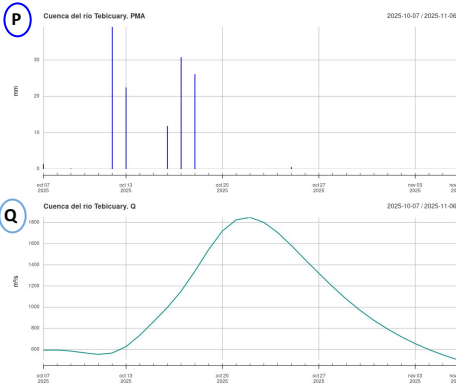
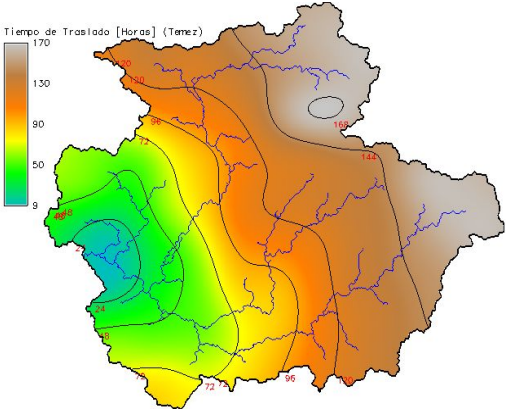
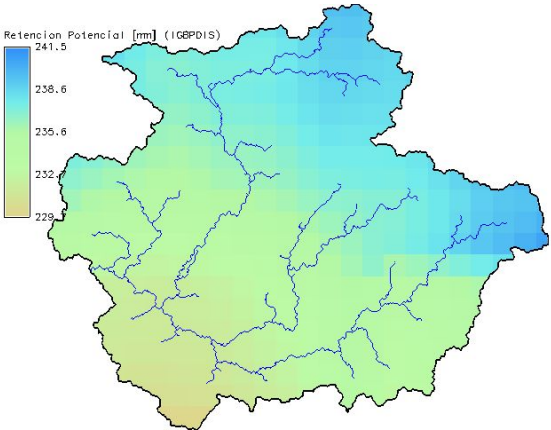
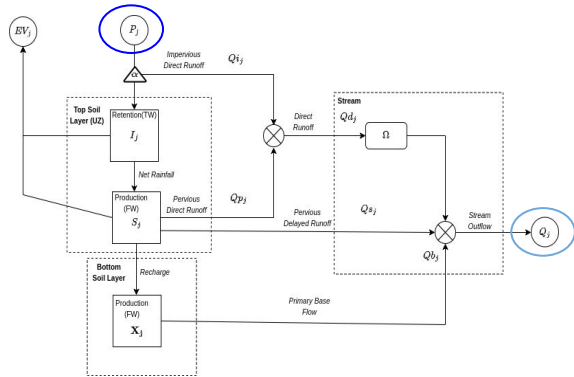
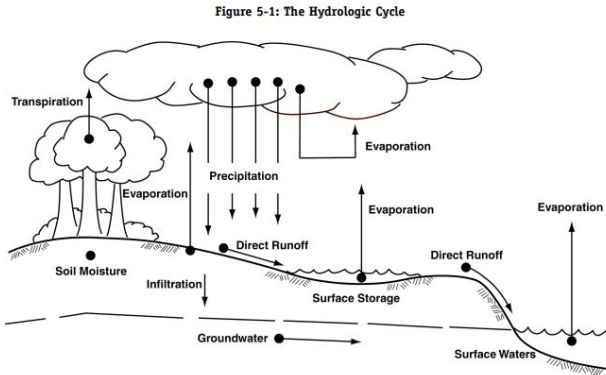
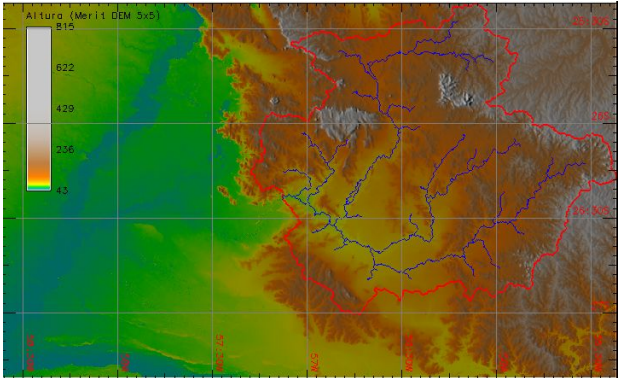


Sistemas y Procesos Hidrológicos Superficiales (Meso y Macro escala)



I. Ciclo Hidrológico y Sistemas Hidrológicos

Elementos conceptuales de análisis hidrológico para la práctica operativa de pronóstico

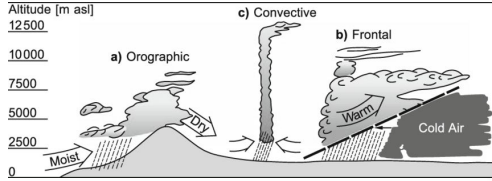
Ciclo Hidrológico y Sistemas Hidrológicos

El Ciclo Hidrológico Global. Fases

Fase Atmosférica

Vapor de agua

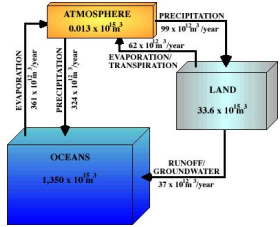
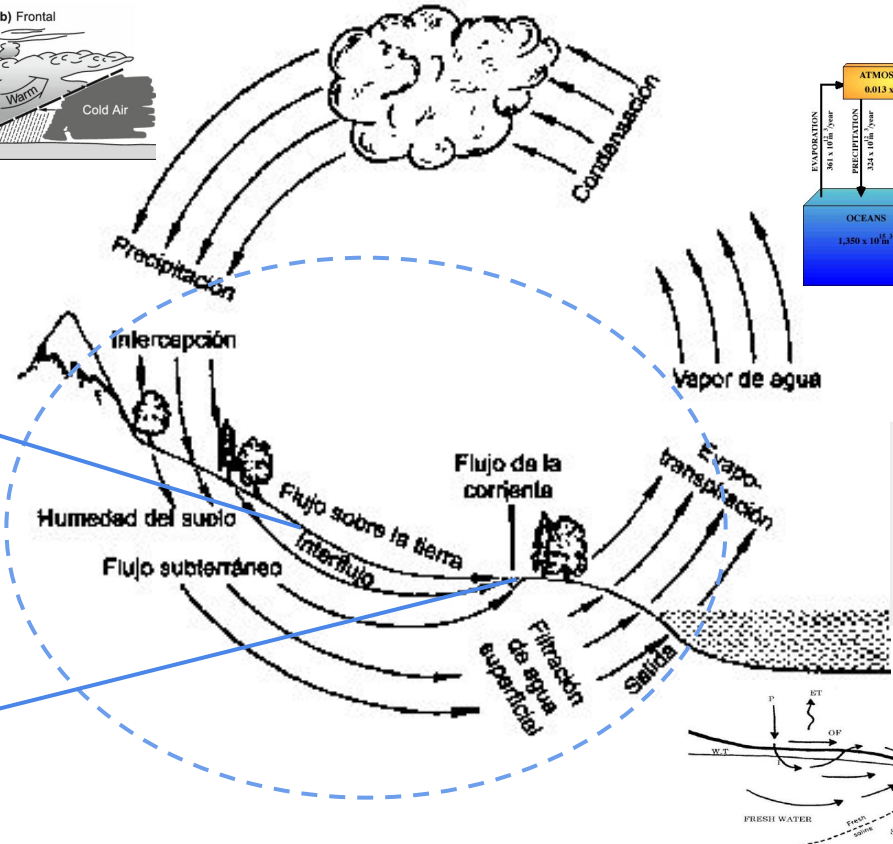
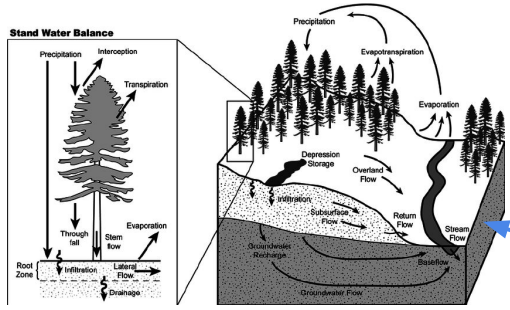
advección
condensación
precipitación



Fase Terrestre

Agua líquida, hielo y nieve

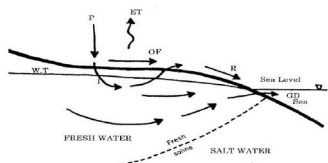
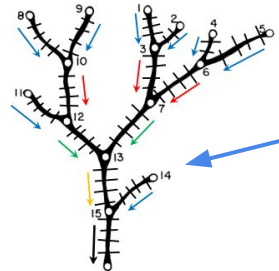
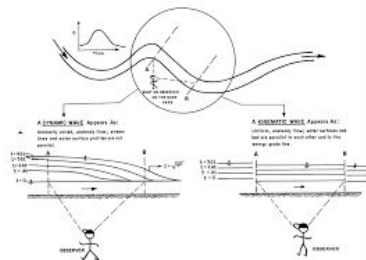
intercepción
evapotranspiración
infiltración
percolación
escorrentía
tránsito de caudal



Fase Oceánica

Agua líquida y hielo

descarga de ríos
descarga de Acuíferos
evaporación



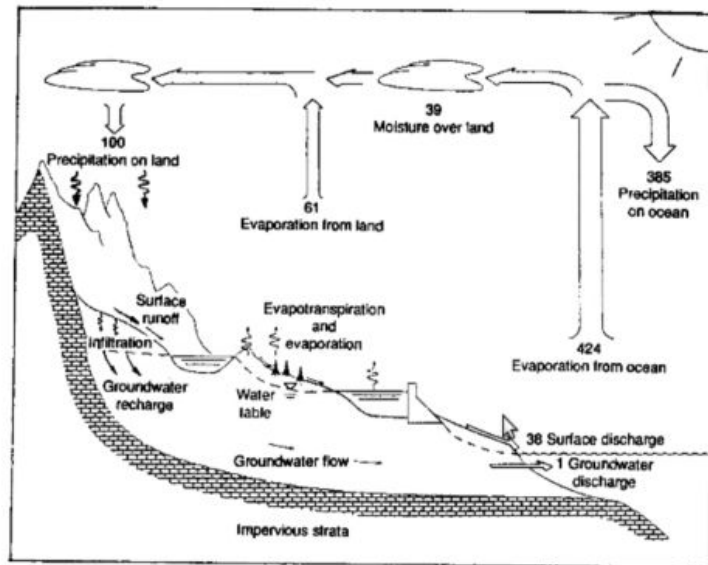
Sistemas Hidrológicos. Enfoque sistémico y dinámico. Flujos superficiales y flujos horizontales

Flujo horizontal o superficial: **paralelo a una superficie o plano de escurrimiento** (escorrentía superficial, escorrentía subterránea, flujo en redes de drenaje)

Flujo vertical: en **dirección de la fuerza de la gravedad** (precipitación, infiltración, percolación, evaporación, transpiración)

Conceptos Básicos

Sistema Hidrológico.



Maidment, D. R. (1980): Handbook of Hydrology. McGraw Hill, EEUU

ENFOQUE SISTÉMICO DEL CICLO HIDROLÓGICO.

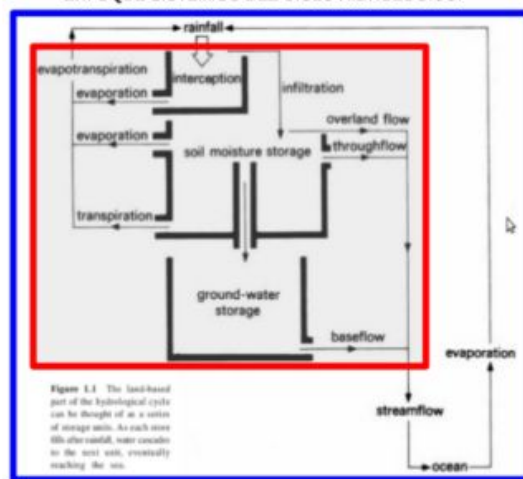


Figure 1.4 The land-based part of the hydrological cycle can be thought of as a series of storage units. As each store fills after rainfall, water cascades to the next unit, eventually reaching the sea.

SISTEMA CERRADO GLOBAL (HIOSFERA)
SISTEMA ABIERTO CONTINENTAL

Figura extraída de Knapp, B. (1979): Elements of Geographical Hydrology. Unwin Hyman, Inglaterra.
Las referencias son propias.

DEFINICIONES E IMPLICANCIAS

•Conjunto de partes (componentes) conectadas entre sí (mediante flujos), que forman un todo (Chow et al., 1994).

•Un sistema es cerrado si no recibe o produce flujos que atraviesen su frontera.

•Por el contrario, un sistema es abierto si recibe o produce flujos que atraviesen su frontera.

•Un sistema es una unidad espacialmente agregada.

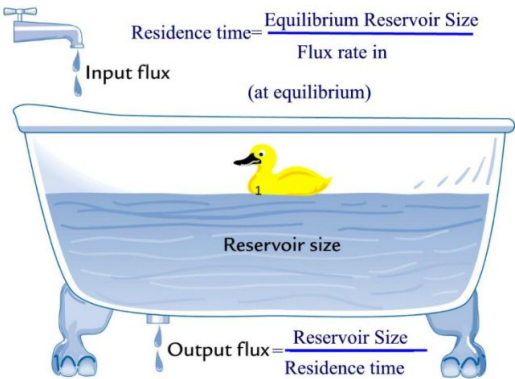
•Cada componente posee una variable o vector de estado que la caracteriza en un instante específico (p.e: almacenamiento) y dado un conjunto de flujos de entrada, los procesa y produce flujos de salida que conforman la entrada a otras componentes.

•Por tanto, cada componente puede ser estudiada también como un sistema.

(*) rutas de flujos, almacenamientos y tiempos de residencia, coeficientes de reparto y tiempos de traslado/respuesta

Sistemas Hidrológicos. Enfoque sistémico y dinámico. Tipo de Almacenamientos (retención, detención), tiempo de residencia, tiempo de respuesta y rutas de flujos

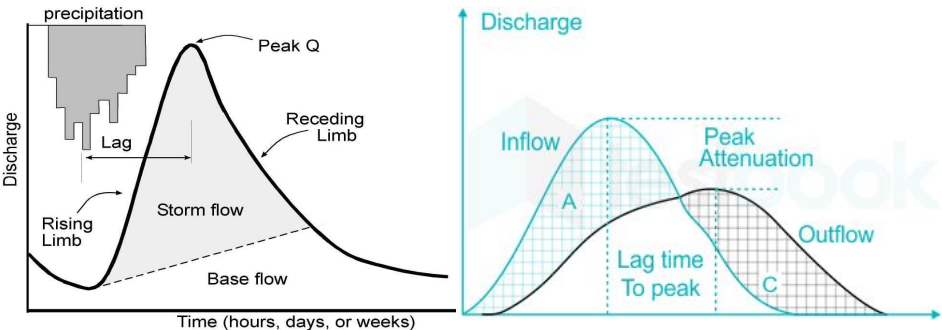
Tiempo de Residencia



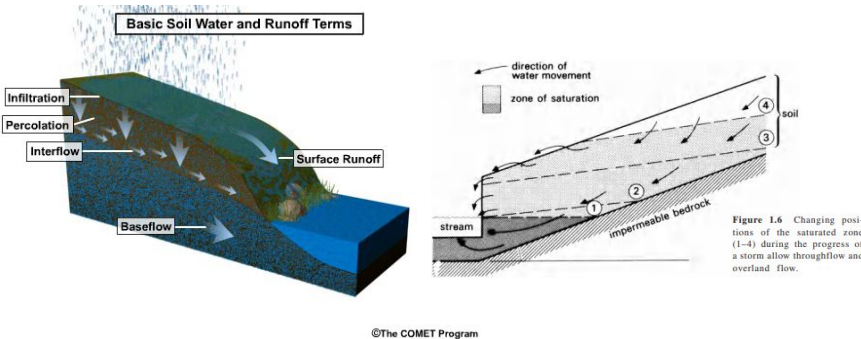
Almacenamientos (capacidad de carga)



Tiempo de Respuesta (Proceso PQ, Tránsito de hidrogramas)



Rutas de flujos

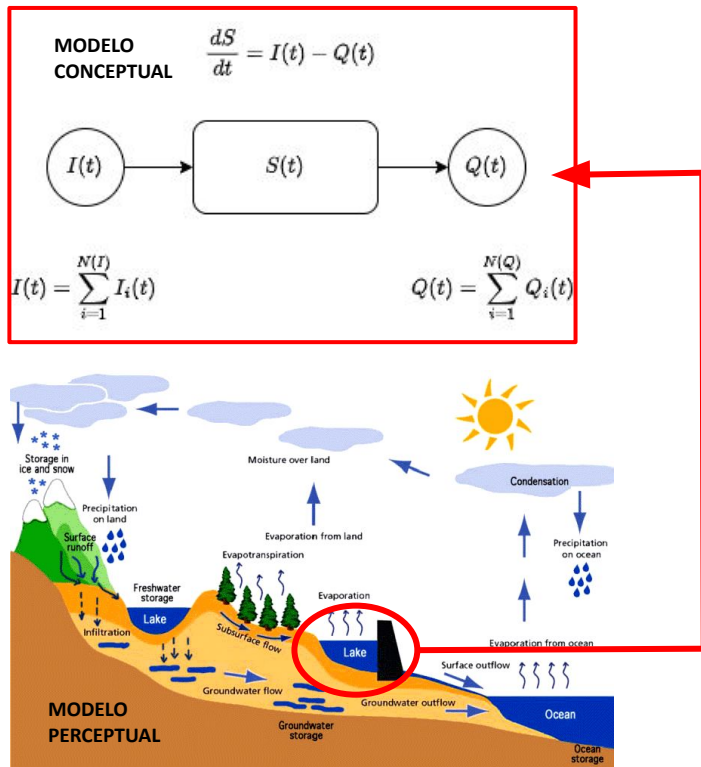


Sistemas Hidrológicos. Componentes del ciclo hidrológico y desarrollo de modelos conceptuales

Enfoque de reservorios (dinámico)

- Las distintas **componentes** del ciclo **hidrológico** constituyen **medios** con una **función hidrológica específica** - (e.g. vegetación, superficie, suelo/subsuelo, lagos, lagunas y embalses, canales y tramos fluviales - retención/detención, producción de excedente hídrico o traslado de escorrentía -) que **almacenan e intercambian agua a través de flujos por su frontera**. Por tanto, bien pueden conceptualizarse como **reservorios**, volúmenes de control que **reciben aportes y producen descargas de agua a través de su frontera**.
- Ciertamente, esta **abstracción** constituye la **unidad mínima de agregación** para cualquier aproximación conceptual hidrológica. Así, **un sistema hidrológico podrá representarse mediante un único reservorio** (e.g. almacenamiento de agua de tensión en el suelo) o **mediante combinación de distintos tipos de reservorios** (e.g. almacenamiento en perfil de suelo y subsuelo y en la red de desagüe/cuerpos superficiales), **de acuerdo a los fines del análisis hidrológico y el nivel de agregación adoptado**.
- El **volumen almacenado** $S(t)$ en un **reservorio**, para un instante específico t , es una **variable de estado** del reservorio.
- El **estado** de un reservorio se **modifica en acuerdo a las tasas instantáneas de los flujos de ingreso** $I(t)$ y **egreso** $Q(t)$ a través de su frontera (agregados), puesto que la variación instantánea del almacenamiento deberá satisfacer la **ecuación de conservación del volumen**.

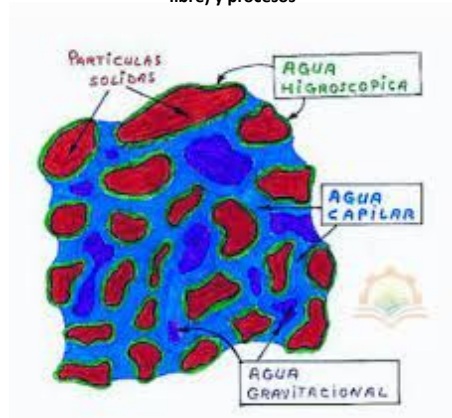
Sistema Hidrológico Ecuación de Conservación del Volumen



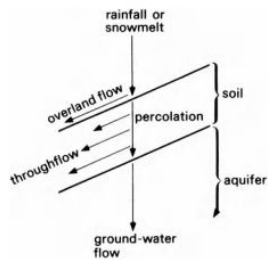
Las distintas componentes del ciclo hidrológico se abordan como reservorios, cuyo almacenamiento (estado) puede modificarse en función de los flujos a través de su frontera

Ejemplo desarrollo de modelo dinámico conceptual de un sistema: ecuación de conservación agua de tensión en zona no saturada

Tipos de almacenamiento en perfil de suelo
(agua higroscópica, agua de tensión, agua libre) y procesos

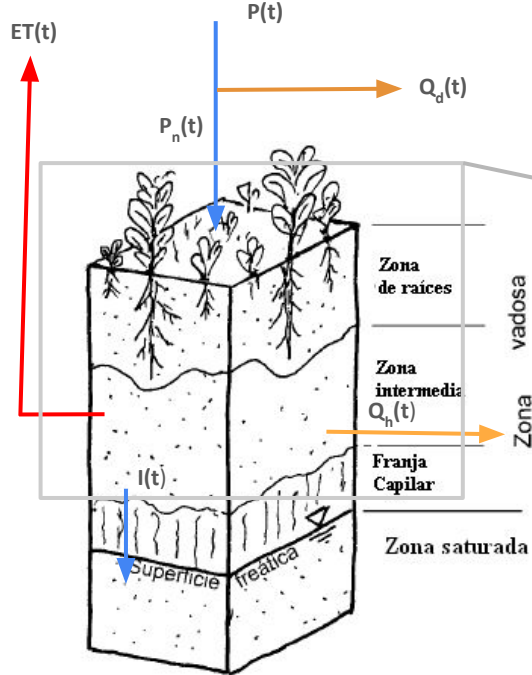


¿Qué tipo de almacenamiento? → Reservorios (medios)



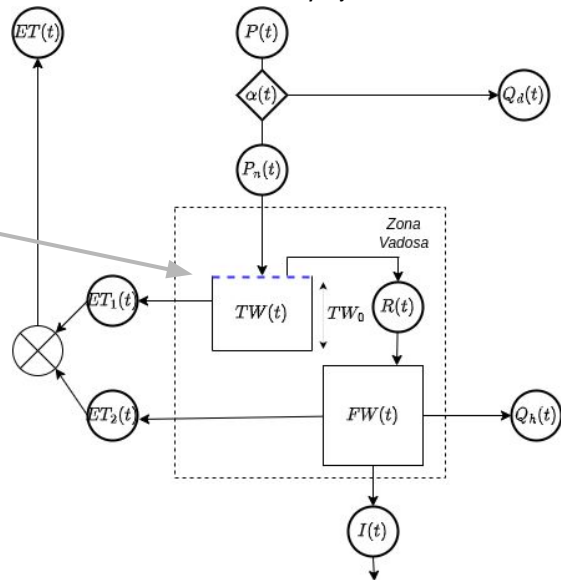
¿Qué tipo de procesos? → flujos y rutas

Modelo gráfico del perfil de suelo (ZNS/ZS)
Flujos de frontera ZNS



¿Dónde? → Dominio de agregación espacial
(sistema)

Modelo hidrológico conceptual de
almacenamientos y flujo en ZNS



¿Cómo? → Estructura de procesos internos

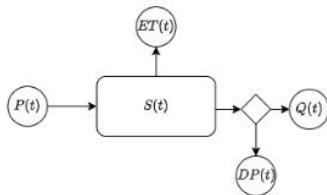
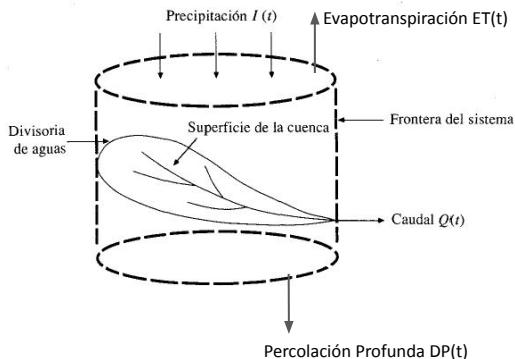
Ecuación de conservación para almacenamiento de agua de tensión

$$\frac{dT W}{d t}=P_n(t)-E T_1(t)-R(t)$$

Tipos de sistemas hidrológicos. Transferencia horizontal

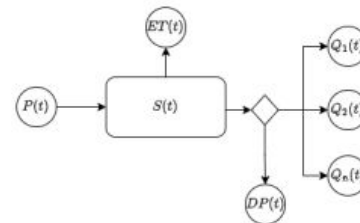
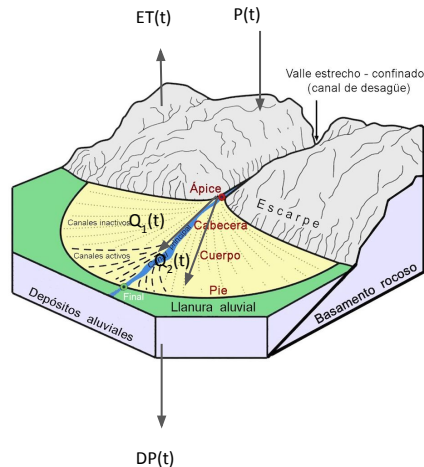
- Transferencia concentrada (convergente)

La transferencia horizontal de la energía que ingresa al sistema es significativa y se concentra en un único punto de salida: "toda el agua que el sistema no puede retener ni perder por acción de los flujos verticales, fluye horizontalmente hacia un punto común de salida en la frontera del sistema". La cuenca vertiente y las redes de desagüe jerarquizadas son un ejemplo clásico de sistema de transferencia concentrada.



- Transferencia distributiva (divergente)

La transferencia horizontal de la energía que ingresa al sistema es significativa y se distribuye en un conjunto de puntos de salida, pudiendo variar el prorratio temporal: "toda el agua que el sistema no pueda retener ni perder por acción de los flujos verticales fluye horizontalmente hacia distintos puntos de salida en la frontera del sistema, pudiendo variar la distribución en el tiempo". La transferencia distributiva es común en sistemas que incluyan abanicos aluviales o domos, puesto que presentan redes de desagüe distributivas. Así también, sistemas de llanura con frecuentes trasvases o sistemas hídricos con múltiples capturas para desvío y aprovechamiento del recurso en otros sistemas.



Tipos de sistemas hidrológicos. Amortiguación

- Disipativos (amortiguación)

La transferencia horizontal de energía es poco significativa o nula, disipándose por efecto de la amortiguación en los almacenamientos que componen el sistema. Los flujos verticales y la variación del almacenamiento predominan sobre los flujos horizontales, que además pueden presentar múltiples puntos de salida en la frontera del sistema. Los sistemas endorreicos o aquellos sistemas con redes pobremente integradas/desarrolladas son ejemplos de este tipo de sistemas.

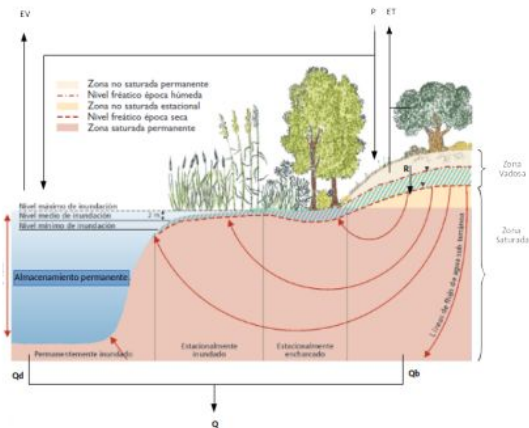


Figura 1: Conceptualización de la estructura y flujos presentes en un sistema palustre o fluvio-palustre de llanura húmeda o subhúmeda. P: Precipitación media areal. EV: Evaporación desde espejos de agua. ET: Evapotranspiración. R: Recarga de agua libre o gravítica. Q_d: Excedente hídrico lagunar, Q_b: Excedente hídrico agua libre y Q: Excedente hídrico total. Figura adaptada de Revista Aula Verde (2004)

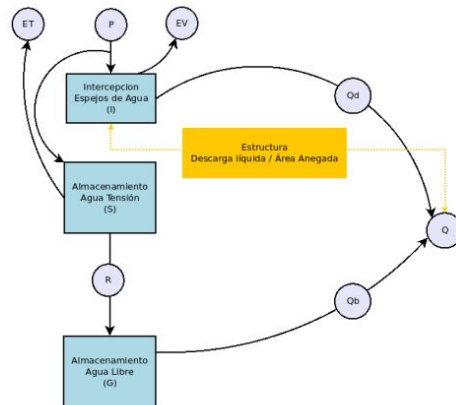
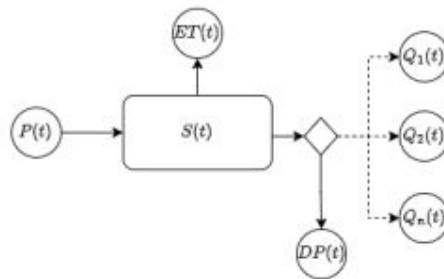


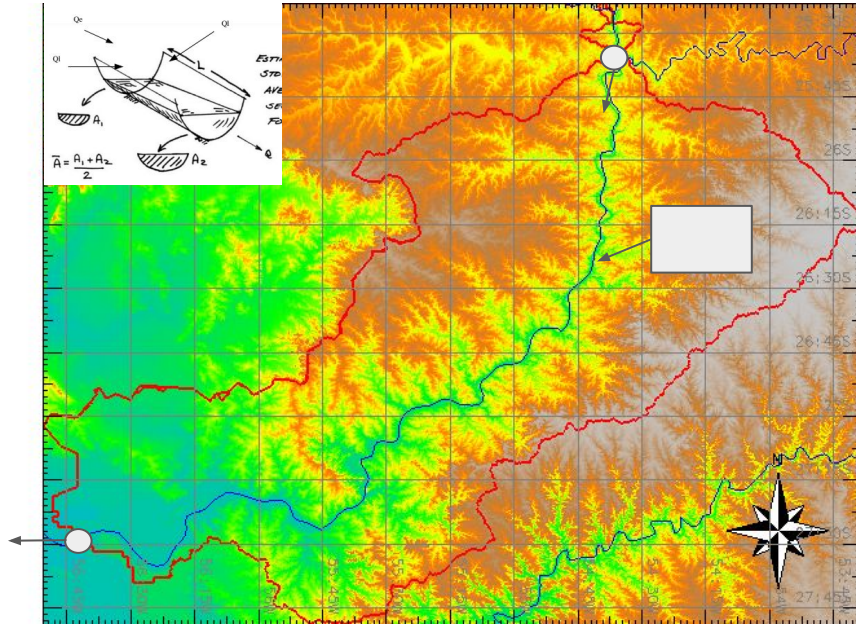
Figura 2: Estructura, flujos y relaciones del sistema teórico adoptado para simulación de área anegada en sistemas palustres ChacoPampeanos

Ejemplo desarrollo de modelo dinámico conceptual de un sistema: tramo de río (con aporte en ruta)

Procesos y Componentes

aporte borde superior, aporte en ruta y descarga borde inferior

Almacenamiento en tramo



Modelo Conceptual

I. Esquema Topológico

II. Ecuación de Conservación

II. Fase terrestre del ciclo hidrológico: El Modelo de Cuenca Vertiente

Movimiento del agua líquida con superficie libre (presión atmosférica)

Aplicación de la ecuación de conservación de energía en régimen permanente [dS/dt=0] (Bernoulli)

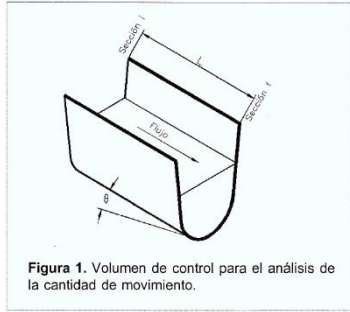
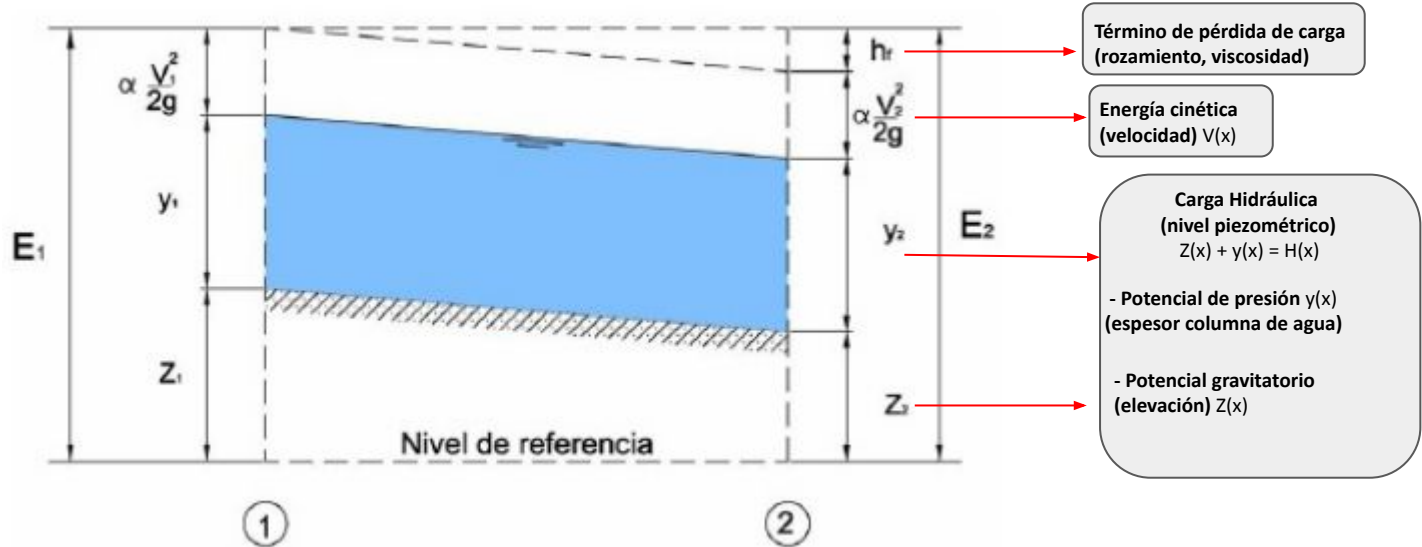


Figura 1. Volumen de control para el análisis de la cantidad de movimiento.



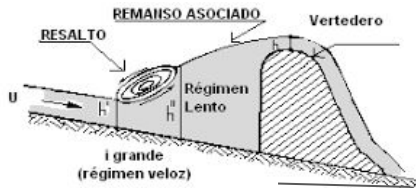
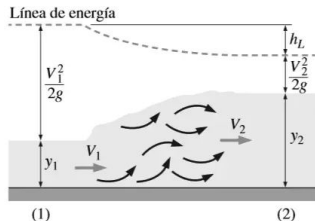
$$E_1 = E_2 + h_f$$

$$z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_f$$

El diagrama de la derecha muestra un **perfil longitudinal** correspondiente a **condición de régimen permanente y uniforme** ($y_1=y_2, v_1=v_2$). Para este caso teórico resulta evidente que $h_f = z_1 - z_2$, el desnivel del terreno. Así, en este caso teórico el incremental de energía cinética debido a la diferencia de potencial gravitatorio (única componente que varía en el potencial hidráulico) debe compensarse con las pérdidas de carga por rozamiento (con el recipiente y entre partículas del fluido).

Movimiento del agua líquida con superficie libre (presión atmosférica)

Tipo de régimen/flujo. Ecuaciones hidrodinámicas y simplificaciones adoptadas



MOVIMIENTO DEL AGUA . FUNDAMENTO FÍSICO Y CLASIFICACIÓN FLUJOS.

MOVIMIENTO DEL AGUA

El agua se moverá siguiendo la línea de pérdida de energía, desde aquellos puntos con mayor energía total (componente gravimétrica, componente de presión hidrostática y componente de velocidad) hacia aquellos de menor.

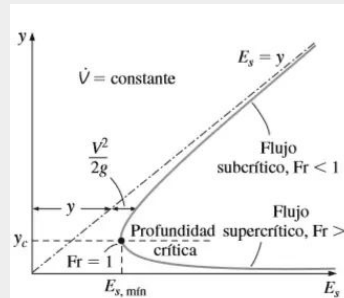
En principio, puede asumirse que la 'pérdida de carga' (energía) se debe al rozamiento con la superficie del terreno (i.e. perímetro mojado) y la viscosidad del fluido. En un tramo de características morfológicas y de textura semejante esta puede asumirse proporcional a su longitud.

En perfiles como el remanso hidráulico (backwater), la presión se incrementa aguas abajo (la profundidad), a expensas de una disminución en la velocidad a fin de vencer el obstáculo que impone control.

CLASIFICACIÓN DE LOS FLUJOS DE ACUERDO A SU VARIACIÓN EN TIEMPO Y ESPACIO

CRITERIO	$\delta Y/\delta x = \text{cte}$	$\delta Y/\delta x = g(x)$
$\delta Y/\delta t = \text{cte}$	Permanente y Uniforme	Permanente y no uniforme
$\delta Y/\delta t = f(t)$	No permanente y Uniforme	No permanente y no uniforme

fuerza inercial/fuerza gravedad : Número de Froude (flujo subcrítico/crítico/supercrítico)



$$Fr = \frac{V}{c_0}$$

$$c_0 = \sqrt{gL_c}$$

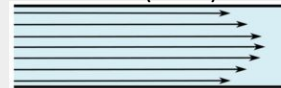
$$L_c = A/T$$

$$\text{energía específica} = v^2/2g + y$$

fuerza inercial/fuerza viscosa : Número de Reynolds (flujo laminar/turbulento)

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu}$$

Re < 2300 (laminar)



Re > 4000 (turbulento)



Ecuaciones hidrodinámicas (Saint-Venant 1D)

$$1) \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$2) \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0$$

términos inerciales

(aceleración local/conectiva)

presión

(tirante)

gravedad/fricción

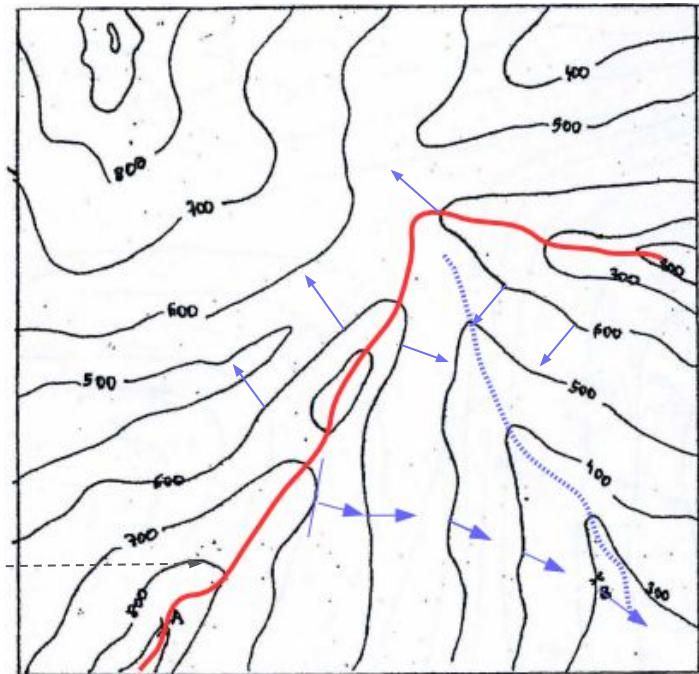
(potencial gravitatorio/rozamiento)

Dirección de flujo y líneas de corriente

Dirección del flujo (método gráfico)

CASO GENERAL

La **dirección de flujo** en un **campo escalar** $f(x, y, z)$ (energía mecánica) está definida por el **vector gradiente** $\nabla f(x, y, z)$. Este vector indica la dirección de **mayor tasa de cambio** (módulo del vector). En una representación del campo mediante **isolíneas** (líneas que unen puntos con igual energía), esta **dirección** es **perpendicular a las isolíneas**. Asimismo, el **sentido del flujo** es desde los sitios con **mayor energía** a los de **menor energía** (propagación de materia y energía). Finalmente, la **línea de corriente desde un punto** específico queda definida por la **sucesión en las direcciones de flujo** en su trayectoria hacia un **nivel de base** (mínimo local o global)



Mapa de curvas de nivel (isohipsas) mostrando patrones divergentes (divisoria de aguas, en rojo) y convergentes (vaguadas, en azul línea intermitente) de líneas de corriente (direcciones de flujo). Elevación en metros sobre nivel de referencia (nivel medio del mar)

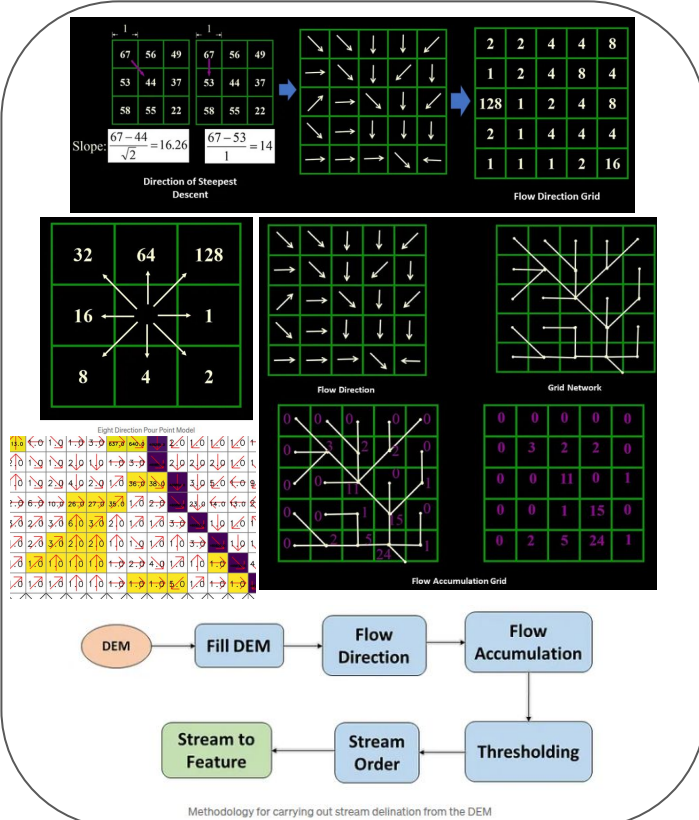
CASO SUPERFICIAL (MOVIMIENTO GRAVITATORIO)

En **caso** que la **variaciones de presión o velocidad sean poco significativas en relación a las variaciones topográficas**, los cambios en los términos de presión y cinemático serán una proporción significativamente baja de la variación en la energía mecánica y el **movimiento** estará **controlado** por la diferencia de la energía potencial gravitatoria y, de ahí, por la **diferencia de altura topográfica**. Luego, **en este caso la dirección del gradiente topográfico indicará la dirección del flujo**.

Dirección de flujo superficial (movimiento gravitatorio)

Dirección de flujo, líneas de corriente y red de drenaje superficial: movimiento gravitatorio (métodos computacionales MDE)

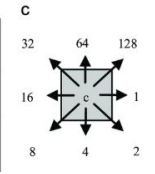
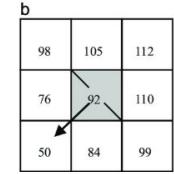
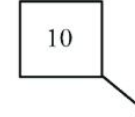
Método D8 (SFD)



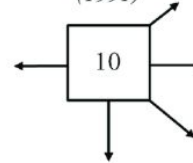
DEM surface elevation

12	11	9
9	10	8
11	7	5

8-directions (D8) (1984/1991)

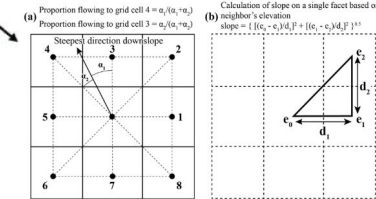
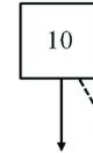


MFD (Multiple Flow Directions) (1991)



$$d_i = \frac{(\tan \beta_i)^{f(e)} L_i}{\sum_{j=1}^n (\tan \beta_j)^{f(e)} L_j}$$

D-infinity (D ∞) (1997)



Flow direction using the D-infinity flow model (redrawn from [21]): (a) shows proportion of water flowing into two adjacent cells, and (b) shows calculation of slope on a single facet.

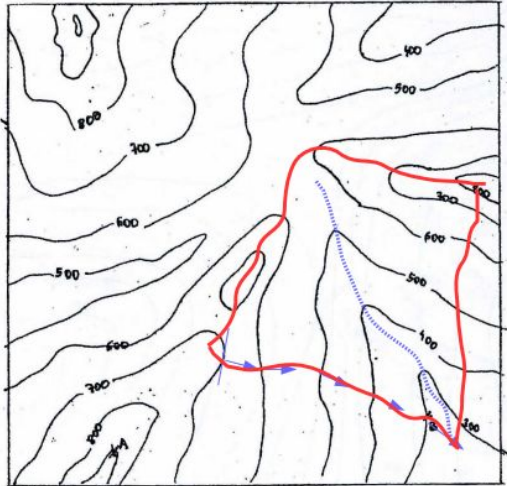
Diagrams of flow direction from an example elevation dataset using the 8 directions, multiple flow directions, and the d-infinity algorithms. Solid arrows depict the flow direction calculated from the center cell using the elevation surface shown. The dashed arrow (D-infinity) represents the final flow direction as the steepest downward slope on a planar triangular facet created between the two lowest neighboring cells and is represented as a continuous (floating point) angle. (adapted from Mouton, 2005)

El modelo de cuenca vertiente

Concepto de cuenca vertiente (cuenca hidrográfica)

RELACIÓN PUNTO - ÁREA DE MOVIMIENTO GRAVITATORIO

A partir de un punto sobre una red de drenaje superficial, la **cuenca vertiente** es el **área conformada por todas las líneas de corriente que drenan hacia el punto**, siguiendo la **dirección del gradiente topográfico**.



Ejemplo de delimitación de una cuenca vertiente a partir de un mapa de curvas de nivel (método gráfico: primeramente identificando grandes divisorias y vaguadas principales y luego evaluando las líneas de corriente desde aguas abajo hacia aguas arriba, iniciando en la frontera en el punto A).

Principales elementos de una cuenca hidrográfica



SUPUESTOS E IMPLICACIONES

- **MOVIMIENTO GRAVITATORIO (DOMINIO)**
- **SUPERFICIE APOORTE ESTACIONARIA (CONSECUENCIA OBSERVACIONAL)**

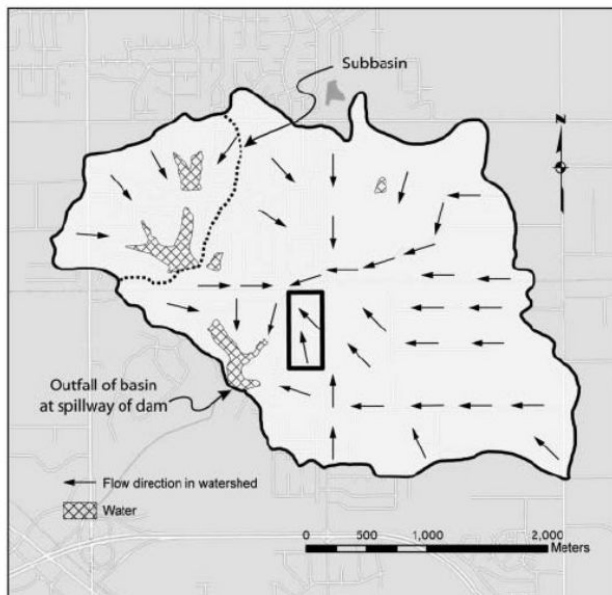
DOMINIO DE APLICACIÓN COMO SISTEMA HIDROLÓGICO (MODELO DE CUENCA HIDROGRÁFICA)

- **TRANSFERENCIA HORIZONTAL SIGNIFICATIVA**
- **TOPOGRAFÍA SUBSUPERFICIAL/SUBTERRÁNEA PARALELA, SEMEJANTE O CONVERGENTE**

Concepto de cuenca vertiente (cuenca hidrográfica)

Cuenca Vertiente. Relación Punto-Área. Dirección de flujo c/ dominio gravitatorio

Si se asume que el **movimiento del agua** es fundamentalmente **gravitatorio**, Definido un punto X_i sobre la red de drenaje, la cuenca vertiente C es la **superficie conformada por todas las líneas de corriente** (gradiente topográfico) que **confluyen en este**



Ejemplo Delimitación de cuenca vertiente (método gráfico)

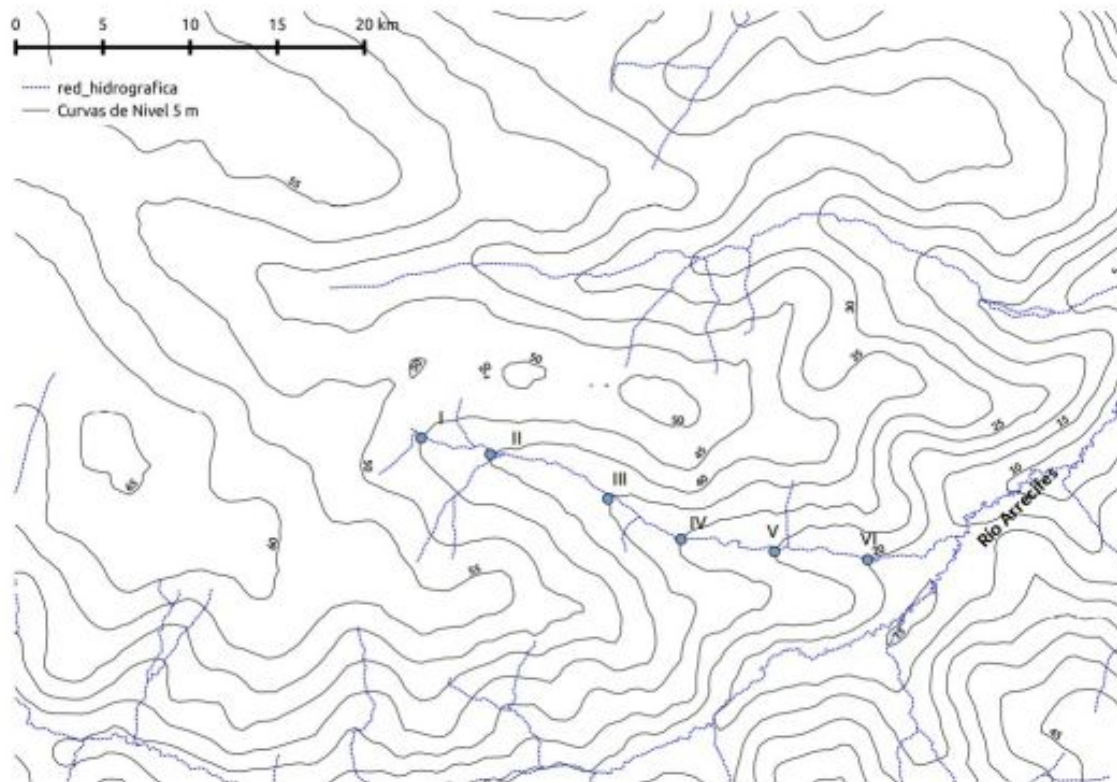
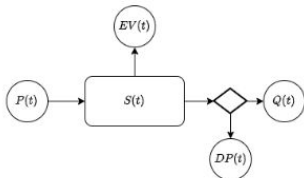
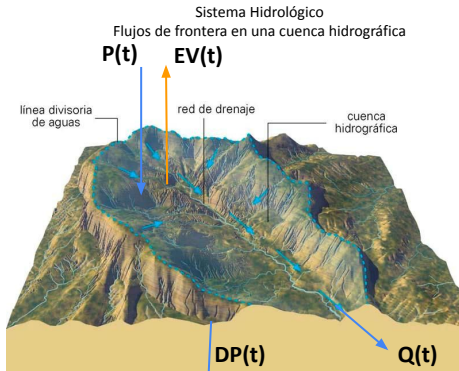


Figura 1: Curvas de nivel con equidistancia de 5 metros, obtenidas para el área de estudio mediante procesamiento de información SRTM (NASA, EEUU). El sistema estudiado es aquel que discurre entre los puntos I a VI, alimentando por margen izquierda al río Arrecifes

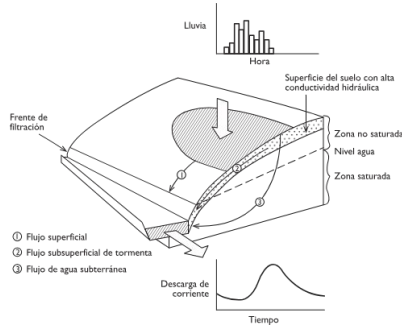
El modelo de cuenca vertiente: dominio de aplicación (hipótesis) y limitaciones

Sistema Hidrológico (condiciones de validez en aplicación)

- Unidades de respuesta hidrológica en el proceso de transformación de precipitación (área) - caudal (punto) [P-Q]
- Transferencia concentrada con pérdidas verticales (evapotranspiración/recarga profunda)
- Superficie de aporte freático equivalente a superficie de cuenca vertiente

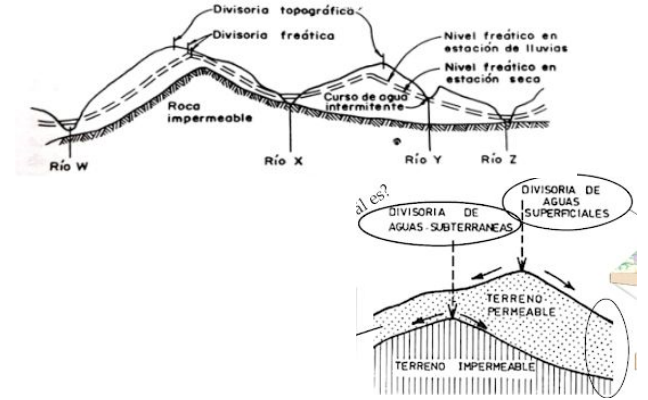


Componentes del proceso P-Q. Corte transversal vertiente-curso en una cuenca hidrográfica

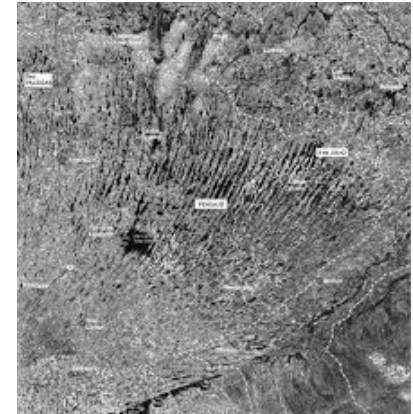


$$\frac{dS}{dt} = P(t) - (EV(t) + Q(t) + DP(t))$$

limitantes posibles (divisorias superficial/subterránea)



limitantes posibles (topografía llana → sistemas disipativos)

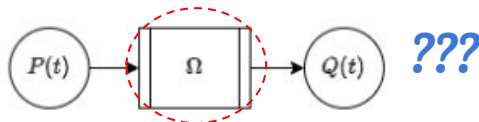


III. Hidrología de cuencas: Proceso de Transformación de Precipitación en Escorrentía/Caudal

Dominio del problema. Modelo conceptual/agregado del sistema hidrológico (procesos y flujos)

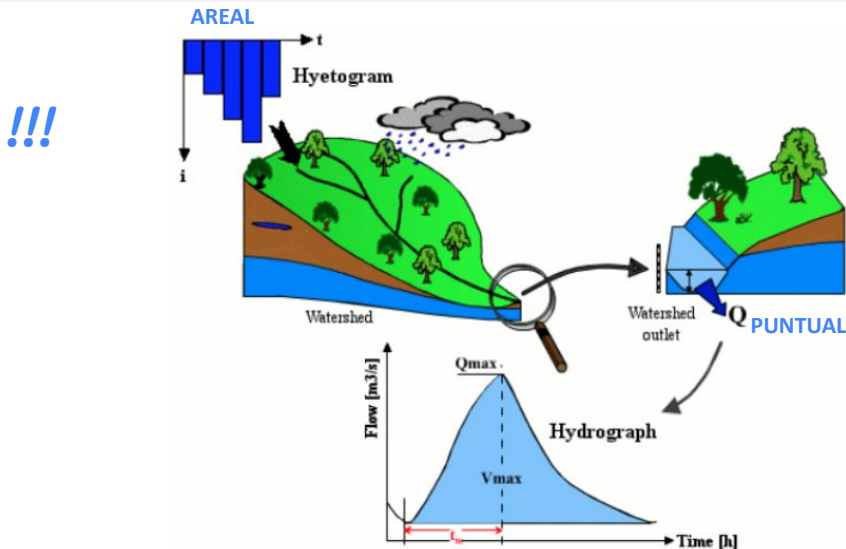
DOMINIO DEL PROBLEMA

Estimación del caudal en un punto de una red de desagüe



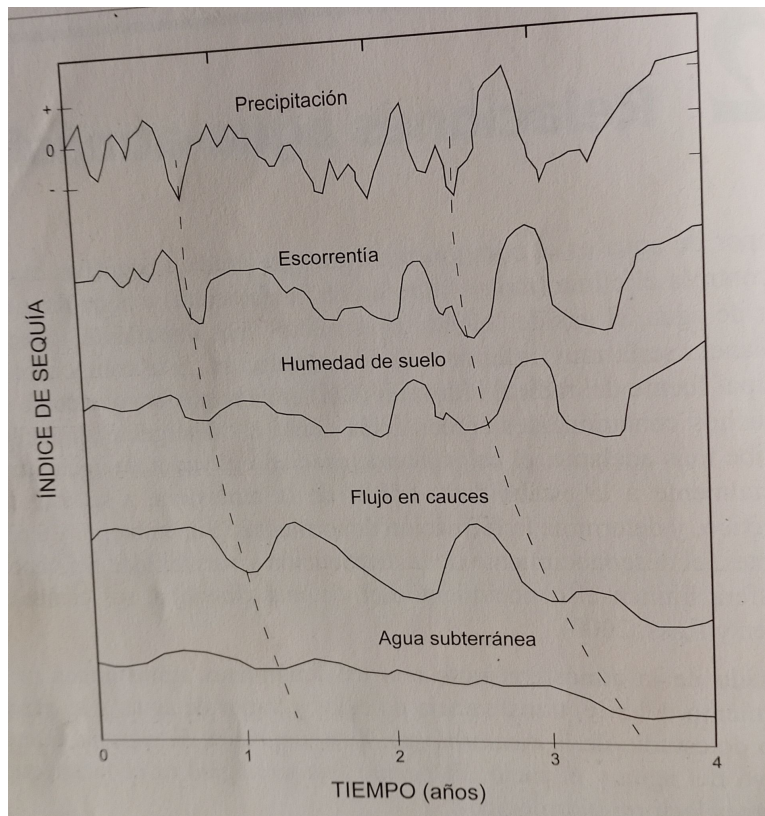
Problema Simplificado (visión agregada)

Para una cuenca se conoce un **hietograma de un conjunto de eventos precipitantes** (hietograma de entrada). A partir de las **características físicas de la cuenca** (e.g cobertura de suelo, tipo de suelo, pendiente topográfica - interfluvios y valle-, geometría de cauces) o de **observaciones de caudal**, pretende inferirse un **hidrograma de respuesta**.

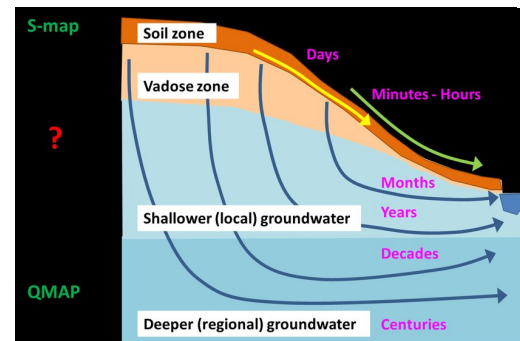


PRINCIPALES ASUNCIONES

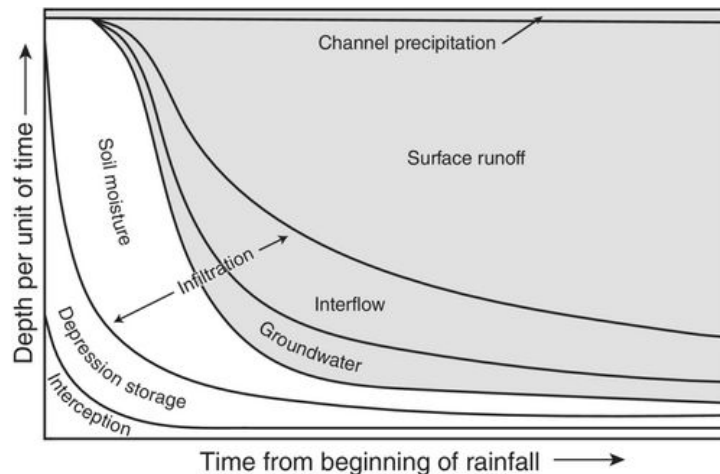
- **H1:** TRANSFERENCIA HORIZONTAL CONCENTRADA (c/ PÉRDIDAS VERTICALES) [FLUJO GRAVITATORIO]
- **H2:** UNIFORMIDAD PMA/PARÁMETROS DE RESPUESTA HIDROLÓGICA VERTIENTES [AGREGACIÓN ESPACIAL/TEMPORAL]



Relación entre la precipitación y distintas componentes del ciclo hidrológico en una cuenca vertiente (Muñoz Carpena y Ritter Rodríguez, 2005. *Hidrología Agroforestal*)



Rutas de flujo, almacenamientos y tiempos de residencia, en un perfil de vertiente a escala de cuenca (Stenger, et al. 2019)



Distribución de la Precipitación entre las distintas rutas de flujo y los principales almacenamientos de una cuenca vertiente (Linsley, 1949 - *el ciclo de la escorrentía* -)

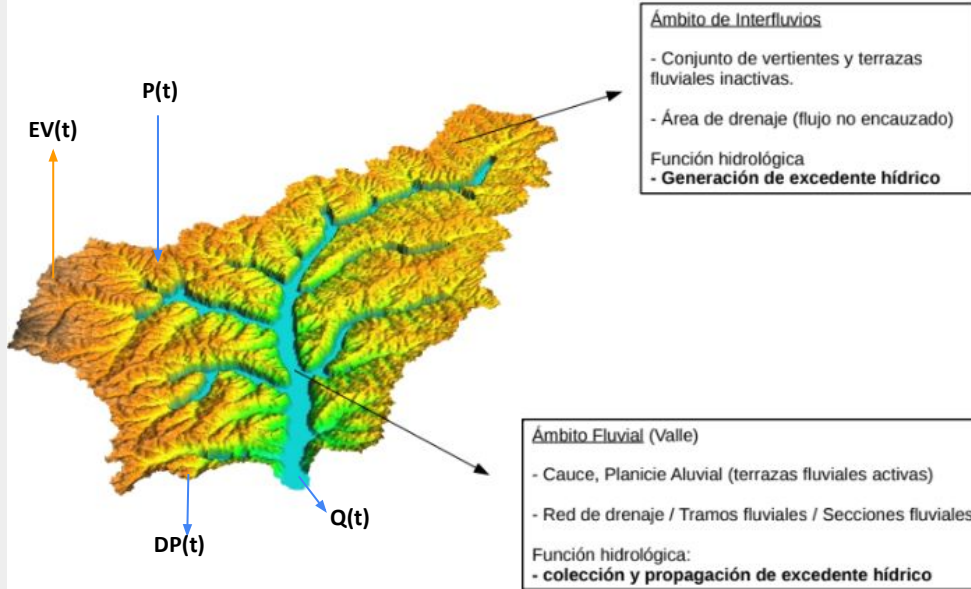
Elementos conceptuales de análisis hidrológico para la práctica operativa de pronóstico

Transformación de Precipitación en Escorrentía (PQ). Dominios espaciales y Función hidrológica. Linealidad/Validez

EVIDENCIA EMPÍRICA

Transferencia Concentrada: P (PMA) → Q (Puntual)

PRINCIPALES COMPONENTES FISIAGRÁFICAS DE UNA CUENCA VERTIENTE Identificación de grandes elementos geográficos funcionales (zonificación)

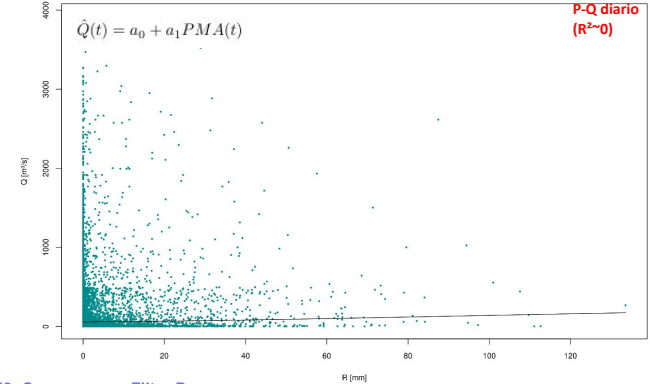


Dominios espaciales de los distintos procesos hidrológicos involucrados en la transformación PQ, en un modelo de cuenca vertiente: (a) interfluvios [producción] y (b) red de desagüe [distribución]. Los flujos de frontera representan valores medios areales (agregados espacialmente, particularmente los intercambios con la atmósfera y el medio subterráneo)

H1: Naive (transferencia directa, modelo estático s/ memoria)
 a_1 = Coef. Descarga cte
 a_0 = pérdidas/aporte cte

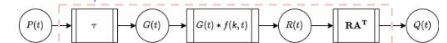


Relación PMA diaria - Q diario
Cuenca del río Gualeguay en Rosario del Tala

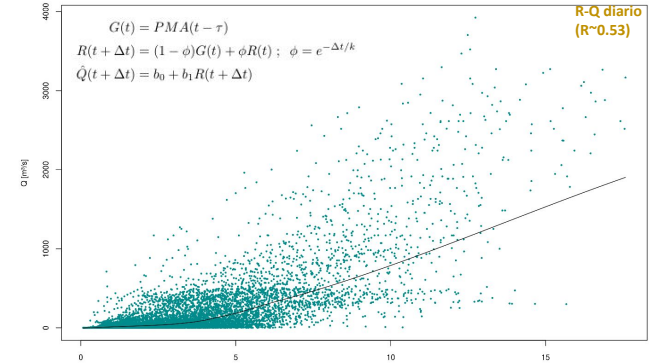


H2: Cuenca como Filtro P (modelo dinámico)

Tau (retardo) y k (residencia)
 b_1 = Coef. Descarga cte
 b_0 = pérdidas/aporte cte



Relación PMA diaria con retardo y filtro exponencial (R) - Q diario
Cuenca del río Gualeguay en Rosario del Tala

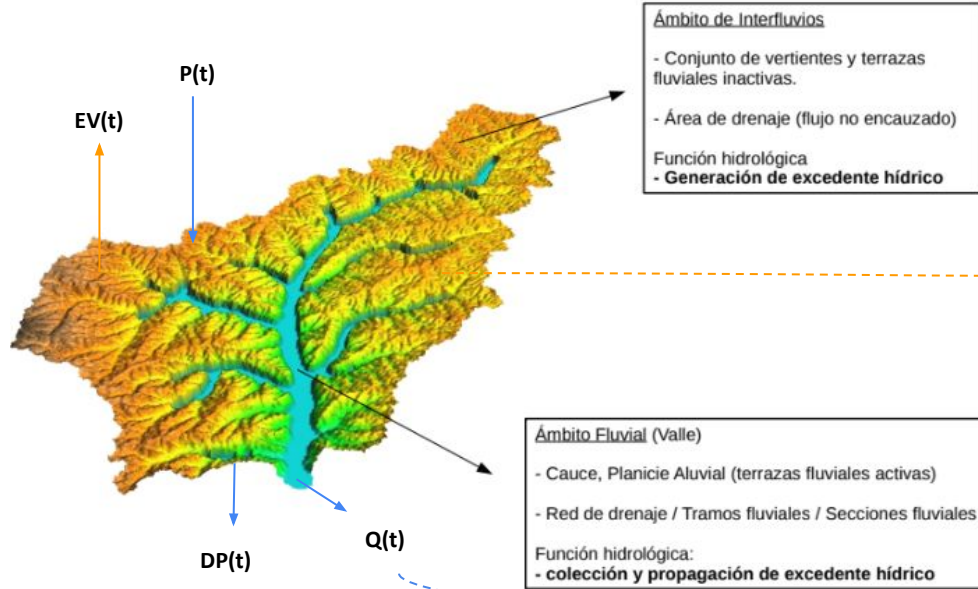


Elementos conceptuales de análisis hidrológico para la práctica operativa de pronóstico

Transformación de Precipitación en Escorrentía/Caudal (PQ). Dominios espaciales/Esquema simple de componentes y rutas de flujo

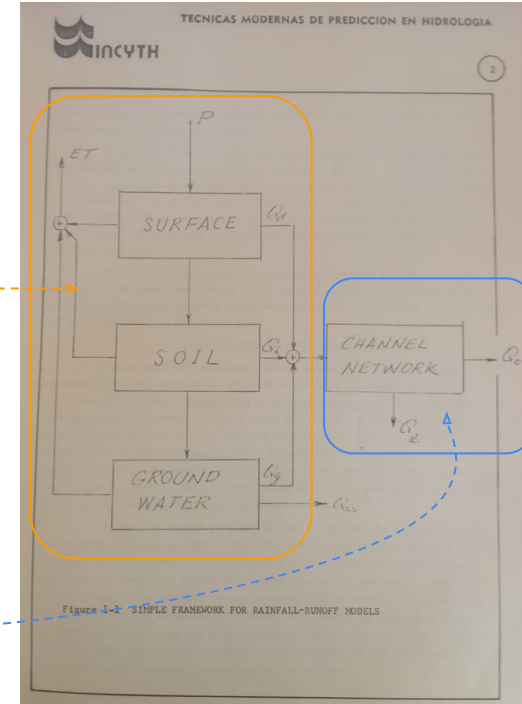
PRINCIPALES COMPONENTES FISIOGRAFICAS DE UNA CUENCA VERTIENTE

Identificación de grandes elementos geográficos funcionales (zonificación)



Dominios espaciales de los distintos procesos hidrológicos involucrados en la transformación PQ, en un modelo de cuenca vertiente: (a) interfluvios [producción] y (b) red de desagüe [distribución]

Esquema Topológico de Componentes en la Transformación de Precipitación en Escorrentía/Caudal en una cuenca vertiente (modelo agregado)



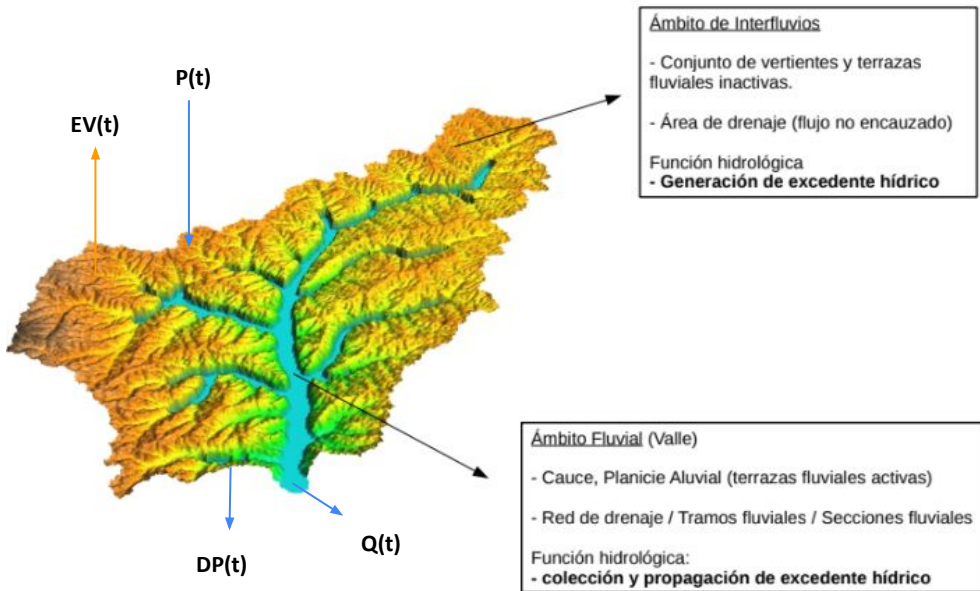
Esquema simple de Transformación PQ en un modelo de cuenca vertiente
Prof. John C. Schaake, 'Modelos Determinísticos LLuvia - Escorrentía'

Elementos conceptuales de análisis hidrológico para la práctica operativa de pronóstico

Transformación de Precipitación en Escorrentía/Caudal (PQ). Componentes de producción/distribución (elementos y procesos)

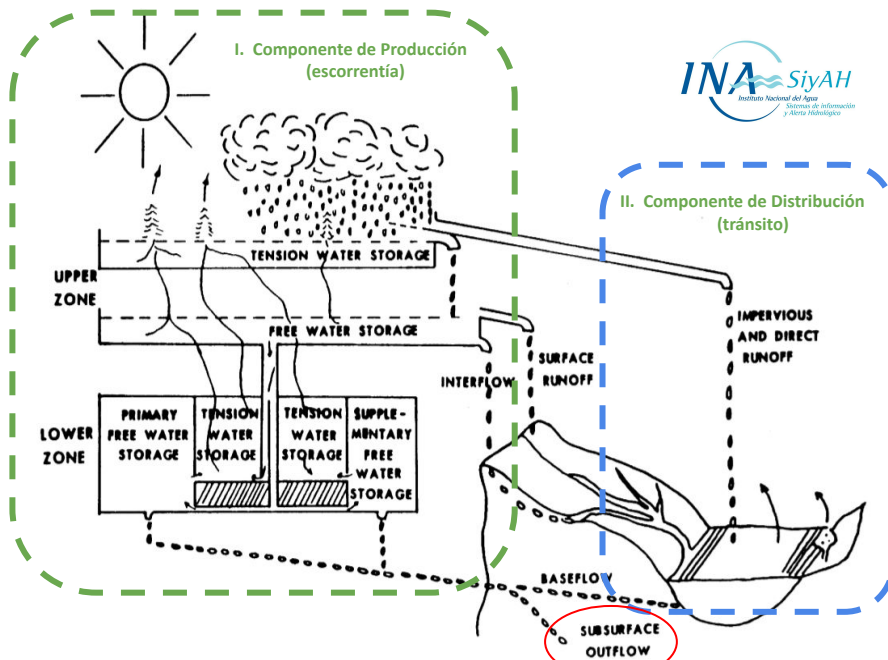
PRINCIPALES COMPONENTES FISIOGRAFICAS DE UNA CUENCA VERTIENTE

Identificación de grandes elementos geográficos funcionales (zonificación)



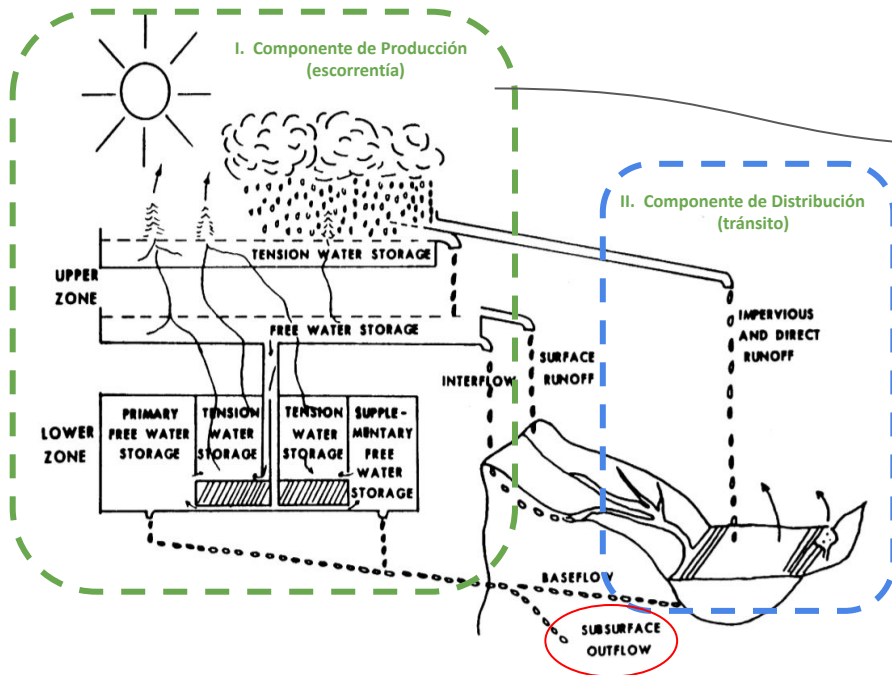
Dominios espaciales de los distintos procesos hidrológicos involucrados en la transformación PQ, en un modelo de cuenca vertiente: (a) interfluvios [producción] y (b) red de desagüe [distribución]

Modelo Perceptual, Esquema Topológico de Procesos Internos y Componentes en la Transformación de Precipitación en Escorrentía/Caudal en una cuenca vertiente (modelo agregado)



Transformación PQ en un modelo de cuenca vertiente: reservorios y procesos de componente de producción y componente de distribución (modelo Sacramento SMA). En rojo se señala el flujo de pérdidas horizontales por alimentación de acuífero profundo (reserva localizada por debajo del nivel de base local de la cuenca, correspondiente al punto de cierre)

Transformación de Precipitación en Escorrentía (PQ). Procesos de componente de producción (enfoque continuo)



Transformación PQ en un modelo de cuenca vertiente: reservorios y procesos de componente de producción y componente de distribución (modelo Sacramento SMA). En rojo se señala el flujo de pérdidas horizontales por alimentación de acuífero profundo (reserva localizada por debajo del nivel de base local de la cuenca, correspondiente al punto de cierre)

ENFOQUE CONTINUO DINÁMICA DE PROCESOS DE VERTIENTE DURANTE Y ENTRE EVENTOS PRECIPITANTES

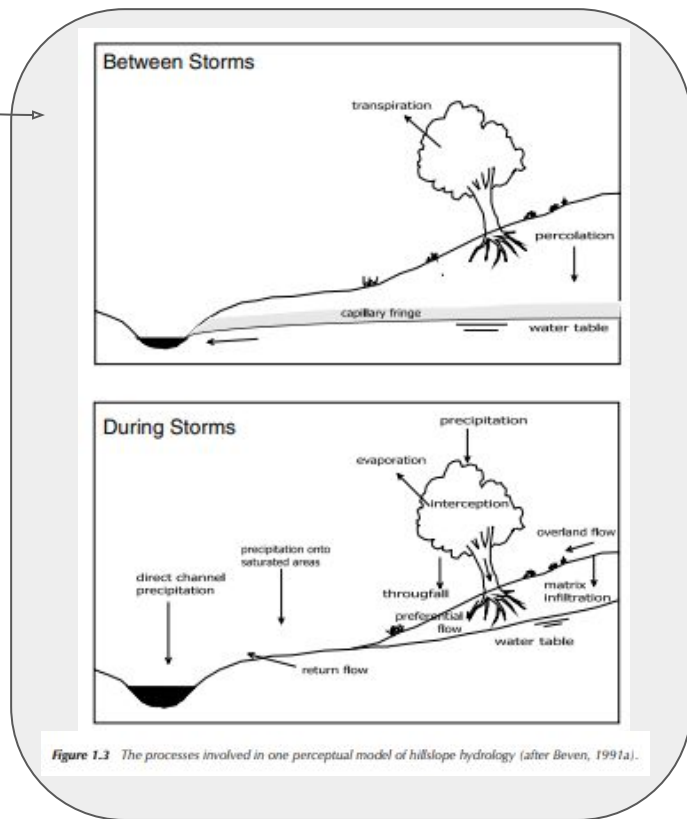
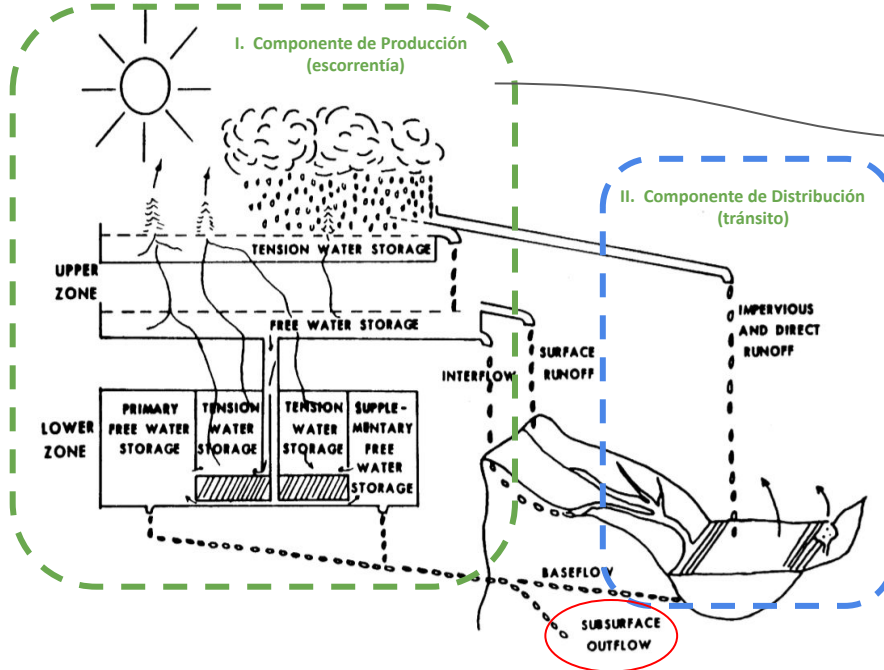


Figure 1.3 The processes involved in one perceptual model of hillslope hydrology (after Beven, 1991a).



Transformación PQ en un modelo de cuenca vertiente: reservorios y procesos de componente de producción y componente de distribución (modelo Sacramento SMA). En rojo se señala el flujo de pérdidas horizontales por alimentación de acuífero profundo (reserva localizada por debajo del nivel de base local de la cuenca, correspondiente al punto de cierre)

ENFOQUE CONTINUO DINÁMICA DE PROCESOS DE VERTIENTE: MECANISMOS DE GENERACIÓN DE ESCORRENTÍA

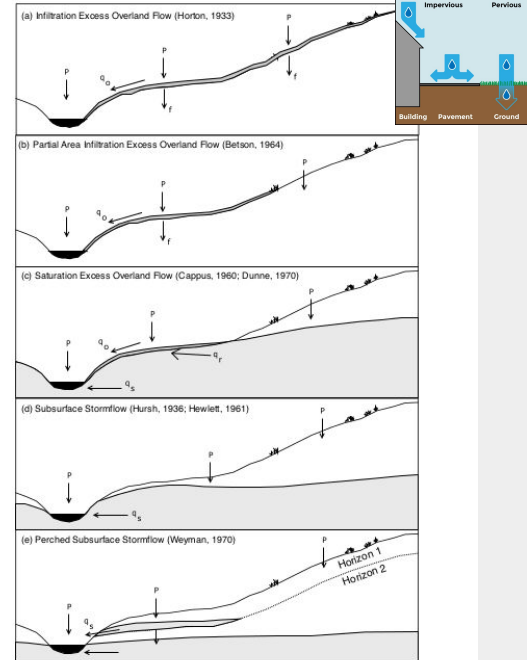


Figure 1.4 A classification of process mechanisms in the response of hillslopes to rainfall: (a) infiltration excess overland flow (Horton, 1933); (b) partial area infiltration excess overland flow (Betsun, 1964); (c) saturation excess overland flow (Cappus, 1960; Dunne and Black, 1970); (d) subsurface stormflow (Hush; Hewlett); (e) perched saturation and throughflow (Weyman, 1970).

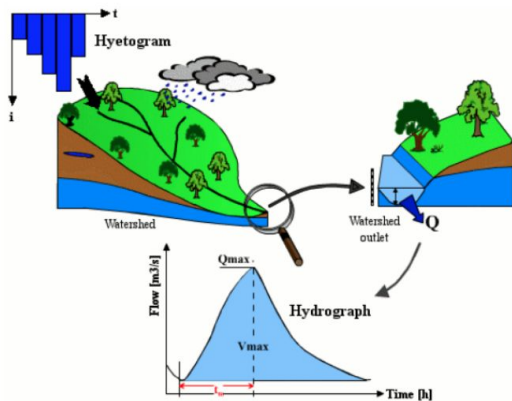
Transformación de Precipitación en Escorrentía/Caudal en una cuenca vertiente (PQ). Resumen del problema (enfoque dinámico)

DOMINIO DEL PROBLEMA

Estimación del caudal en un punto de una red de desagüe

Problema Simplificado (visión agregada)

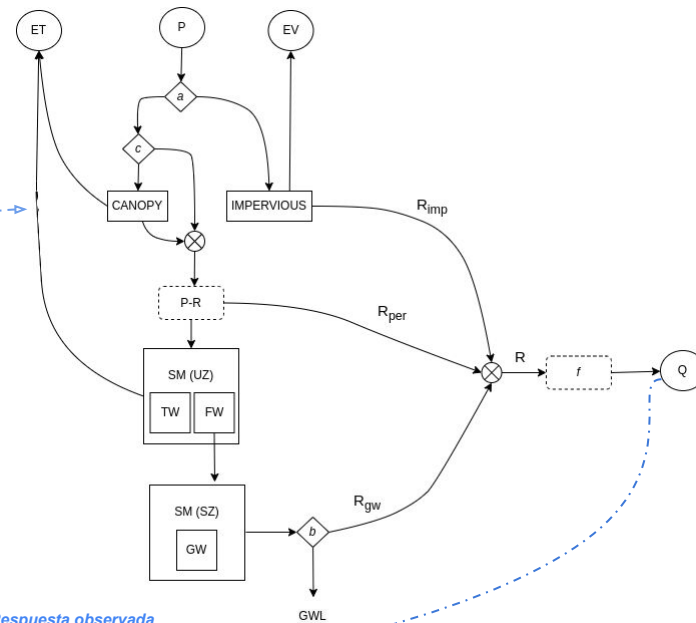
Para una cuenca se conoce un hietograma de un conjunto de eventos precipitantes (hietograma de entrada). A partir de las características físicas de la cuenca (e.g cobertura de suelo, tipo de suelo, pendiente topográfica - interfluvios y valle-, geometría de cauces) o de observaciones de caudal, pretende inferirse un hidrograma de respuesta.



Forzantes observadas
(datos)/hipótesis de
funcionamiento
(estructura)

Componentes de un Modelo Operativo P-Q (sin considerar fusión de hielo/nieve):

(a) Función de Producción (R_{imp} , R_{per} , R_{gw}) y (b) Función de Distribución $f(R_{imp}, R_{per}, R_{gw}) = Q$



Respuesta observada
(datos)/evaluación de hipótesis

Elementos del problema de transformación de precipitación en escorrentía: (a) delimitación de cuenca vertiente y atributos físicos (cobertura y tipo de suelo, pendiente topográfica, geometría de red de drenaje y secciones transversales), (b) Precipitación media areal y (c) hidrograma observado

Esquema topológico de transformación PQ en una cuenca vertiente (esquema operativo simplificado incorporando explícitamente procesos de superficie)

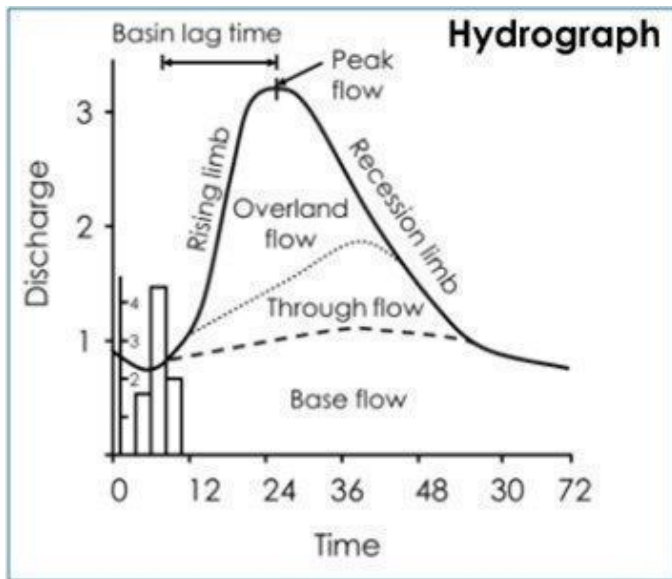
Elementos conceptuales de análisis hidrológico para la práctica operativa de pronóstico

Transformación PQ en una cuenca vertiente. Hidrograma: rutas de flujo, respuesta hidrológica y tiempo de residencia

DOMINIO DEL PROBLEMA

Estimación del caudal en un punto de una red de desagüe

Respuesta hidrológica en una cuenca vertiente: variaciones que se producen en el hidrograma en el punto (sección) de salida, originadas debidas a un ingreso de precipitación



Hidrograma de respuesta a una tormenta en una cuenca vertiente y componentes de flujo (rutas, tiempos de residencia y tiempos de traslado)

En cuanto al hidrograma de respuesta a un evento de precipitación pueden apreciarse las siguientes componente:

- **Flujo rápido:** propagación del excedente hídrico superficial.
- **Flujo demorado:** propagación del excedente hídrico subsuperficial.
- **Flujo lento o base:** propagación del excedente hídrico subterráneo.

Por caudal total entendemos al caudal aforado en toda la sección. Por caudal parcial entendemos al producido por una de las componentes o mediante agrupación y exclusión de la restante (e.g. 'grandes categorías' de flujo rápido y flujo lento).

ELEMENTOS DE ANÁLISIS HIDROLÓGICO.

HIDROGRAMA DE RESPUESTA A UN EVENTO DE PRECIPITACIÓN. FACTORES

FACTORES ESTÁTICOS

Asociados a características topográficas, geológicas, edáficas y de cobertura de suelo de cuenca, tanto como a morfología de la sección.

- Área drenada, geología, longitud de cauces, pendientes de talweg e interfluvios, cobertura y tipo de suelo (volúmenes escurrimiento superficial, caudal pico, velocidad → tiempos de traslado)
- Estructura de la red de drenaje (fuertemente integrada, débilmente integrada) → propagación del excedente hídrico [pudiendo tener fuerte control geológico]
- Geometría y rugosidad de la sección transversal (velocidad de flujo, caudal) [relación $H - Q$] Limnigramas

Los factores estáticos son aquellos que no varían de evento a evento (a excepción que se modifique antrópicamente el sistema), por tanto constituyen 'parámetros' del sistema.

FACTORES DINÁMICOS

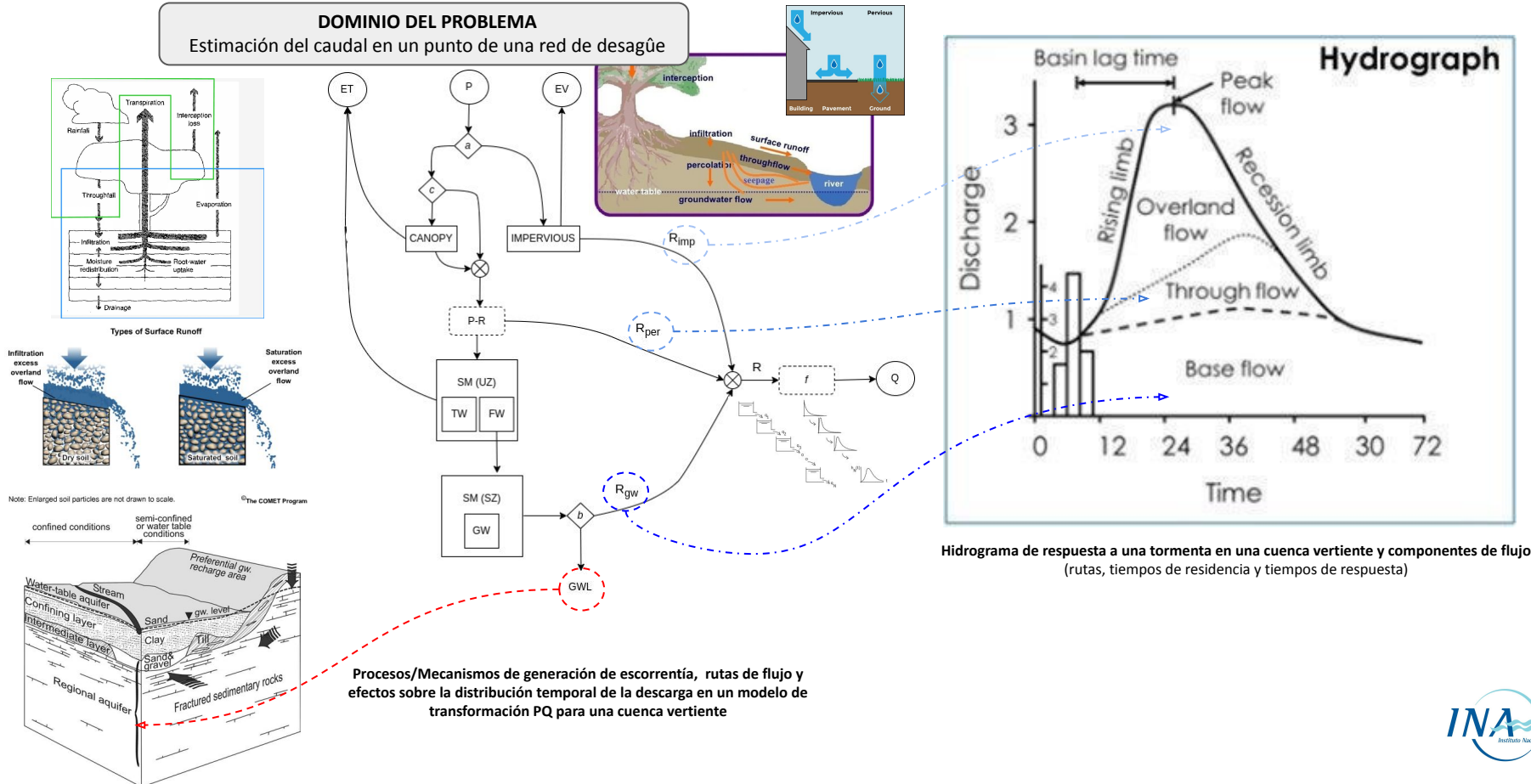
Asociados a las forzantes y al estado del sistema

- Intensidad, duración y distribución espacial del evento de precipitación.
- Condición de humedad inicial (reservorios del sistema, tanto en interfluvios como en valle).

Los factores dinámicos son los flujos y estados del sistema, a los cuales llamaremos 'variables' del mismo, dado un conjunto de factores estáticos que define al sistema.

Elementos conceptuales de análisis hidrológico para la práctica operativa de pronóstico

Transformación de Precipitación en Escorrentía/Caudal en una cuenca vertiente (PQ). Procesos, rutas de flujo y respuesta hidrológica

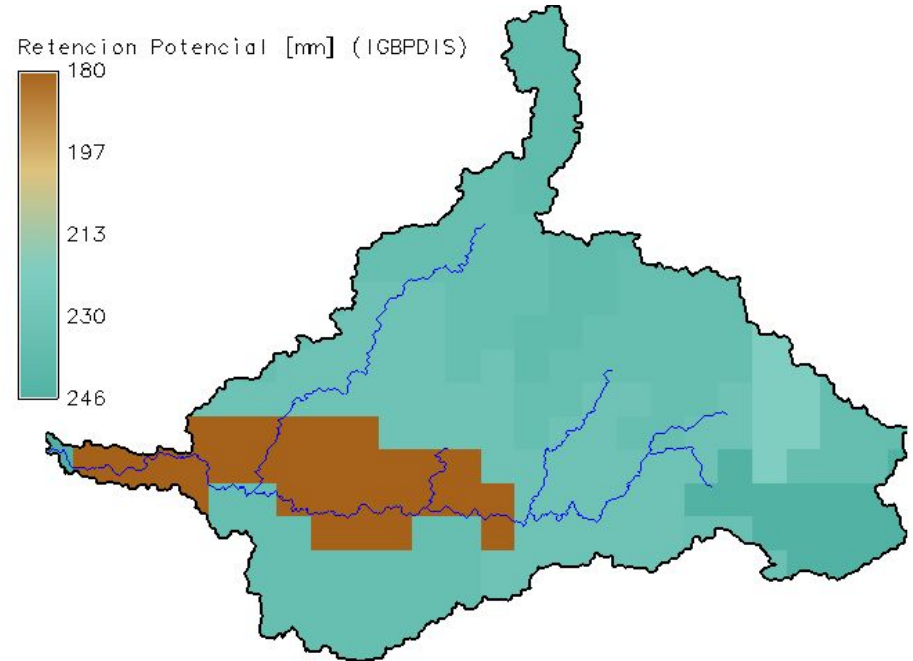
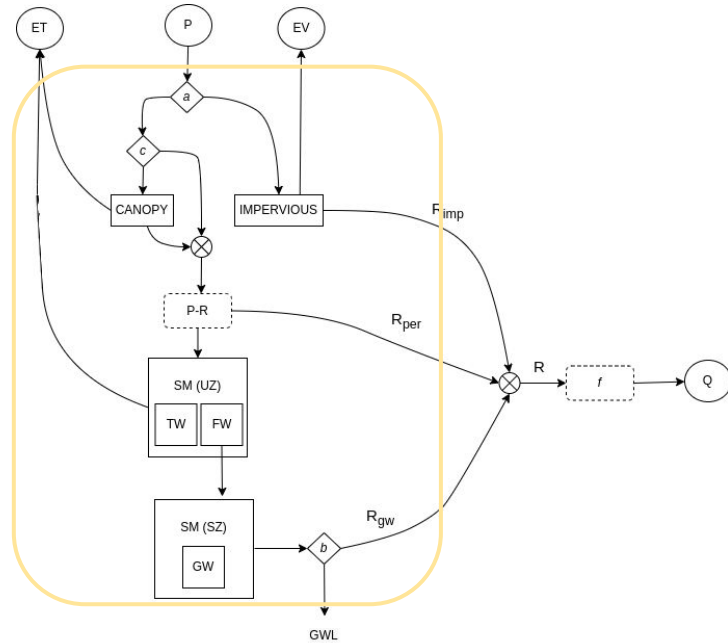


III. Hidrología de cuencas: Proceso de Transformación de Precipitación en Escorrentía/Caudal

Modelo de cuenca vertiente: componente de producción (¿cómo opera la transferencia $P \rightarrow R$?)

Componentes de un Modelo Operativo P-Q (sin considerar fusión de hielo/nieve):

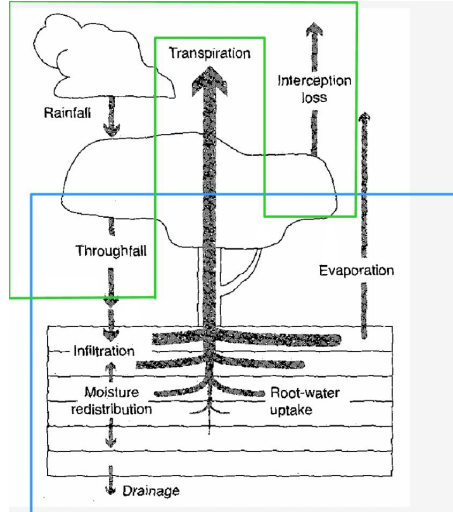
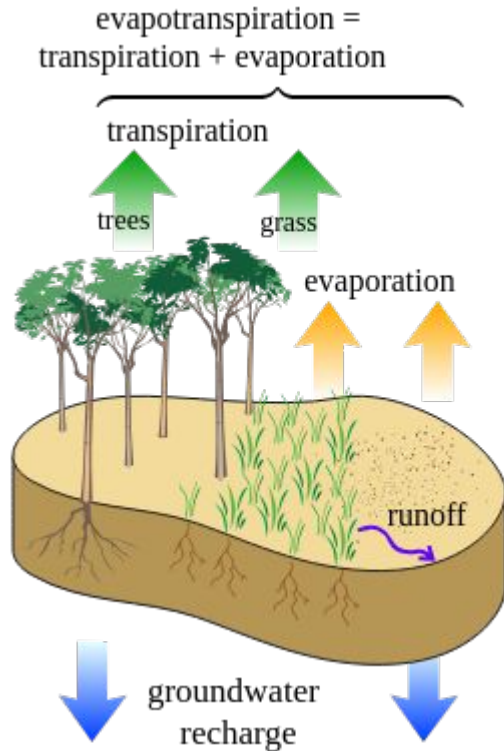
(a) Función de Producción (R_{imp} , R_{per} , R_{gw}) y (b) Función de Distribución $f(R_{imp}, R_{per}, R_{gw}) = Q$



Mapa de máximo almacenamiento de agua de tensión en el perfil de suelo (Agua disponible en perfil de suelo, IGBP DIS, Cuenca del río Apa). El déficit el almacenamiento de agua de tensión modula la producción de agua libre y, de ahí, de escorrentía.

DOMINIO DEL PROBLEMA

Estimación del caudal en un punto de una red de desagüe



$$\frac{dX_1}{dt} = (1 - a)cP(t) - EV(t) - T(t)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = (1 - a)(1 - c)P(t) + I(t) - ET(t) - D(t)$$

$$T(t) = f((1 - a)P(t), X_1(t))$$

$$I(t) = g(T(t), (1 - a)(1 - c)P(t), X_2(t))$$

$$ET(t) = c.F(t)EVP(t)$$

$$EV(t) = (1 - c)EVP(t)$$

ecuaciones de
conservación

Procesos (estructura y
parámetros)

Evapotranspiración
(cobertura vegetal/estado
fenológico)

Evapotranspiración potencial o de referencia (demanda atmosférica de agua) [Forzante secado]

Métodos Empíricos

- Thornthwaite (Climático/mensual)

$$ET_0 = ET_{0sc} (N/12) (\text{dm}/30) \quad (4)$$

Where:

$$ET_{0sc} = C (10^*t_{med}/I)^a$$

$$I = \sum i$$

$$i = (t_{med}/5)^{1.514}$$

$$a = 0.49239 + 1792 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 675 \times 10^{-9} I^3 \quad (5)$$

- Hargreaves (diaria)

$$ET_0 = 0.0023 (t_{med} + 17.78) R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0.5}$$

donde: ET_0 = evapotranspiración potencial diaria, mm/día

t_{med} = temperatura media diaria, °C

R_0 = Radiación solar extraterrestre, en mm/día (tabulada)

t_{max} = temperatura diaria máxima

t_{min} = temperatura diaria mínima

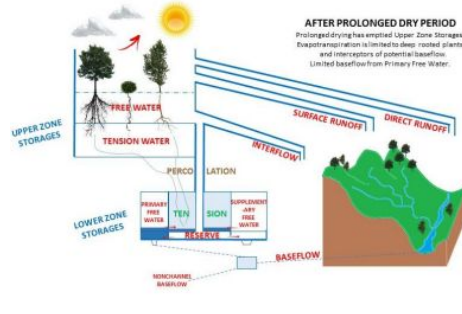
Método Balance de Energía

- Penman - Monteith

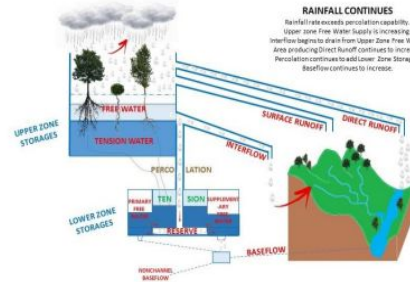
$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

DOMINIO DEL PROBLEMA

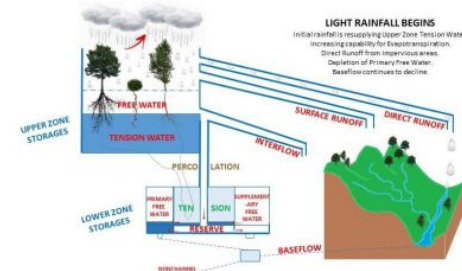
Estimación del caudal en un punto de una red de desagüe



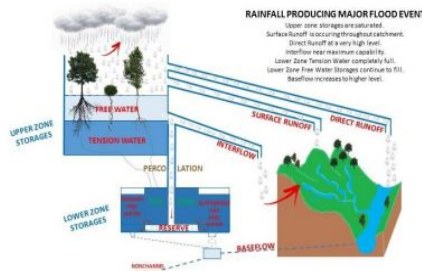
The SAC-SMA after prolonged dry period



The SAC-SMA after rainfall continues

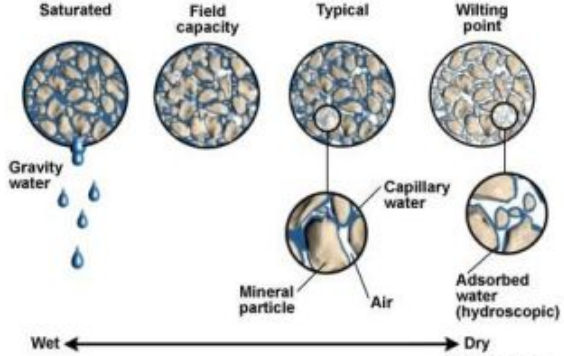


The SAC-SMA after light rainfall begins



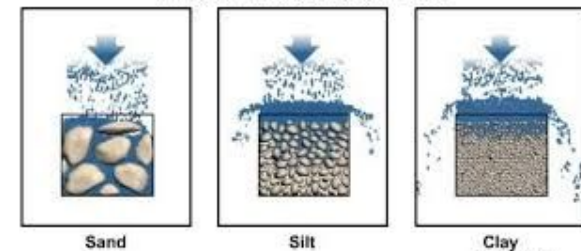
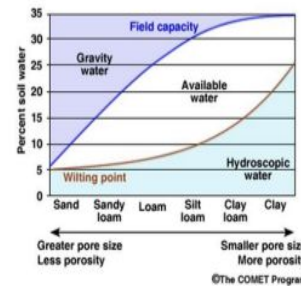
The SAC-SMA rainfall producing major flood event

Generalized Soil Moisture Conditions



©The COMET Program

Infiltration Variations by Soil Texture

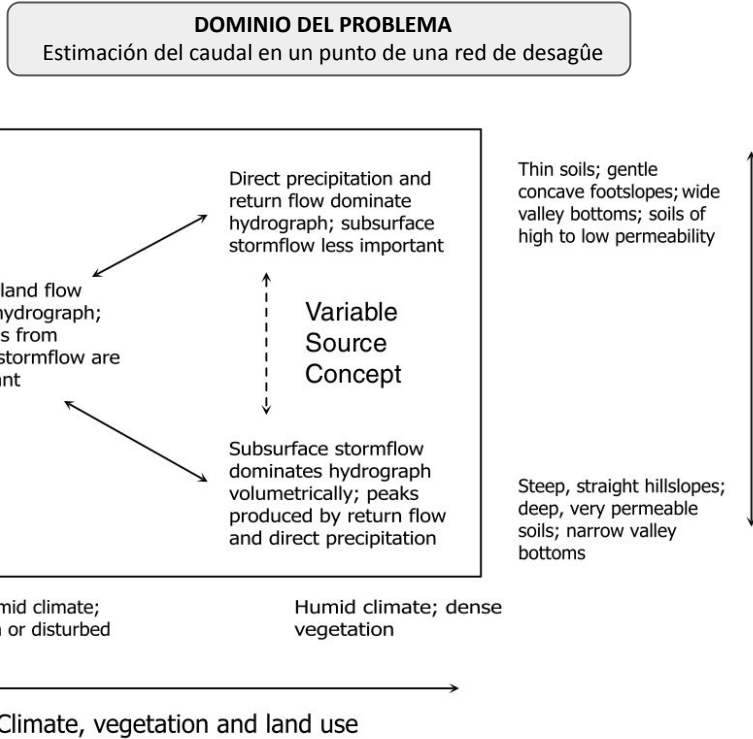


©The COMET Program

Conceptualización de almacenamientos y procesos en perfil de suelo (Sacramento SMA). Tipos de almacenamiento en perfil de suelo (agua higroscópica, agua de tensión, agua libre), efectos de textura (capacidad de almacenamiento y tasa de infiltración)

Elementos conceptuales de análisis hidrológico para la práctica operativa de pronóstico

Transformación de Precipitación en Escorrentía en una cuenca vertiente (PQ). Escorrentía superficial (aporte directo): mecanismos y controles



Types of Surface Runoff

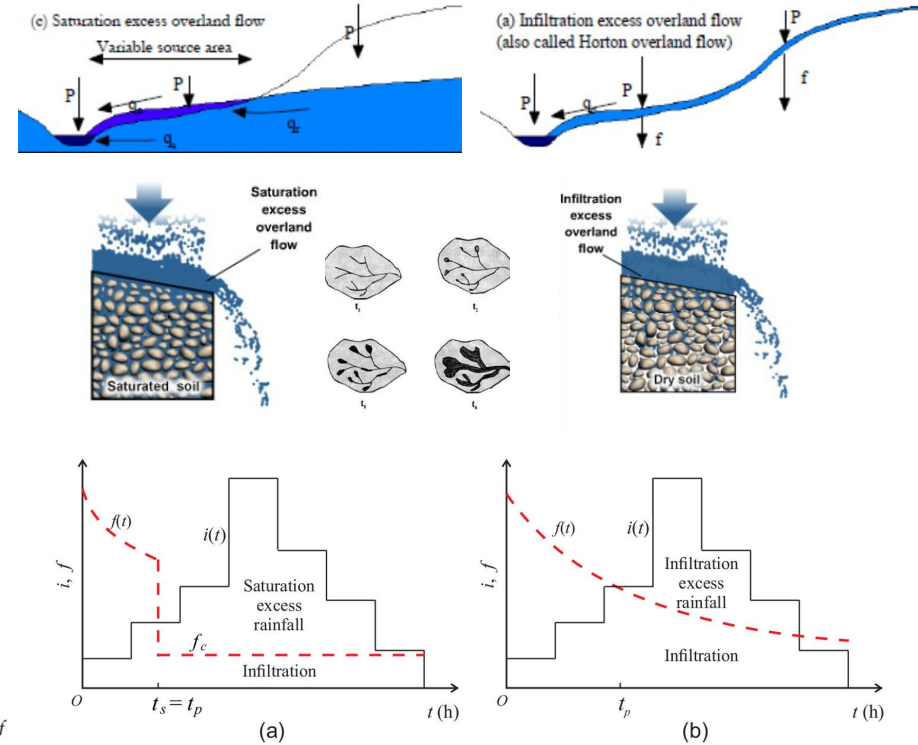


Figure 1.5 Dominant processes of hillslope response to rainfall (after Dunne, 1978, with kind permission of Wiley-Blackwell).

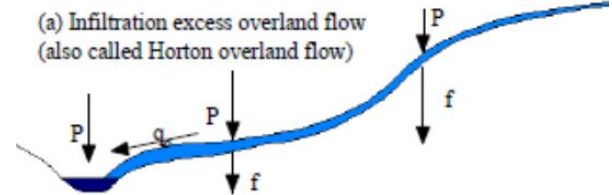
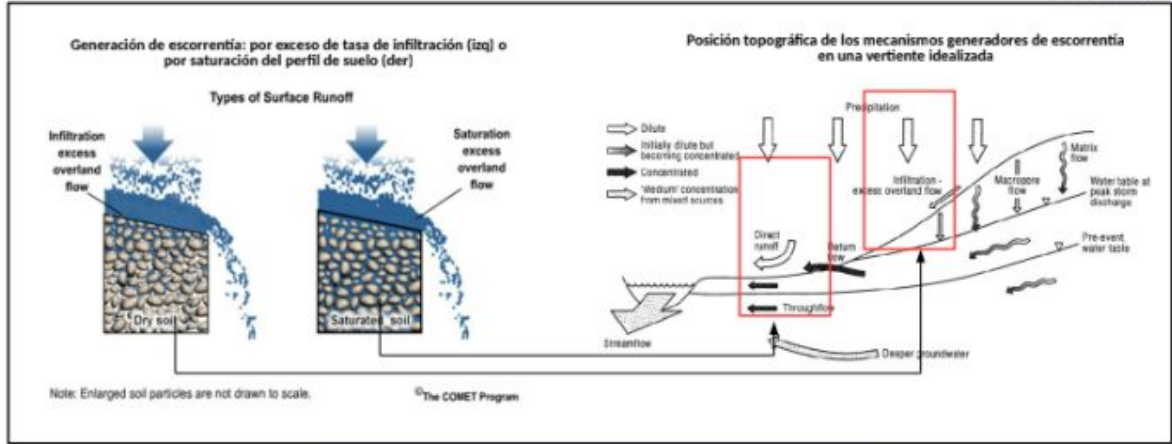
Ejemplo de simplificación conceptual de escorrentía directa

$$R_{imp}(t) + R_{per}(t) = a(t)P(t) + (1 - a(t)) \left(\frac{SM(t)}{SM_0} \right)^\gamma$$

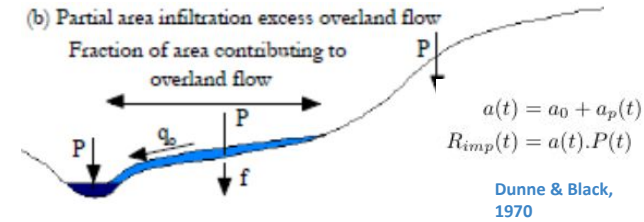
DOMINIO DEL PROBLEMA

Estimación del caudal en un punto de una red de desagüe

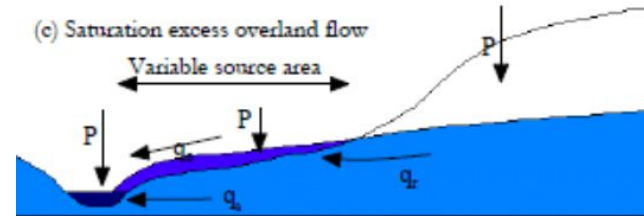
Horton, 1933



Betson, 1964



Dunne & Black, 1970



$$a(t) = a_0 + a_p(t)$$

$$R_{imp}(t) = a(t) \cdot P(t)$$

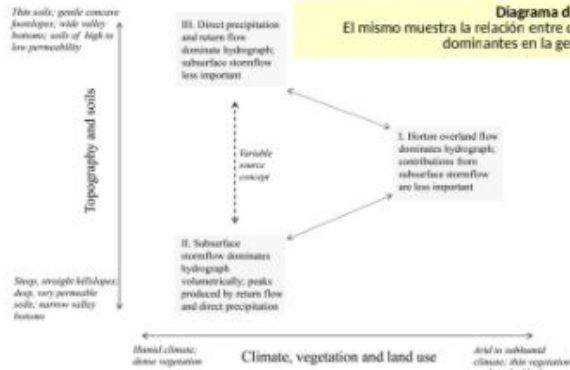
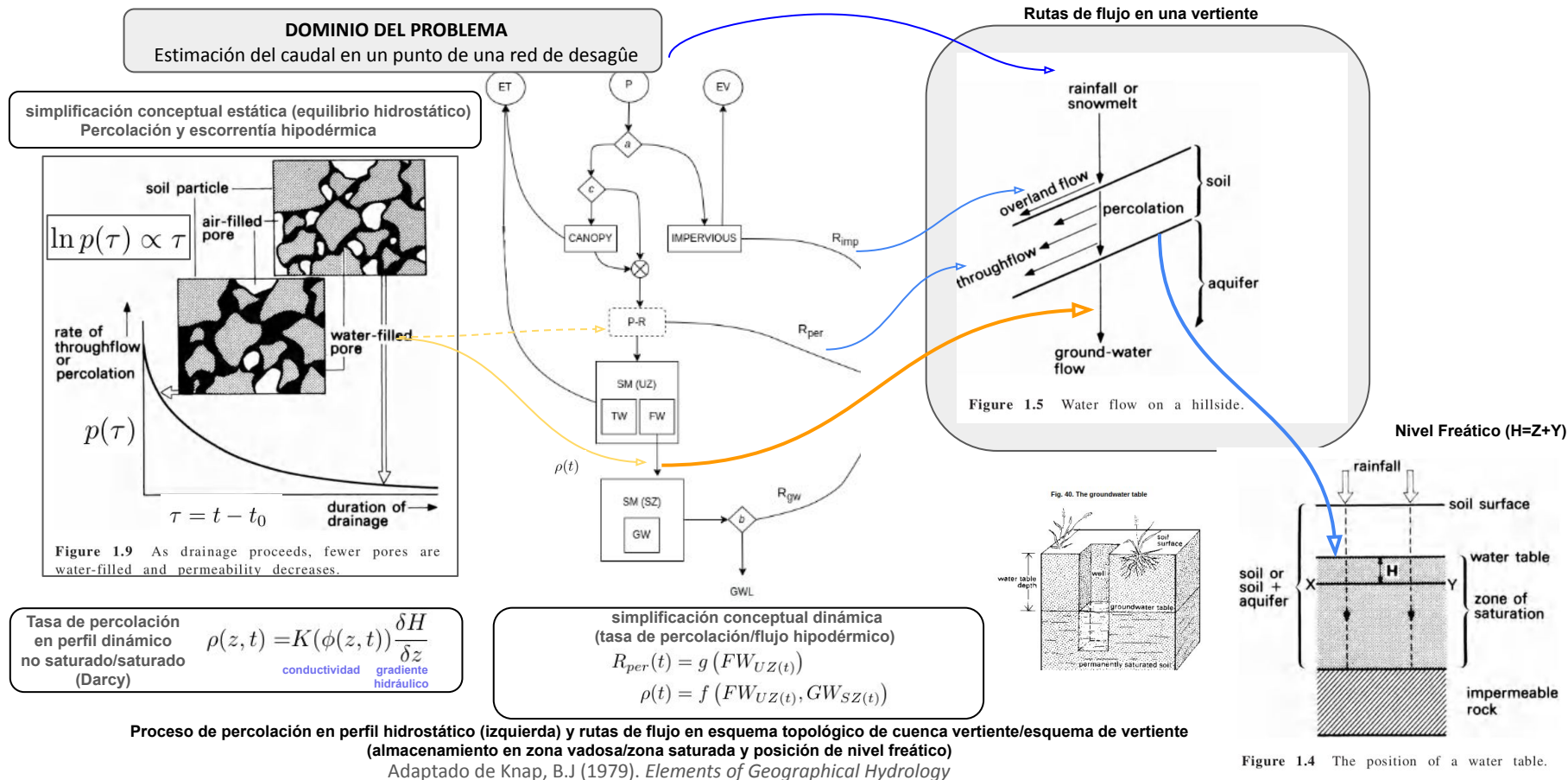


Figure 2. Conceptual description of the hydrological processes included in a simple model.

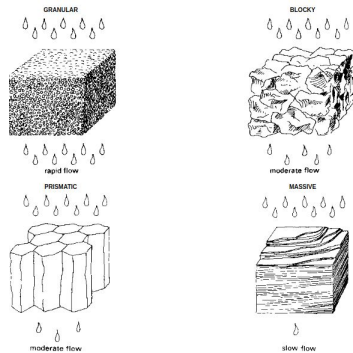
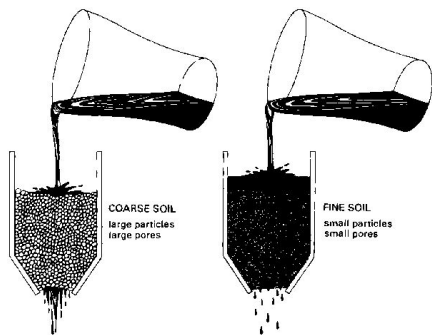
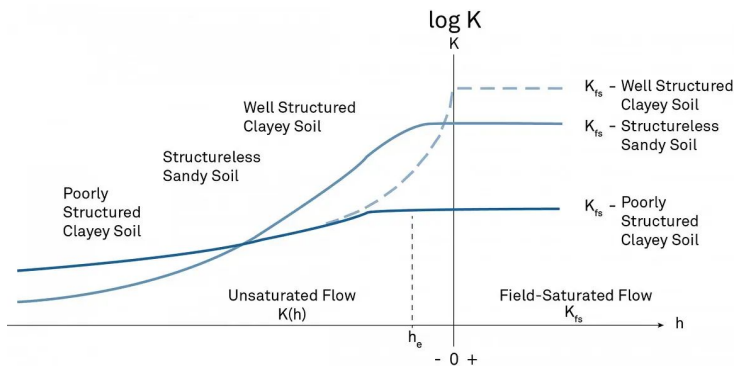


Transformación de Precipitación en Escorrentía en una cuenca vertiente (PQ). Infiltración/Percolación (Conductividad H)

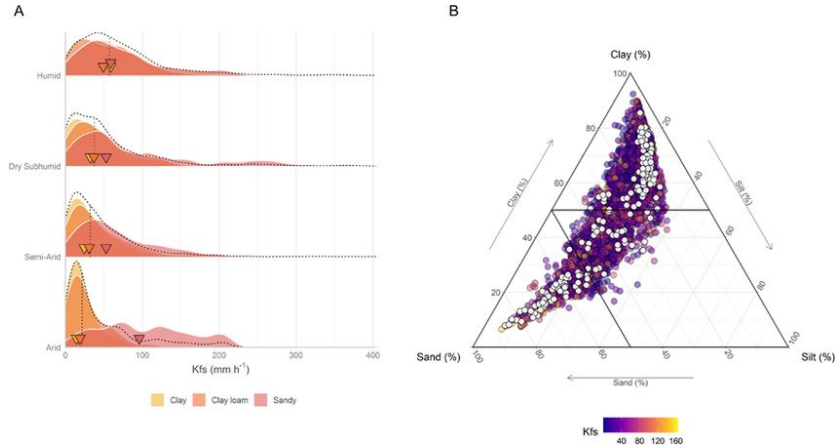
DOMINIO DEL PROBLEMA

Estimación del caudal en un punto de una red de desagüe

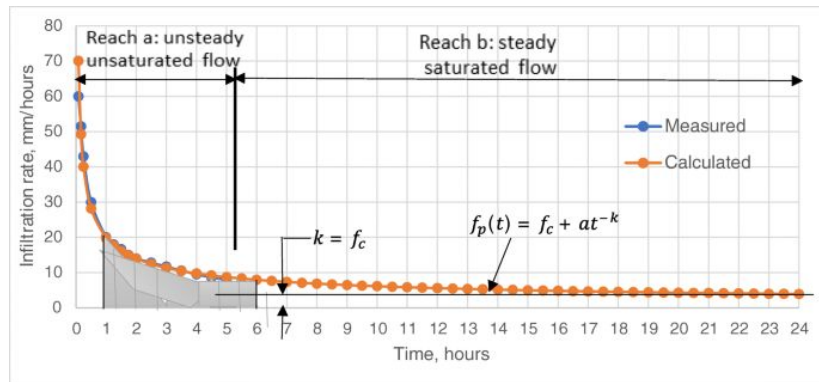
Conductividad hidráulica saturada y no saturada
(según carga hidráulica, textura/estructura)

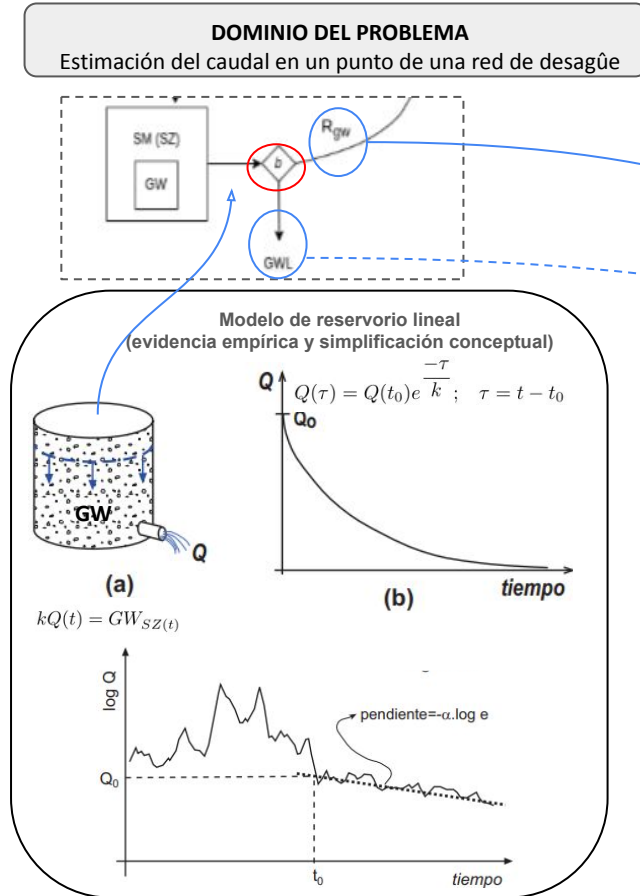


Determinants of Soil Field-Saturated Hydraulic Conductivity Across Sub-Saharan Africa: Texture and Beyond (Tobella et al., 2024)



Conductividad hidráulica saturada e infiltración
(determinación mediante ensayo de infiltración)





Rutas de flujo subterráneo
(conceptualización simple)

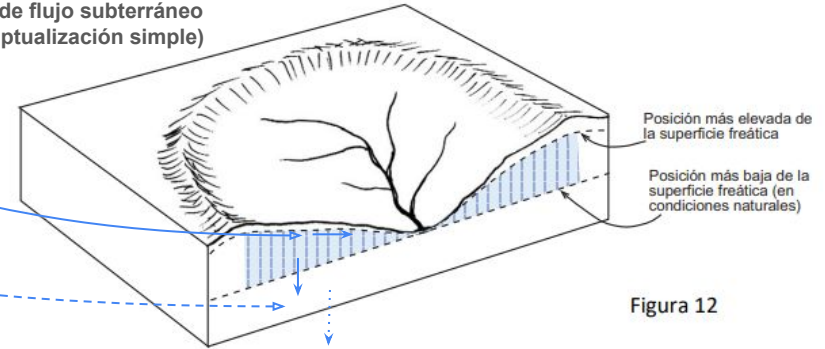


Figura 12

https://hidrologia.usal.es/temas/Hid_sup_2.pdf

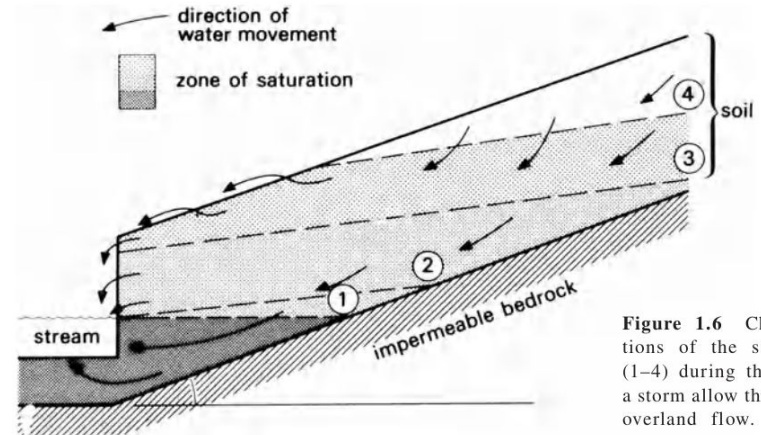


Figure 1.6 Changing positions of the saturated zone (1-4) during the progress of a storm allow throughflow and overland flow.

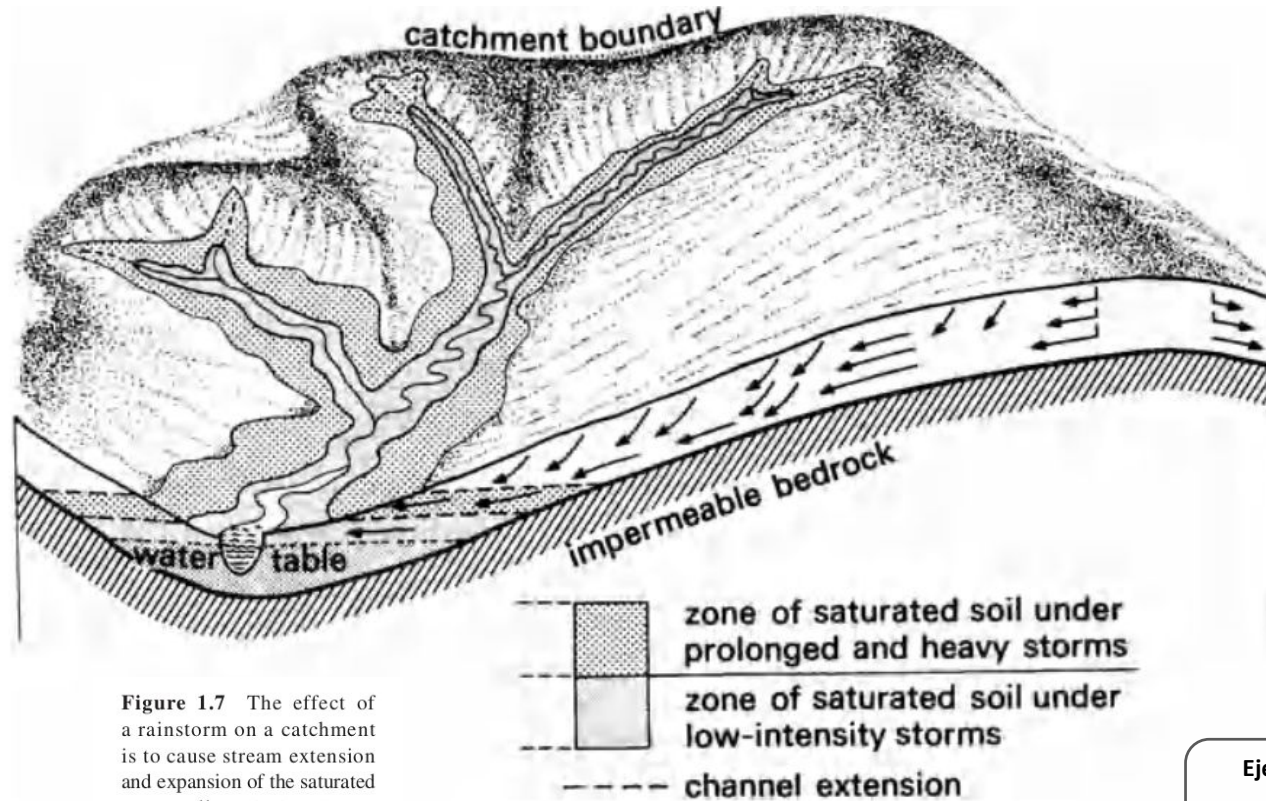


Figure 1.7 The effect of a rainstorm on a catchment is to cause stream extension and expansion of the saturated zone adjacent to stream channels. Note that the soil thickness has been exaggerated for clarity.

Adaptado de Knap, B.J (1979). *Elements of Geographical Hydrology*

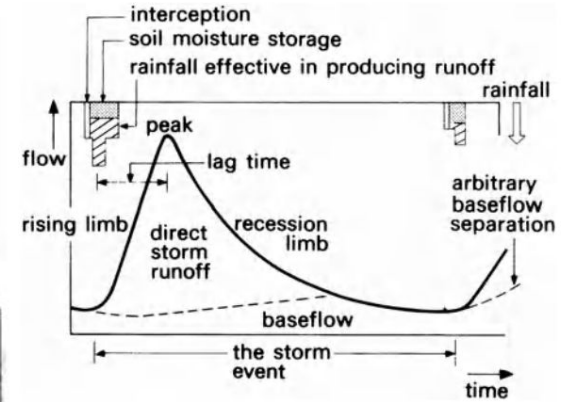
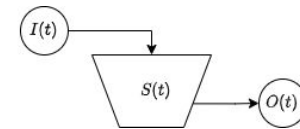


Figure 1.12 The characteristics of a storm hydrograph.

Modelo de Reservorio Lineal



Ecuación de conservación

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t)$$

Función de almacenamiento

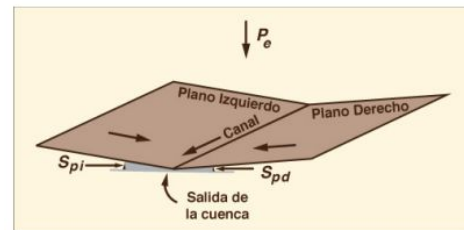
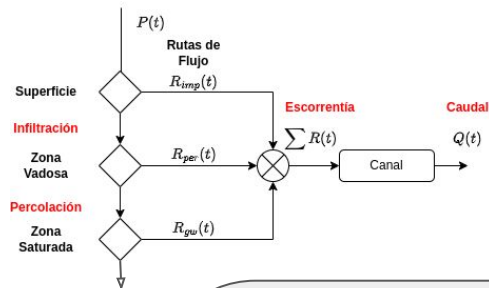
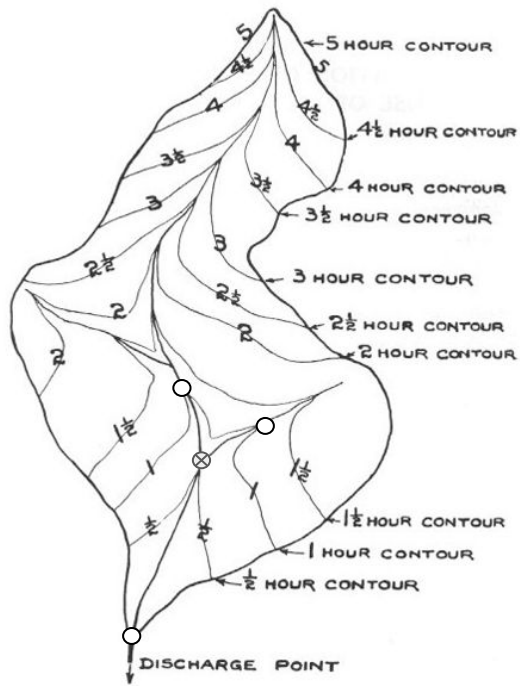
$$kO(t) = S(t)$$

Ejemplo de simplificación conceptual de escorrentía base

$$R_{gw}(t) = (1 - b(t)) \frac{GW_{sz}(t)}{k}$$

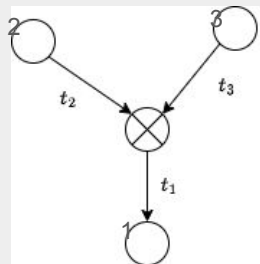
DOMINIO DEL PROBLEMA

Estimación del caudal en un punto de una red de desagüe



Plano de Wooding. Ponce, V. (2024)

Cómputo de tiempos de traslado



$$\begin{aligned} T_3 &= t_3 + t_1 \\ T_2 &= t_2 + t_1 \\ T_1 &= t_1 \end{aligned}$$

Costo unitario (tramo)

$$t_i = \frac{L_i}{v_i}$$

Costo acumulado (línea de corriente)

$$T_i = \sum_{j \in C_i} t_j$$

Tiempo de concentración (cuenca)

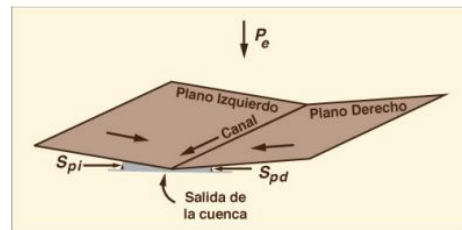
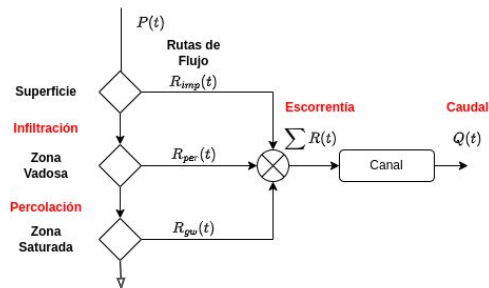
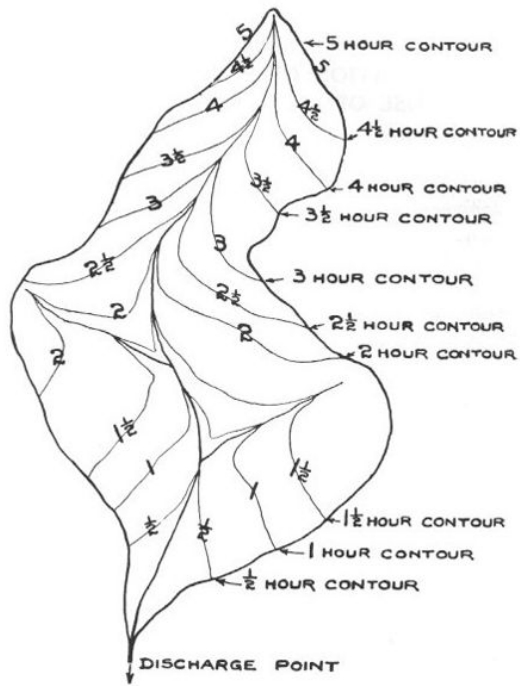
$$T_c = \max(T_j)$$

Cómputo de velocidad (flujo uniforme y permanente)

$$v_i = \frac{R_{hi}^{2/3}}{N_i} S_i^{1/2}$$

DOMINIO DEL PROBLEMA

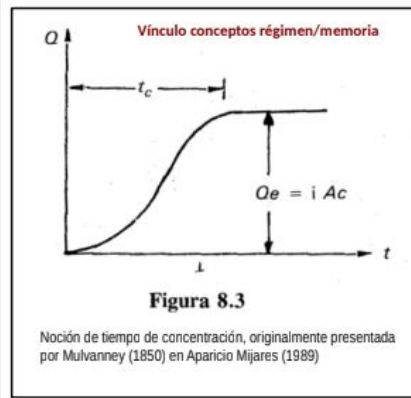
Estimación del caudal en un punto de una red de desagüe



Plano de Wooding. Ponce, V. (2024)

Cómputo de tiempos de traslado. Concepto de 'Tiempo de Concentración'

Linealidad entre R y Q en evento de P a intensidad constante y duración infinita



Noción de tiempo de concentración, originalmente presentada por Mulvanney (1850) en Aparicio Mijares (1989)

Tiempo de concentración (cuenca)

$$T_c = \max(T_j)$$

Modelo de Mulvaney (1850)

$$Q_p = \alpha I_p A_c$$

Coefficiente de escorrentía (evento teórico)

$$\alpha = \frac{\sum R_i(p)}{I_p}$$

Cómputos Auxiliares

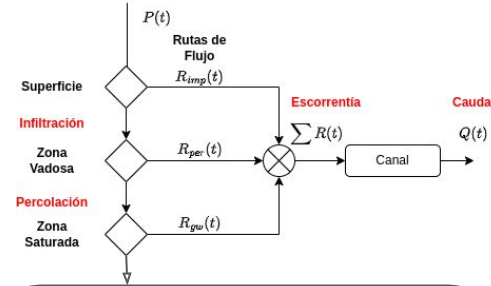
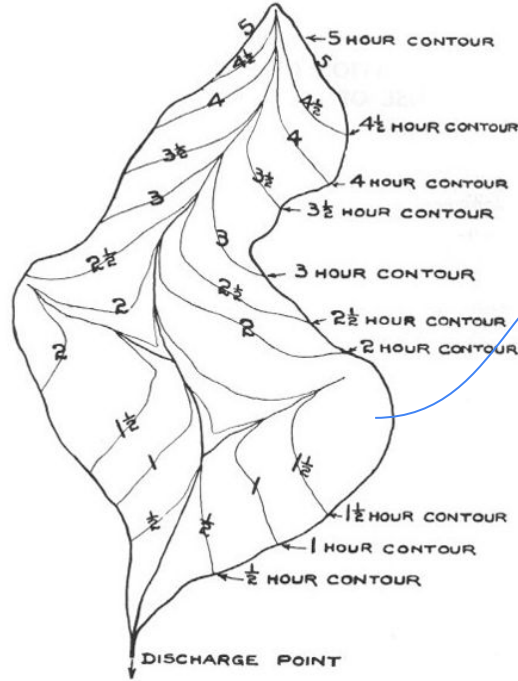
$$I = f(T_c, P)$$

$$I_p = g(I, P(I \geq I_p))$$

$$\alpha = h(P(I \geq I_p), \bar{\theta})$$

DOMINIO DEL PROBLEMA

Estimación del caudal en un punto de una red de desagüe



Tiempos de traslado. Factores (estáticos)

Cuenca (interfluvios):

- Pendiente Topográfica/Forma
- Cobertura y tipo/estructura de suelo
- Geología

Red de canales:

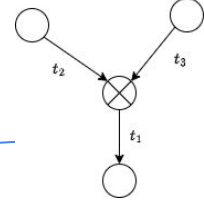
- Pendiente Topográfica (S)
- Longitud de tramos (L)
- Geometría de secciones transversales (Rh y N)
- Tipo de cobertura (N)

Factores Dinámicos:

- Almacenamiento inicial (red de drenaje)
- Intensidad/volumen escorrentía

Cómputo de velocidad (flujo uniforme y permanente)

$$v_i = \frac{R_{hi}^{2/3}}{N_i} S_i^{1/2}$$



Cómputos empíricos

(Atributos estáticos, RUP)

Tipo Kirpich/Temez

$$t_i \propto \left(\frac{L_i}{S_i^{1/2}} \right)^\omega$$

Tipo Clark

$$t_i \propto \left(\frac{A_i}{S_i^{1/2}} \right)^\omega$$

Tipo Pilgrim

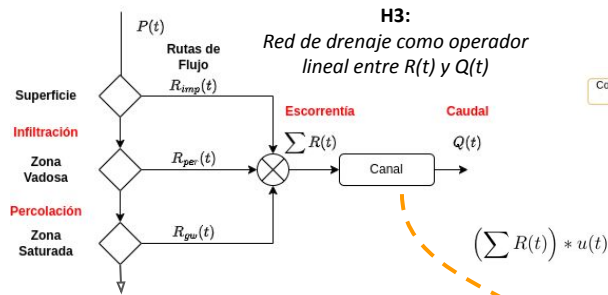
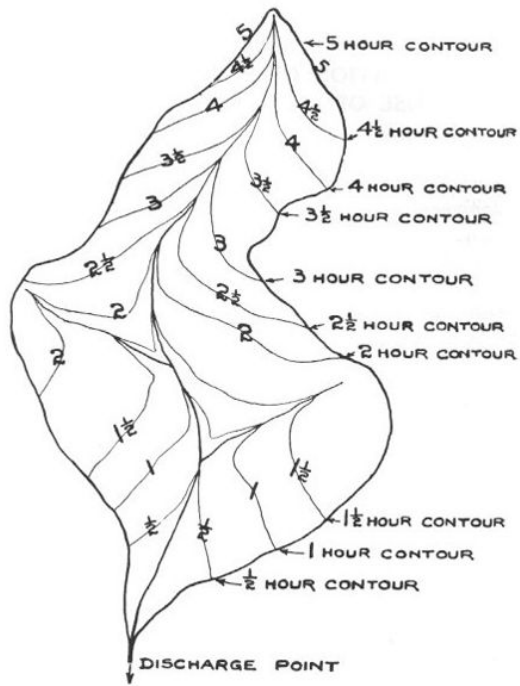
$$t_i \propto A_i^\omega$$

(Atributos estáticos+dinámicos)

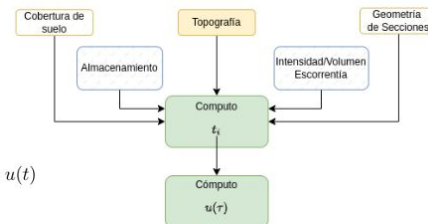
Tipo Henderson y Wooding

$$t_e = 0,94 \cdot t_i^{-0,4} \cdot \left[\frac{n \cdot L_p}{\sqrt{S}} \right]^{0,6}$$

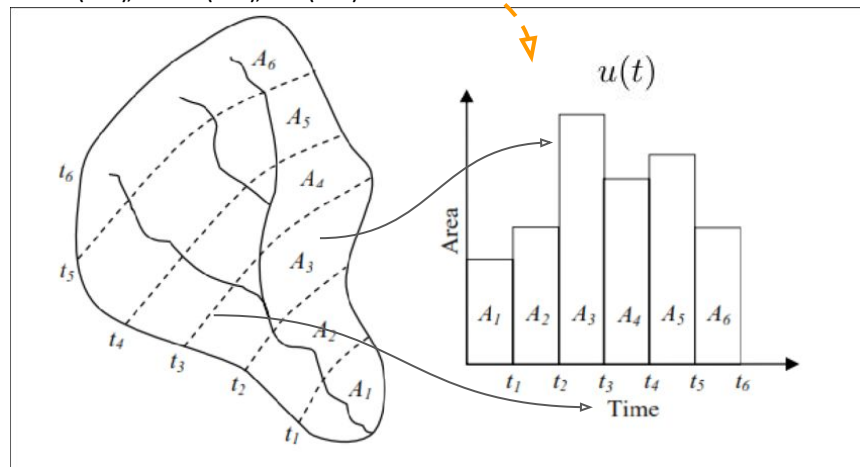
DOMINIO DEL PROBLEMA
Estimación del caudal en un punto de una red de desagüe



Workflow Cómputo Función de Distribución (método de velocidades)



Función de distribución sobre la base de Isocronas
Imbeaux (1892), Richadr (1944), Clark (1945) entre otros



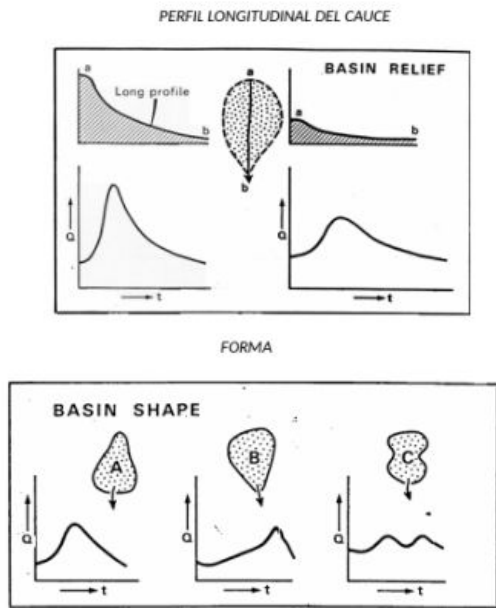
Curva Tiempo - Área (Beven, 2020)

(Función respuesta a pulso unitario)

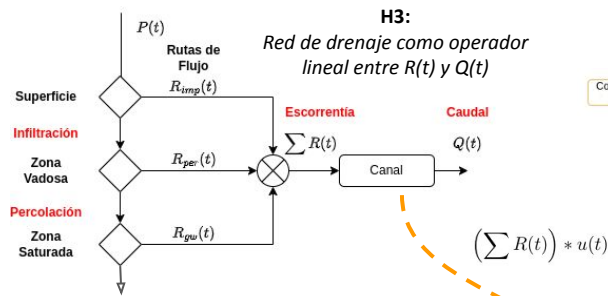
Mapa de Isocronas de tiempos de traslado en una cuenca (tiempos de traslado y tiempo de concentración)
(Beven K., 2020. A history of the concept of time of concentration)

La asunción del sistema de drenaje como operador lineal en la relación R-Q (mediante la función de distribución u), impone isocronas estáticas asociadas a una condición teórica de régimen permanente

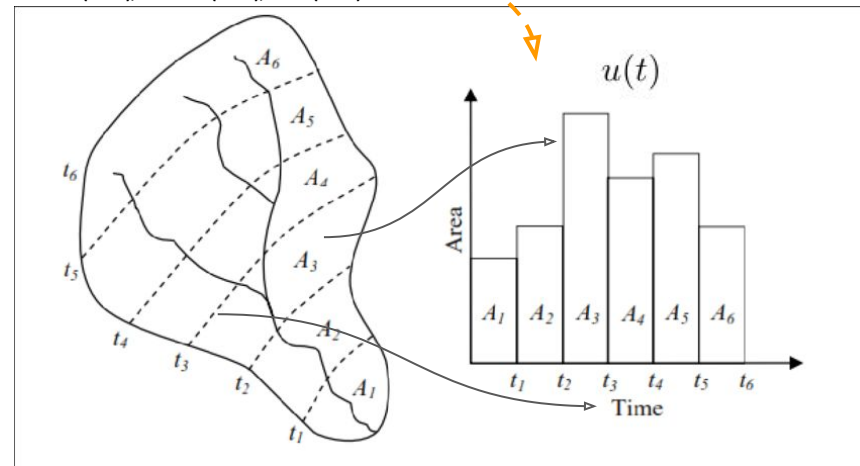
DOMINIO DEL PROBLEMA
Estimación del caudal en un punto de una red de desagüe



Efectos de atributos estáticos (topográficos y geométricos) sobre la distribución de isocronas y sobre el hidrograma de respuesta de una cuenca vertiente.



Función de distribución sobre la base de Isocronas
Imbeaux (1892), Richadr (1944), Clark (1945) entre otros



Curva Tiempo - Área (Beven, 2020)

(Función respuesta a pulso unitario)

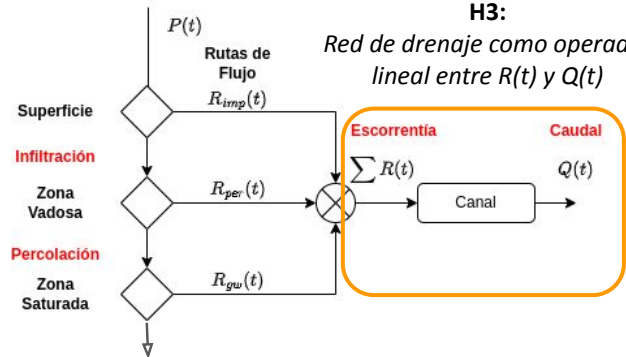
La asunción del sistema de drenaje como operador lineal en la relación R-Q (mediante la función de distribución u), impone isocronas estáticas asociadas a una condición teórica de régimen permanente

DOMINIO DEL PROBLEMA

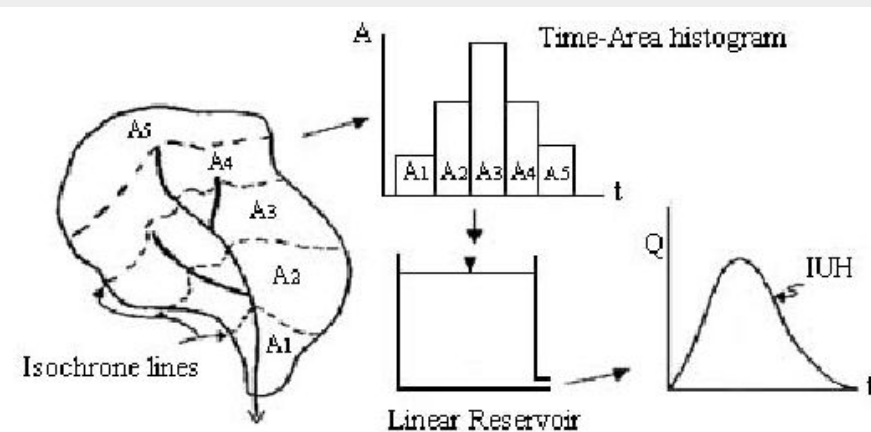
Estimación del caudal en un punto de una red de desagüe

H3:

Red de drenaje como operador
lineal entre $R(t)$ y $Q(t)$



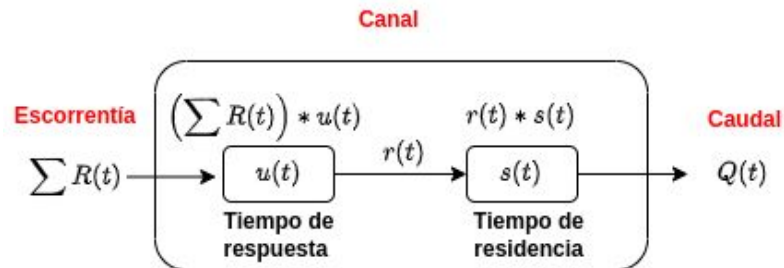
$R \rightarrow$ Curva Tiempo Área (traslado) \rightarrow Reservorio (atenuación x almacenamiento) $\rightarrow Q$



Parámetros del proceso de propagación de la escorrentía sobre la red de drenaje [tránsito agregado]

Tiempo de respuesta: tiempo requerido en la transmisión de una perturbación R sobre el sistema, con efecto sobre Q

Tiempo de residencia: tiempo medio de residencia de una partícula en el sistema (tiempo característico)

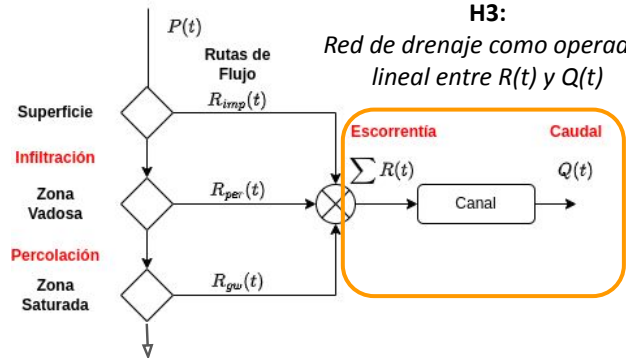


DOMINIO DEL PROBLEMA

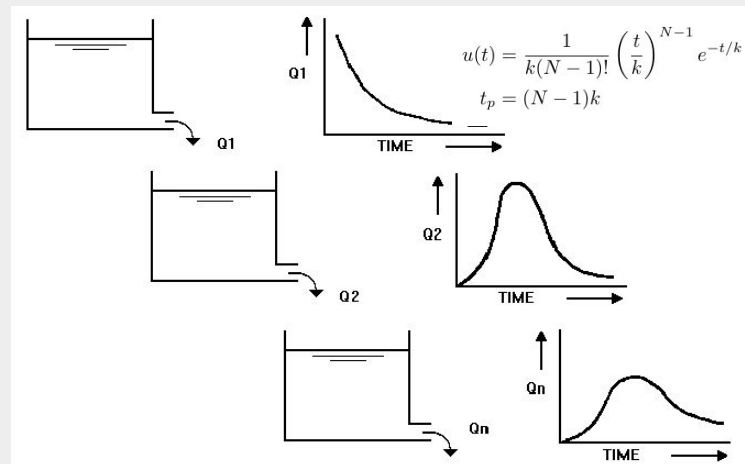
Estimación del caudal en un punto de una red de desagüe

H3:

Red de drenaje como operador
lineal entre $R(t)$ y $Q(t)$



$R \rightarrow$ Cascada de reservorios (atenuación x almacenamiento/traslado) $\rightarrow Q$

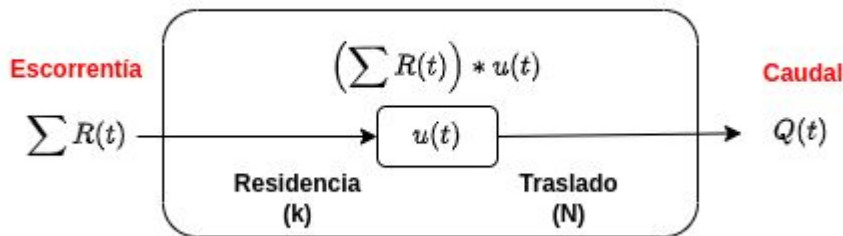


Canal

Parámetros del proceso de propagación de la escorrentía sobre la red de drenaje [tránsito agregado]

Tiempo de respuesta: tiempo requerido en la transmisión de una perturbación R sobre el sistema, con efecto sobre Q

Tiempo de residencia: tiempo medio de residencia de una partícula en el sistema (tiempo característico)

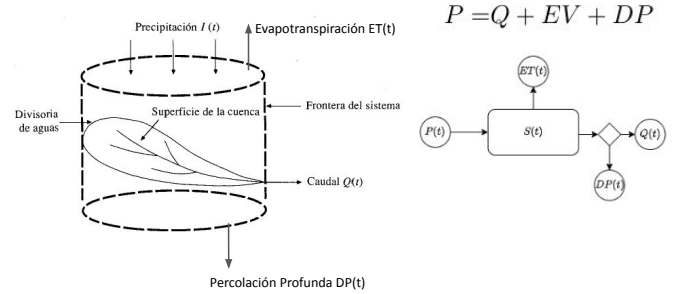
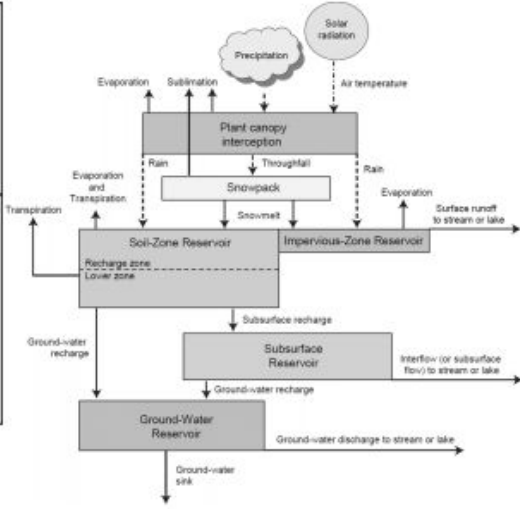
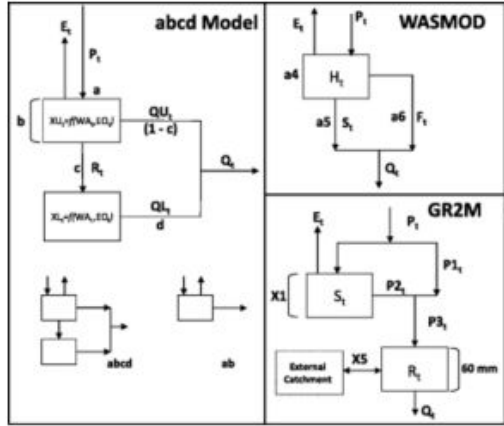


III. Hidrología de cuencas: Proceso de Transformación de Precipitación en Escorrentía/Caudal

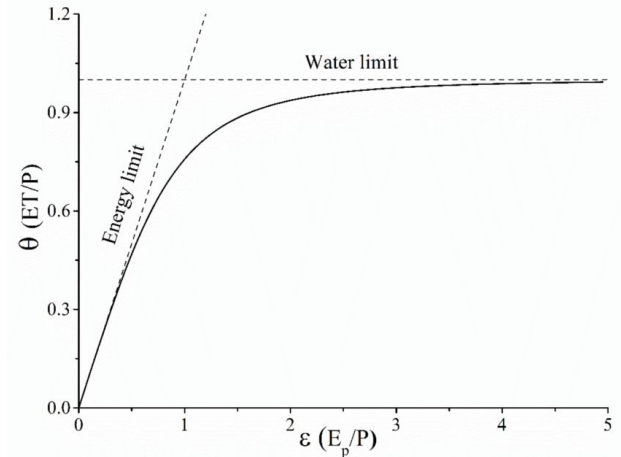
Proceso PQ: validez/efectos de escala temporales y espaciales (dominio del problema/limitantes)

III. Hidrología de cuencas: Proceso de Transformación de Precipitación en Escorrentía/Caudal

Escala temporal: efectos de agregación temporal (ciclo diario, semanal, mensual, ciclo anual)



Ecuación de Balance Climático Anual para una cuenca vertiente (simplificaciones adoptadas)



Ecuación de Budyko (Balance Climático Anual). Limitantes de energía, de disponibilidad de agua para la generación de agua libre

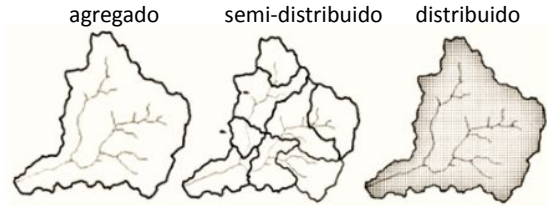
A medida que se **incrementa la escala temporal** en el análisis de la respuesta de una cuenca vertiente, se **simplifican elementos** (flujos y almacenamientos \rightarrow ecuaciones y términos) tanto en la **componente producción** y en la **componente distribución** (e.g. resolución temporal \ll tiempos de traslado/tiempos de residencia). Así, por ejemplo en el **caso límite del balance climático**, en el análisis bien podría establecerse una **única ecuación de conservación** en la que se **ignora el efecto de la variación de almacenamiento** (dS/dt). Asimismo, los *campos de las forzantes se suavizan* (menor variabilidad espacial) favoreciendo la hipótesis de uniformidad en las forzantes (agregación espacial). Consecuentemente, **a partir de estas asunciones pueden obtenerse de forma simple estimaciones robustas sobre el caudal medio anual, bajo un régimen climático, en grandes cuencas**. Así también, mediante la aplicación de métodos dinámicos simples para el balance intra-anual, sobre la base de observaciones de P y T (e.g. Balance Hídrico Thornthwaite y Matter, ecuación de Budyko)

III. Hidrología de cuencas: Proceso de Transformación de Precipitación en Escorrentía/Caudal

Escala espacial: más de un sitio, variabilidad en factores → enfoques distribuidos

DOMINIO DEL PROBLEMA

Estimación del caudal en una serie de puntos de la red de desagüe
(o variabilidad apreciable en factores estáticos/dinámicos)

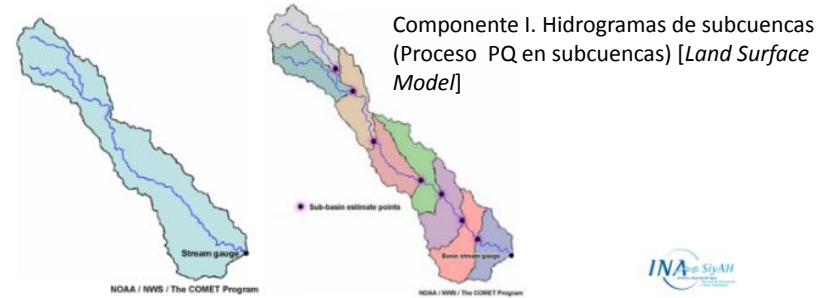


Agregación espacial

- **Agregado** (nivel cuenca vertiente) [balance hídrico + función distribución temporal (kernel)]
- **Semi Distribuido o en subcuencas** [balance hídrico + función distribución temporal (kernel) + modelo tránsito espacial]
- **Distribuido** o en grilla [balance hídrico + función distribución temporal (kernel) + modelo tránsito espacial]

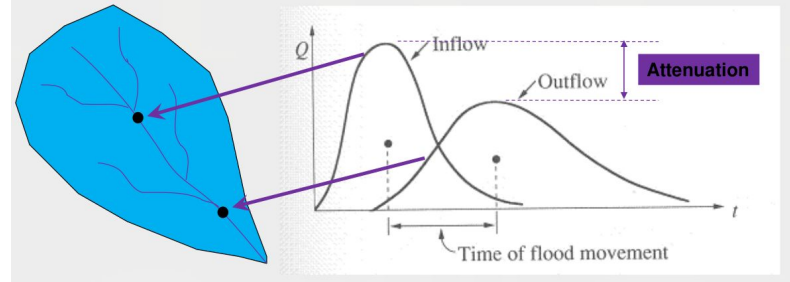
Para un sistema fluvial se desea **estimar el caudal observado o proyectar un escenario futuro**:

- Solamente en el punto de cierre de la cuenca vertiente X_1 (izquierda) [modelo agregado]
- En X_2, X_3, \dots, X_N distintas secciones dentro de la cuenca vertiente a un sitio específico X_1 (derecha) [modelo semi-distribuido/distribuido]



Componente I. Hidrogramas de subcuencas
(Proceso PQ en subcuencas) [Land Surface Model]

Componente II. Tránsito de caudales [Reach Routing Model]



III. Hidrología de cuencas: Proceso de Transformación de Precipitación en Escorrentía/Caudal

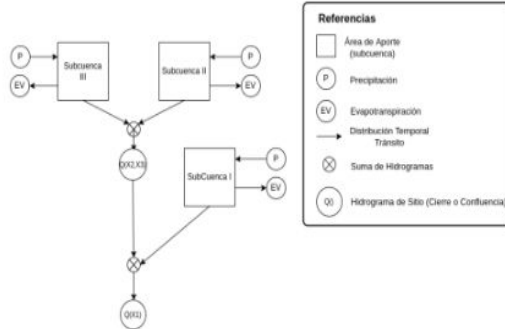
Enfoques distribuidos Proceso PQ y tránsito en red de drenaje (semi distribuido/completamente distribuido)

DOMINIO DEL PROBLEMA

Estimación del caudal en una serie de puntos de la red de desagüe
(o variabilidad apreciable en factores estáticos/dinámicos)

Flujo de trabajo

- 1 Se dispone de **información** (hipótesis u observaciones) sobre las **forzantes atmosféricas** de los procesos de **balance hídrico** en cada subcuenca (precipitación y evapotranspiración).
- 2 A partir de esta información **debe computarse** la **escorrentía** en cada subcuenca, **proratearla** en el tiempo hacia el **cierre** de cada subcuenca y, finalmente, **transitar** el caudal entre los tramos considerados y sumarlo en caso de que se observen confluencias.



Por lo general, podemos asumir que *el caudal en cada uno de los sitios/secciones, depende de:*

- La **generación de excedente hídrico** (escorrentía) en cada una de las áreas de aporte (cuenca o subcuenca) **a partir de la precipitación observada** (media areal), tanto como del consumo de la reserva, por **evapotranspiración**, durante los **períodos sin precipitación** (e.g. disminución del caudal de base)
- El **tránsito de esta escorrentía** desde los **interfluvios hacia el sitio de cierre** de la cuenca o subcuenca (hidrograma parcial o total, en subcuencas o cuencas, respectivamente)
- La combinación del **tránsito del caudal de un sitio a otro** (hidrograma total, en sitios de confluencia o aguas abajo)

