el interflujo poco profundo y cambios en la humedad del suelo. En la capa inferior del suelo se simula el enrutamiento del caudal base al río y cambio en la humedad de suelo.

Métodos para la simulación de la hidrología de la cuenca II

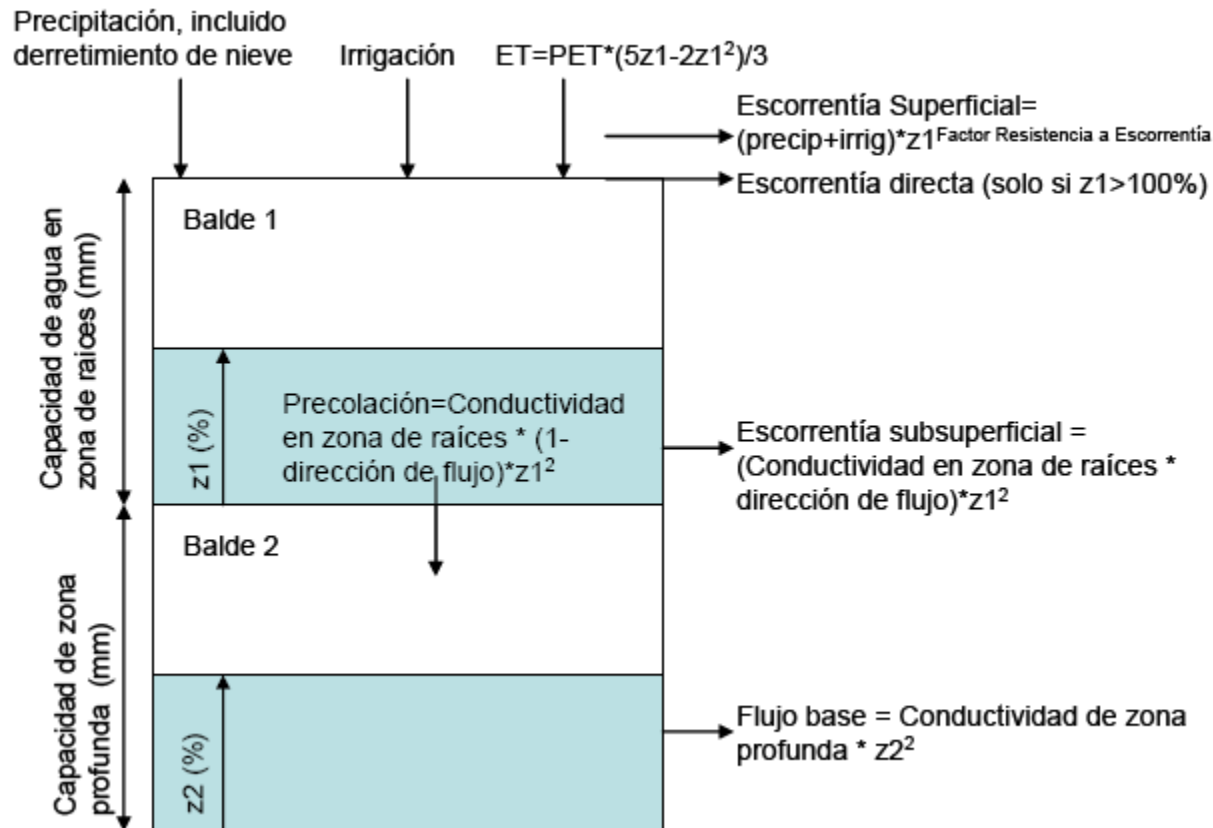
4. Método MABIA (mejoramiento de CROPWAT de FAO)

El Método Mabilia es una simulación diaria de la transpiración, la evaporación, las necesidades de riego/la programación, el crecimiento del cultivo y los rendimientos.

5. Método Crecimiento de Plantas (nuevo)

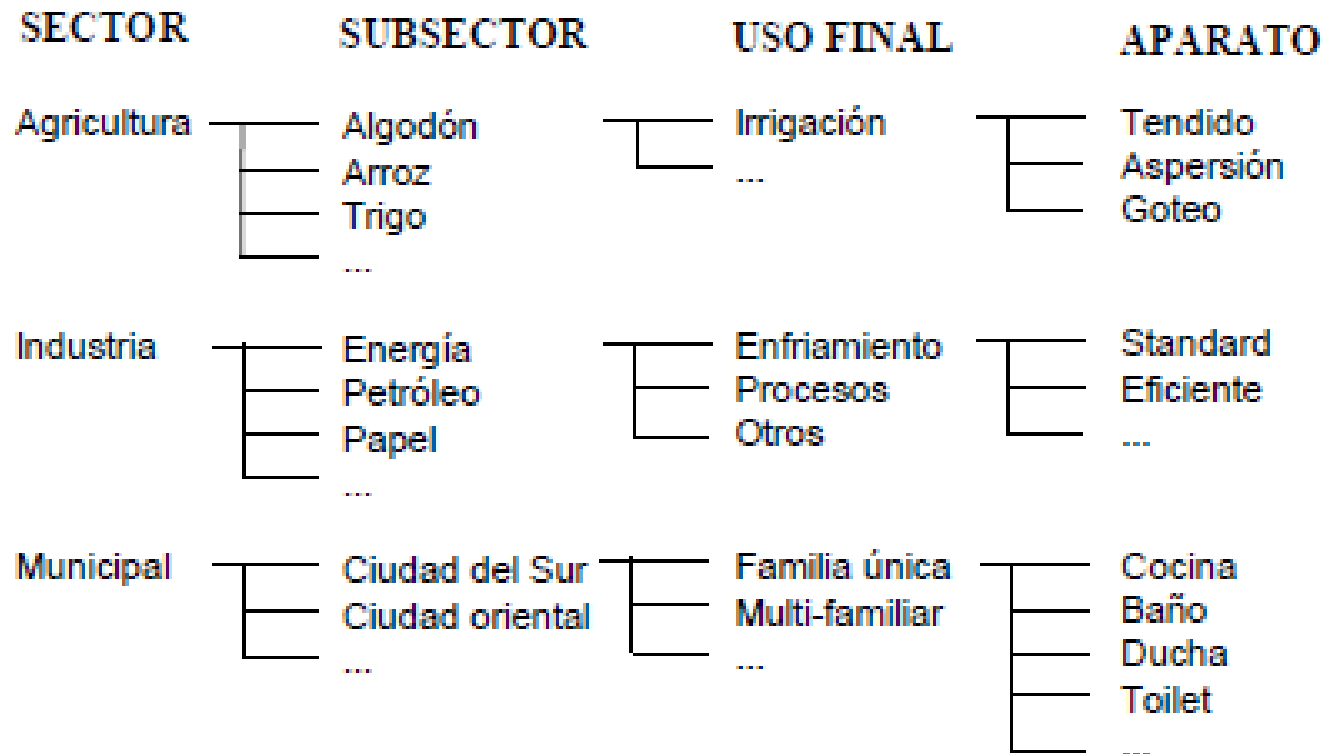
Simula el crecimiento de las plantas, el uso del agua, y el rendimiento utilizando una etapa de tiempo diario.

Elementos hidrológicos modelados en WEAP (método humedad de suelo)



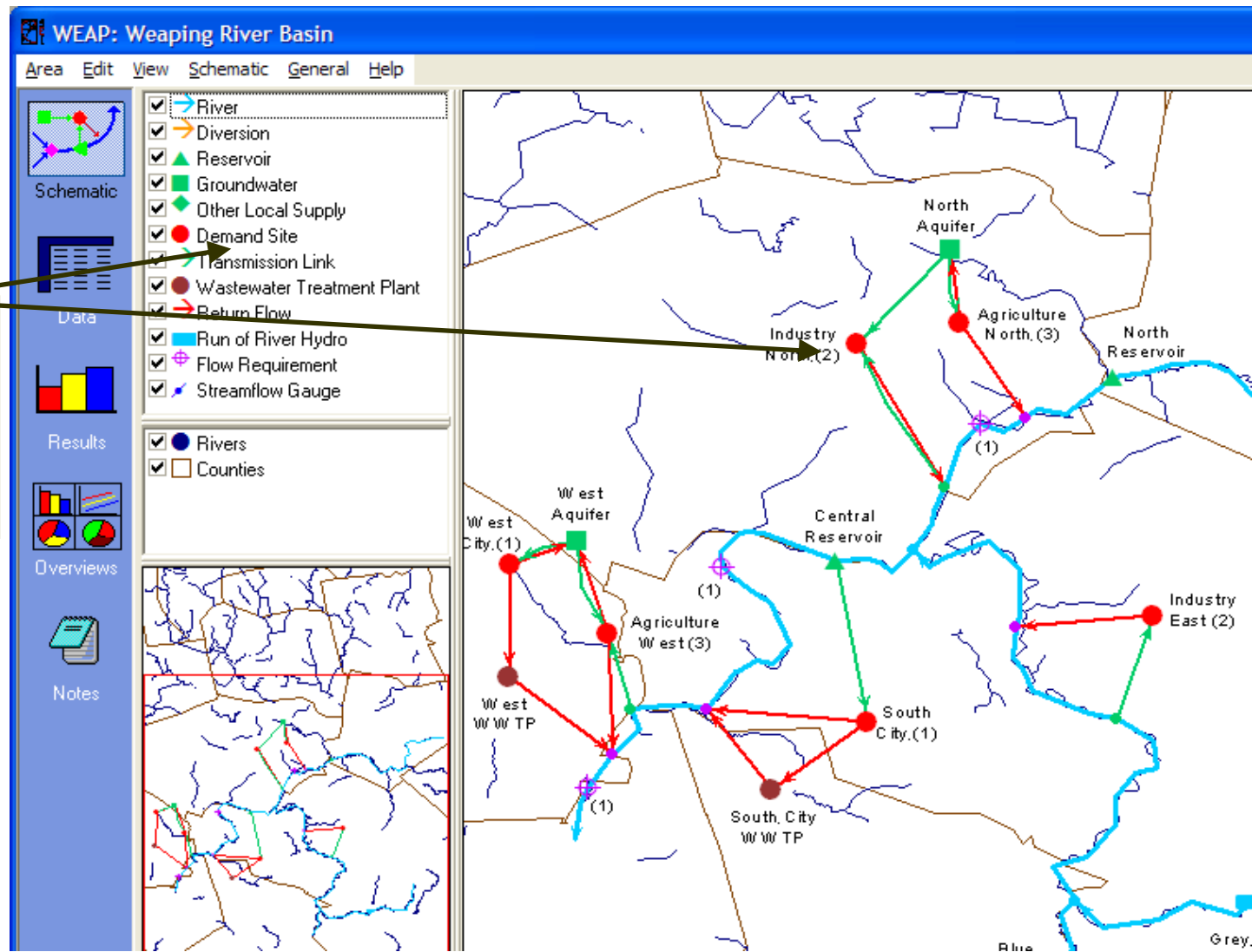
Demanda de Agua

1. Para la demanda de agua se hace un análisis multisectorial: demanda municipal e industrial, agricultura, caudal ecológico, etc.



Vicua, 2009

Vista Esquemática

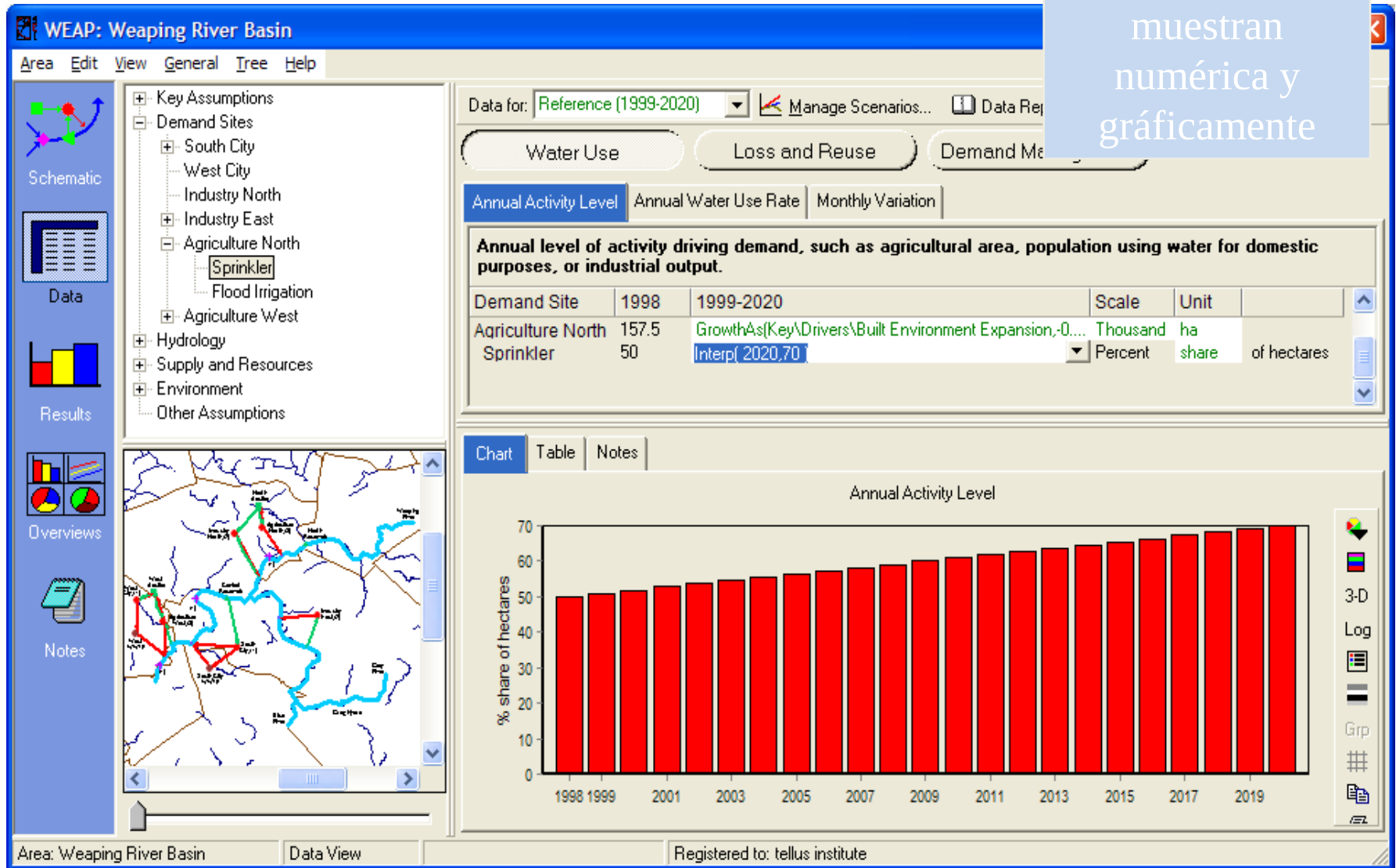


Elementos

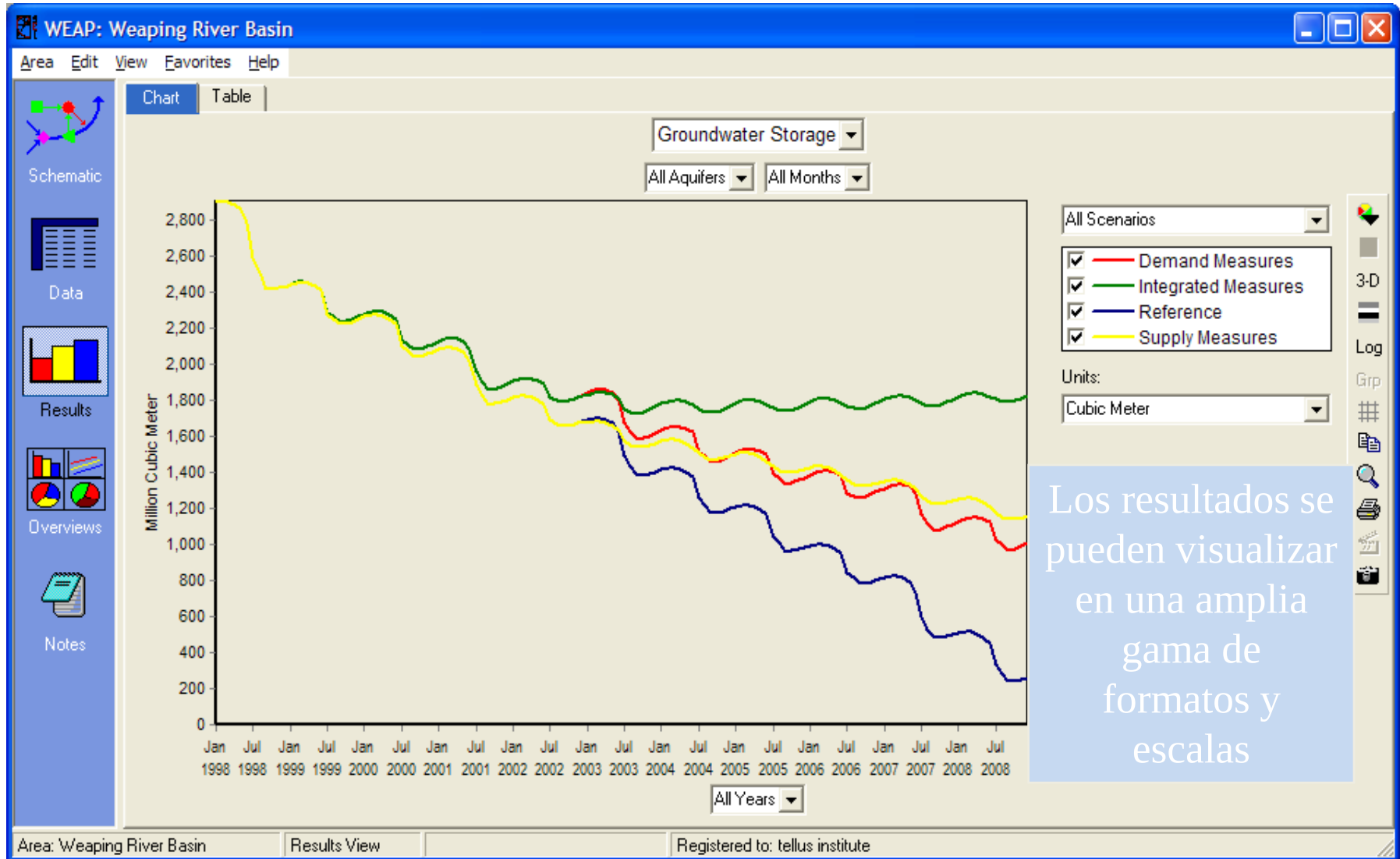
	Name (Data Path)	Simulates...	Important input data
	River (Supply and resources/Rivers)	River, spring, canal, pipeline	Headflow
	Diversion (Supply and resources/Rivers)	Flow diversion, e.g. divert water from a river into a channel	Max. diversion
	Reservoir (Supply and resources/Rivers/[RiverName]/Reservoirs)	Reservoir site on a river or off-line reservoir	Capacity, volume-elevation curve, initial storage, evaporation, operation
	Groundwater (Supply and resources/Groundwater)	Groundwater catchment	Storage capacity, initial storage, natural recharge, max withdrawal
	Other supply (Supply and resources/Other supply)	Unconnected rivers, inter-basin transfers, desalination plants, ...	Inflow
	Demand site (Demand Sites and Catchments)	City, county, irrigation, industry	water use, loss and reuse, priority
	Catchment (Demand Sites and Catchments)	Area including hydrological processes	Area, climate data (precipitation, evapotranspiration), crop data, soil data
	Runoff / Infiltration (Supply and resources/Runoff and Infiltration/from [CatchmentName])	Catchment runoff and infiltration Flow from catchments to river/groundwater	Runoff fraction
	Transmission Link (Supply and resources/Linking demand and supply/ to [DemandSiteName]/from [SupplySiteName])	Delivery of water from supply node to demand nodes	Max flow, supply priority
	Wastewater Treatment Plant (Water Quality/Wastewater Treatment)	Wastewater Treatment Plant, increase in water quality	Capacity, treatment
	Return Flow (Supply and resources/Return Flows/from [DemandSiteName])	Water that is not consumed at a demand site, connect demand with supply	Return flow routing (percentage of outflow)

Datos

Los datos se muestran numérica y gráficamente

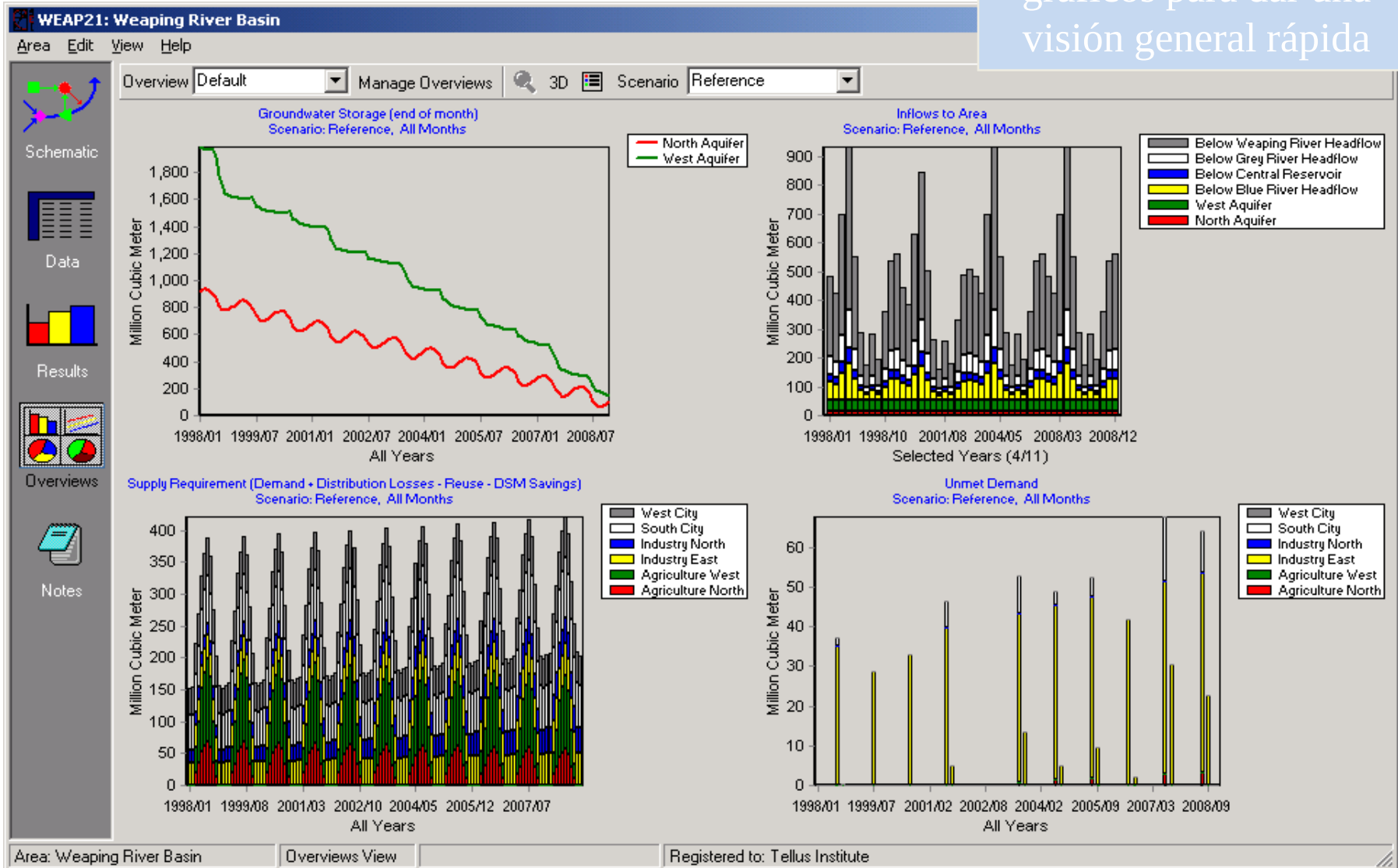


Resultados



Vista General (Overviews)

Se puede seleccionar
gráficos para dar una
visión general rápida



Notas

WEAP21: Weaping River Basin

Area Edit View Tree Help

Schematic

Data

Results

Overviews

Notes

Key Assumptions

- Drivers
 - GDP
 - Price of Water
 - Technical Innovation
 - Built Environment Expansion
- Monthly Variation
- Elasticity
- Demand Sites
 - South City
 - West City
 - Industry North
 - Industry East
 - Agriculture North
 - Agriculture West
- Hydrology

Notes for branch: Key\Drivers

B *I* U 9 Arial Font Print All Word All Edit

The primary drivers for the scenarios in this example include:

- GDP per capita, which influences the quantities of water demanded
- Price of water, which can lead to decreased consumption with increased price
- Technical innovations, which can lead to more efficient use of water
- Built environment expansion, which affects the hydrology of the system

Se puede seleccionar cualquier parte del árbol para introducir notas sobre supuestos y referencias

Area: Weaping River Basin Notes View Registered to: Tellus Institute

II. Modelización de Glaciares en WEAP

WEAP tiene un módulo opcional para dar seguimiento a la acumulación y derretimiento de hielo en la superficie de la tierra. El módulo glaciar solo se puede activar con el método de humedad de suelo

Data for: Current Accounts (2015) Manage Scenarios Data Expressions Report

Land Use Climate Glacier Flooding Yield Water Quality Cost Advanced

Initial Ice Depth Ice Melting Point Radiation Coefficient Groundwater Infiltration Scaling Factor b Scaling Factor c

Initial value for ice depth (snow water equivalent, average depth over branch's area) at the beginning of the first month. All branches within a catchment have the same climate data. To change this, go to General, Basic Parameters.
Range: 0 and higher

Demand Sites and Catchment	2015	Scale	Unit
Subbasin_2	0		m

El modelado de la dinámica glaciar sigue el enfoque estándar en WEAP, que consiste en la simulación de procesos lluvia-escorrentía después de dividir una cuenca en subcuencas.

A continuación, la zona sub-cuenca se divide en i bandas de elevación. Cada subcuenca/banda de elevación representa un “catchment” en WEAP (un área con comportamiento hidrológico similar.) Dentro de cada objeto de captación, se pueden agregar condiciones de cobertura de suelo y del clima para cada paso de tiempo del modelo (time-step).

Cada banda de elevación i , se divide en una porción glaciar ($j = 1$) o no-glaciar ($j = 2$). Una vez que las áreas se dividen, la escorrentía de los glaciares (en evolución) y de las precipitaciones se calcula y se añade.

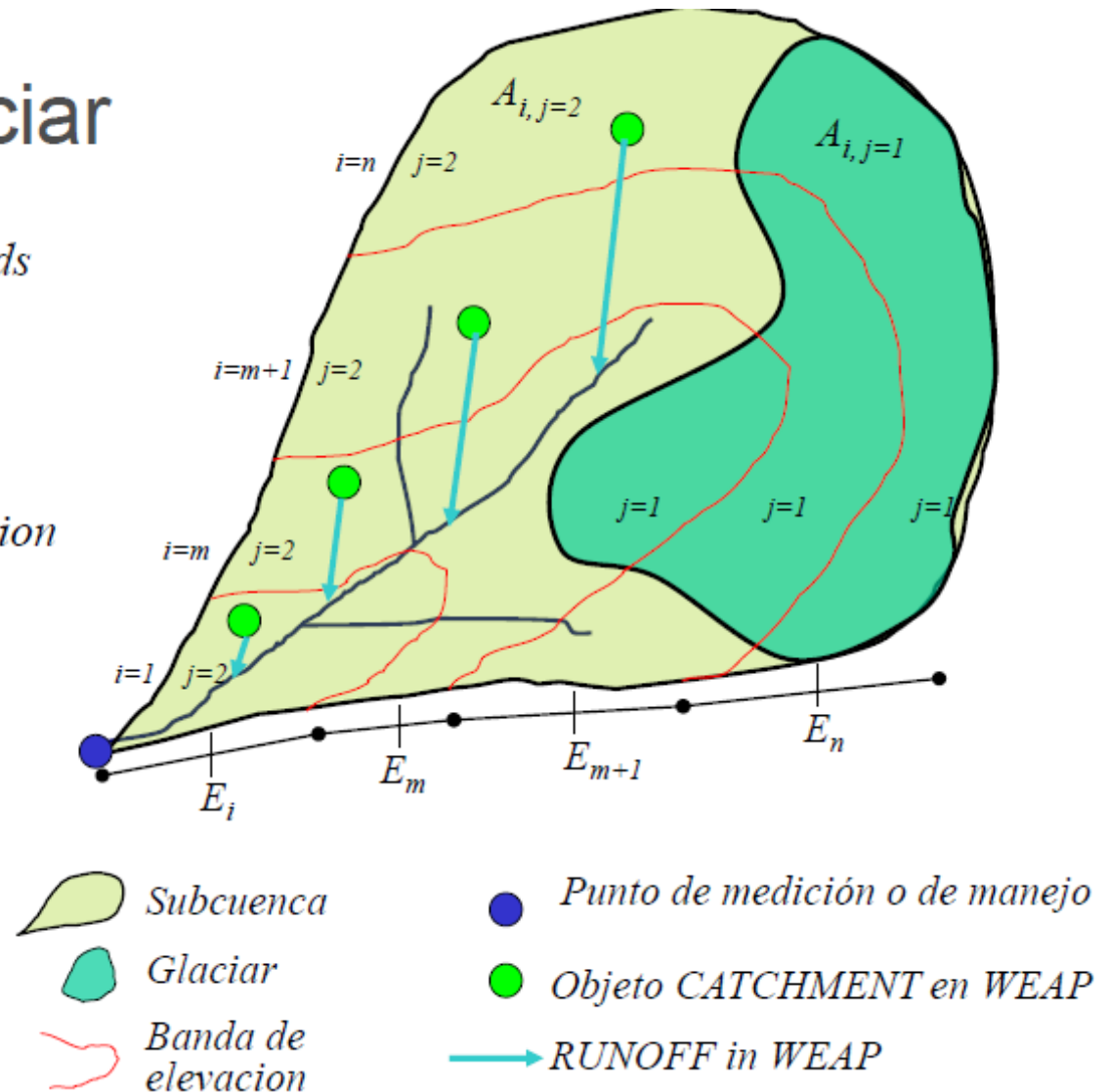
Modelo Glaciar

$E_i=1$ to n elevation bands

$j=1$, glacier zone

$j=2$, non-glacier zone

m =lowest glacier elevation band



Vergara, W. et al, 2011

Parámetros – Módulo Glaciar

Los principales parámetros que se consideran dentro del módulo Glaciar son:

Profundidad de hielo inicial

Valor inicial para la profundidad de hielo al comienzo del primer mes.

Punto de fusión del hielo

Temperatura a la que el hielo comienza a derretirse.

Coeficiente de radiación

Porcentaje de radiación neta que contribuye al derretimiento del hielo.

Factor de Escala B y C; Infiltración de Agua subterránea

Pasos para la Modelación Cuencas Criosféricas

Paso 0 – Condiciones iniciales: El primer paso es definir las condiciones hidrológicas dentro de cada subcuenca. Las imágenes de satélite se utilizan para determinar la asignación inicial de porción glaciar contra no-glaciar (A_i -km²). A partir del área se calcula el volumen.

Paso 1 - Estimación del escurrimiento por el derretimiento de nieve y hielo: La contribución a la esorrentía superficial de la porción de glaciares de los catchments se extrapola a partir de estimaciones de nieve/hielo derretido. Esto se hace para cada mes, t , dentro de un año hidrológico, T .

Paso 2 – La esorrentía superficial a nivel sub-cuenca: El volumen de la esorrentía superficial dentro de una sub-cuenca se calcula para cada paso de tiempo mensual como la suma de la contribución de a) derretimiento de la nieve y el hielo de la porción glaciar del sub- cuenca, y b) la esorrentía procedente de la simulación de los procesos lluvia-esorrentía en porciones no-glaciares de la subcuenca.

Pasos - II

Paso 3 - Balance anual de masa: Un balance de masa se utiliza para evaluar los cambios en el área cubierta por glaciares dentro de una subcuenca a finales de los 12 pasos de tiempo mensuales de un año hidrológico.

Paso 4 – Evolución Anual de la Geometría del Glaciar: El volumen general y la extensión del hielo glacial dentro de una subcuenca se calculan antes de pasar al año hidrológico subsiguiente.

Paso 5 - Calibración: El criterio clave para la calibración es el ajuste de parámetros. Esto es necesario para obtener un buen ajuste con la superficie de los glaciares y el caudal medido en puntos seleccionados en los cauces de las estaciones de aforo.

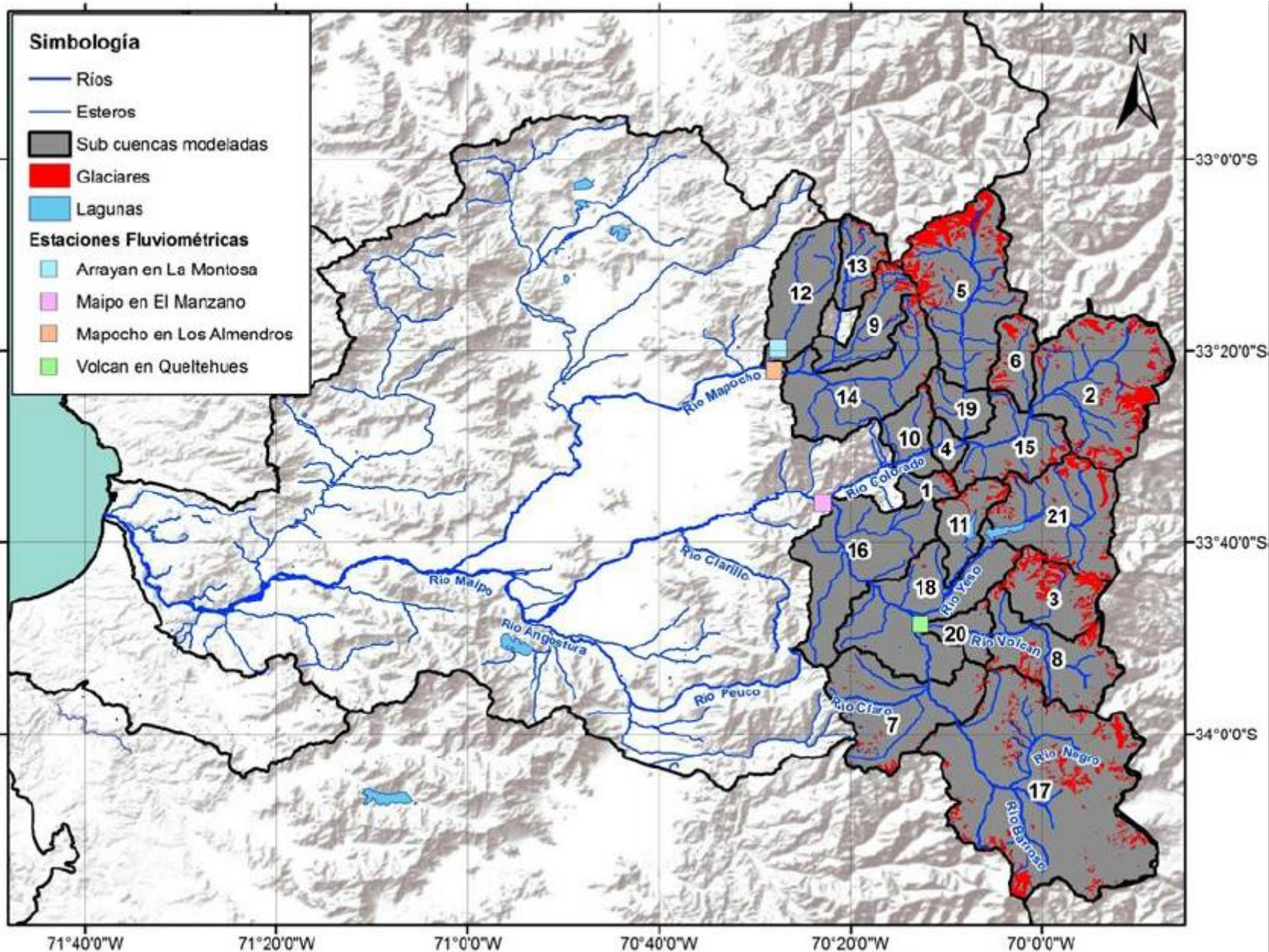
Consideraciones

- La profundidad del hielo aumenta o disminuye debido a la transformación de la nieve en hielo, o al derretimiento del hielo existente.
- La nieve que no se ha derretido después de doce meses se transforma en hielo.
- El hielo se derrite sólo si no hay nieve que lo cubre, y la temperatura está por encima de un valor crítico (threshold).

III. Revisión de Aplicaciones en Los Andes

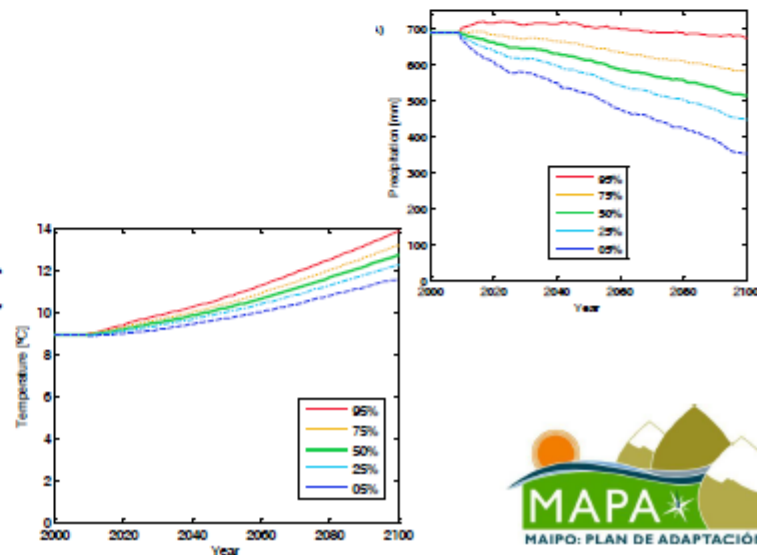
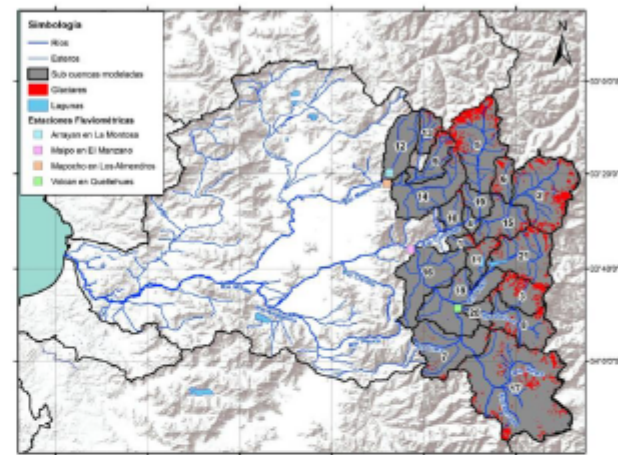
1. Proyecto: Vulnerabilidad y adaptación a la variabilidad y al cambio climático en la Cuenca del Rio Maipo en Chile Central (IDRC, Centro de Cambio Global UC), Bustos, E. 2015.

- En la Cuenca del Maipo existen 387,4 km² de glaciares (DGA, 2012), correspondientes al 2,5% del total de la cuenca, o al 6.6% de la zona cordillerana.
- Poca información /datos en zonas altas



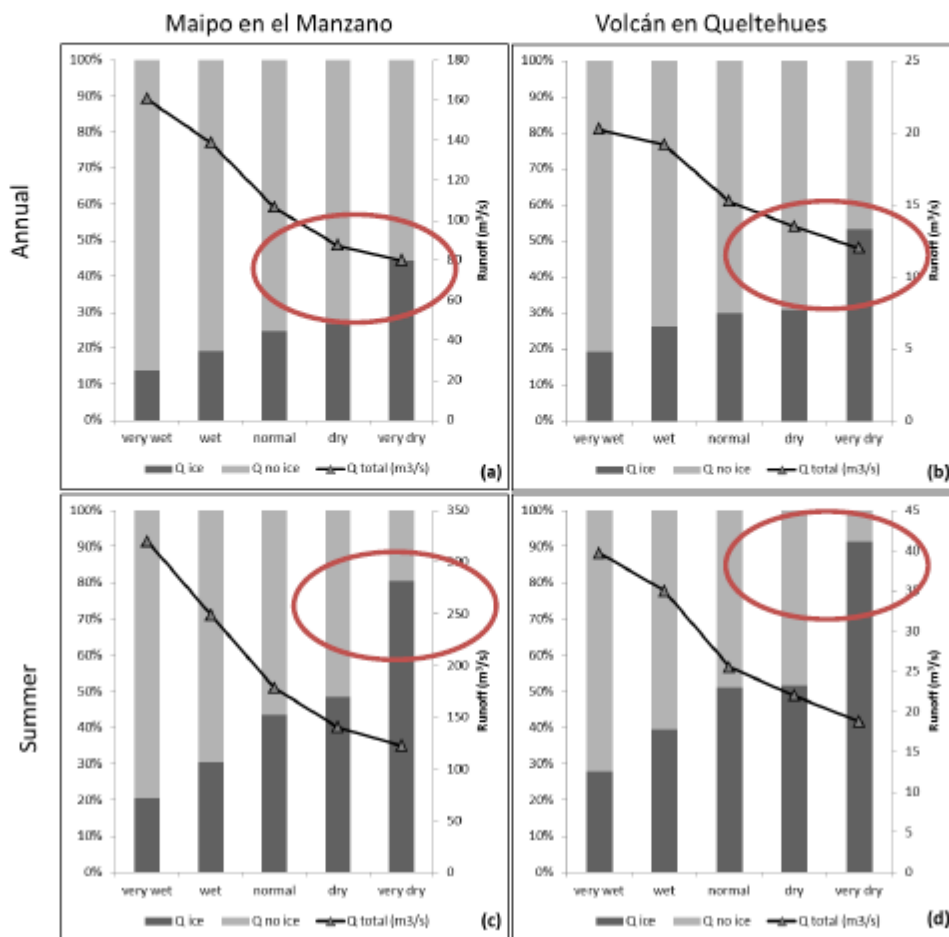
Metodología

- Modelo Integrado RR.HH.
 - Hidrología cordillera (*Meza, et al., 2014*)
 - Modelos Glaciares (*Castillo & McPhee, 20XX*).
 - 10 subcuencas
 - Glaciares Blancos + Cubiertos
 - Área + Caudal
 - Incorporación Infraestructura Generación Hidroeléctrica
 - Actual + Futura (PHAM).
- Generación escenarios de CC (*Chadwick et al., 20XX*).



Contribución de caudal glaciar al río: variable según temporada de análisis (verano o año completo) y según tipo de año hidrológico

40% de Q anual
en Maipo
Manzano años
secos/muy secos



% de Q aumenta
en cuencas más
altas (obvio).

50-80% de Q
verano en Maipo
Manzano años
secos/muy secos

2. MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN CUENCAS DE SUMINISTRO DE AGUA DE LAS CIUDADES LA PAZ Y EL ALTO, BOLIVIA. Escobar, M. et al. 2013

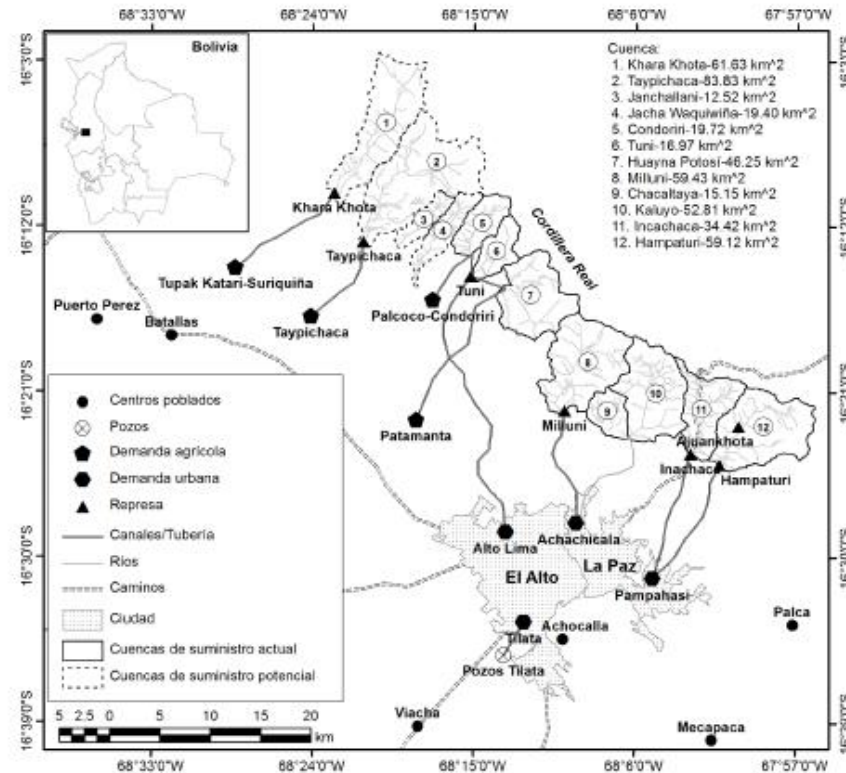


Figura 2. Área de estudio de la modelación hidrológica del sistema de agua de La Paz y El Alto

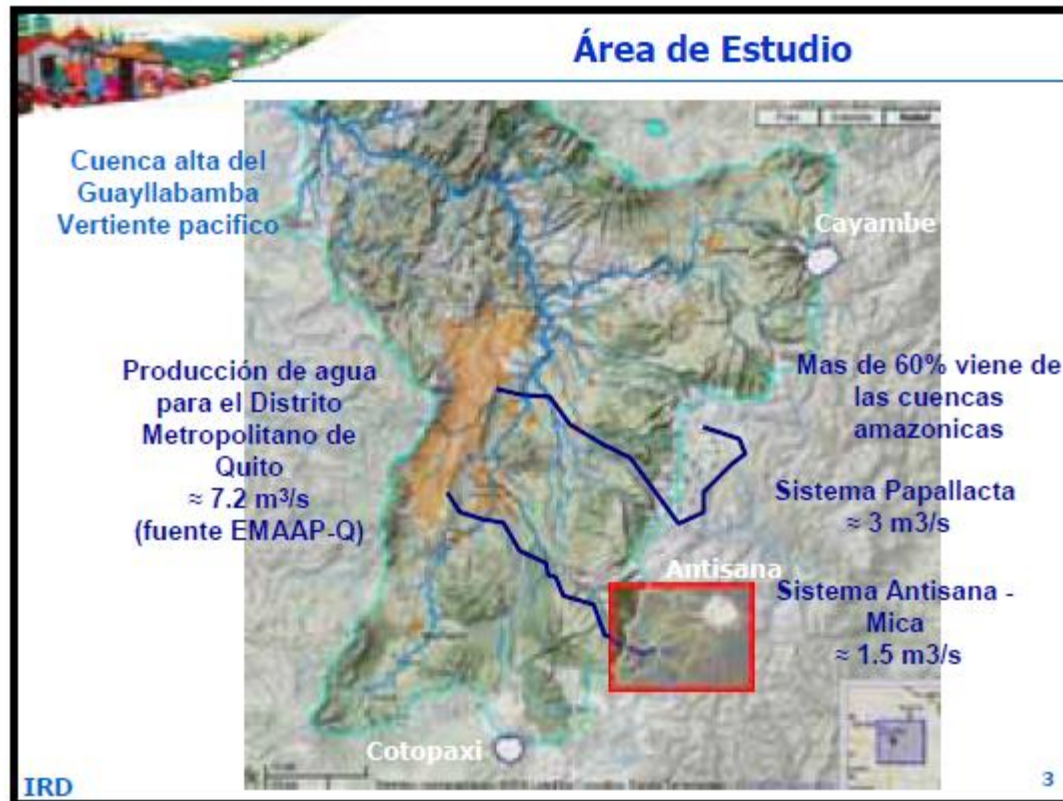
El modulo glaciar usado es simple debido a las limitaciones en datos, sería adecuado usar un modelo basado en el balance energético.

La modelación hidrológica en zonas de montaña como el área estudiada es bastante compleja, debido a la escasez de datos y a la alta variabilidad climática. En las cuencas de suministro de La Paz y El Alto, existen escasos datos climáticos, y en el caso de los glaciares fue necesario extrapolar datos del glaciar Zongo. Con estas consideraciones los resultados presentados de los aportes glaciares deben ser usados como referencia y no como valores exactos.

En el caso de la extrapolación de los parámetros de calibración del modelo hidrológico a las posibles cuencas de suministro, fue validado con el balance hídrico en AguAAndes. Los resultados modelados tanto en WEAP como AguAAndes son aceptables. De esta manera esta herramienta puede ser útil en cuencas donde no se cuenta con datos suficientes.

3. Modelación hidrológica de páramos y glaciares en relación con la oferta de agua de la hoya de Quito Caso del Antisana.

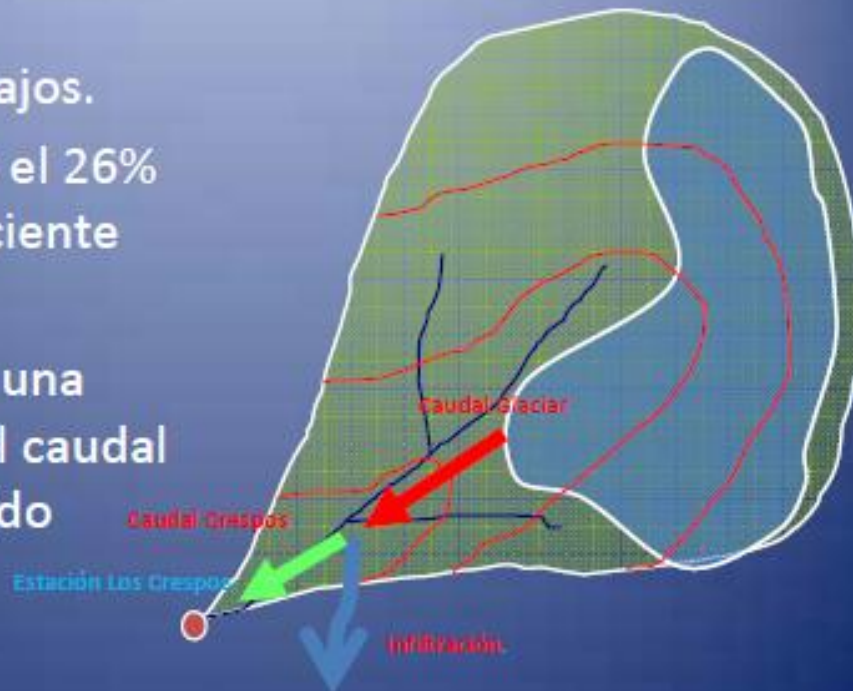
Calispa, M., Pouget, J.: Proyecto Modelación hidrológica de glaciares y páramos en WEAP, Ecuador-Perú (Quito y Lima)



- Se estructuró un modelo con bandas de nivel cada 125m para alturas mayores a 4500m.s.n.m y cada 250m para menores.

Calibración del modelo glaciar:

- Resultados bajos.
- No se supera el 26% para el coeficiente de NASH.
- Se considera una reducción del caudal total producido debido a la infiltración



$$\text{Caudal Los Crespos} = \text{Caudal Glaciar total} - \text{Infiltración}$$

FIN

Mas información:

<http://www.weap21.org/>