

**ASPECTOS DETERMINANTES DE LA SEGURIDAD DE PRESAS:  
Incertidumbre Hidrológica. Actualización y Tratamiento de la  
información.**

**ING. ANIBAL COMBA**

PROFESOR ADJUNTO DE HIDROLOGIA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA DE LA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMAN

# AGRADECIMIENTOS

Conceptos  
Experiencias  
Reflexiones  
Preguntas

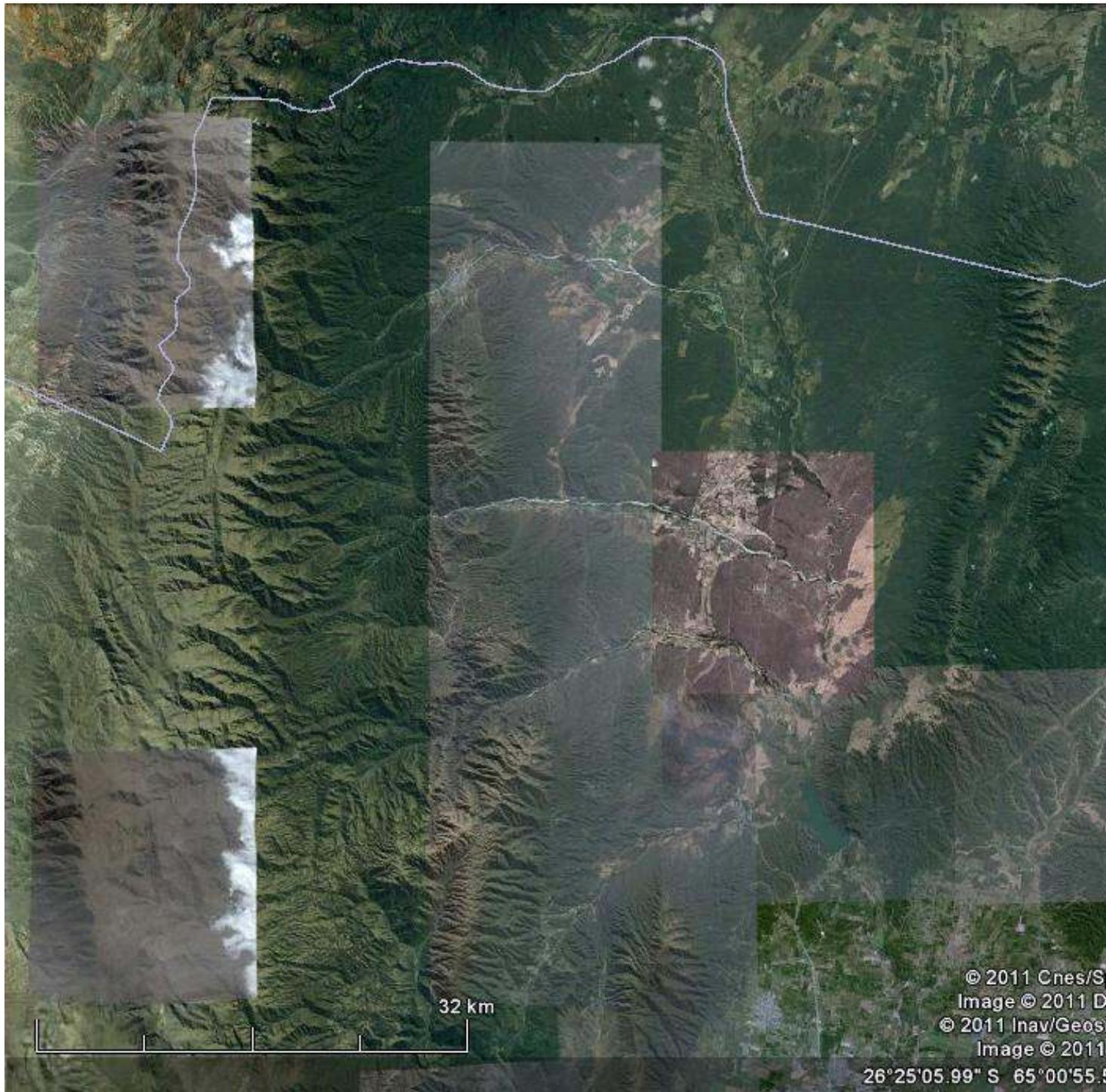
¿Qué es la hidrología?

**INCERTIDUMBRE, MISTERIO Y  
SORPRESAS.**

Mentira coherente vs. Realidad a veces  
aparentemente incoherente.

# UBICACIÓN EN EL TEMA

- ¿Para que sirve la hidrología? Ciclo hidrológico.
- ¿Y en el caso que nos ocupa? Precipitaciones, Caudales, Volúmenes.
- ¿En que ámbito geográfico la estudiaremos? Cuenca.
- Ejemplo de la cuenca imbrífera de la presa El Cadillal (variación morfológica, de suelos, climática, de usos del suelo, extensa, etc.)



© 2011 Cnes/Sp

Image © 2011 Di

© 2011 Inav/Geos

Image © 2011

26°25'05.99" S 65°00'55.5"

# Procesos estocásticos

- ▶ Determinístico y Aleatorio.
- ▶ Tiempo y Espacio.
  - ¿Cuándo es mayor uno que otro?
    - Determinístico (ecuaciones empíricas de los procesos físicos)
    - Aleatorio (estadística de las observaciones)

Factores que influyen en la decisión: longitud de las series disponibles, aplicabilidad de los métodos conocidos, datos disponibles o posibles de conseguir, plazo para la presentación de los resultados, etc.

Antes de comenzar el estudio, debemos hacernos algunas preguntas:

- ¿ Finalidad del estudio ?:
  - **ACTUALIZACIÓN HIDROLÓGICA**
  - VERIFICACIÓN DE LA CRECIDA DE DISEÑO
  - GENERAR UNA SERIE HIDROLÓGICA COMPLETA PARA SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE UN EMBALSE
  - AJUSTE DE UN MODELO DETERMINÍSTICO
  - APLICACIÓN DE UN NUEVO MODELO ESTADÍSTICO O DETERMINÍSTICO.

# ACTUALIZACION HIDROLOGICA

## ► Finalidad:

- Completar las series hidrológicas de datos para mejorar el conocimiento, como una tarea sistemática.
- Incorporar registros extraordinarios o extremos a las series disponibles, para actualizar los resultados de la estadística.
- Validación de la información existente.
- Disponer de una base de datos de fácil acceso y correcta interpretación.
- Conformación de una nueva o primera base de datos.
- Actualización de los PADE
- Combinación de una o más finalidades

# ACTUALIZACION HIDROLOGICA

- Finalidad (1):
  - COMPLETAR LAS SERIES HIDROLÓGICAS DE DATOS PARA MEJORAR EL CONOCIMIENTO, COMO UNA TAREA SISTEMÁTICA:

Frecuencia de realización: Período constante, cada 5 años, por ejemplo.

Nota: es importante destacar cualquier modificación que se haya producido en el registro de información hidrológica (ubicación de la estación, tipo de estación, cambio de operador, cambio del intervalo de registro, etc)

# ACTUALIZACION HIDROLOGICA

– ¿Qué información actualizaríamos:

- Caudales y volúmenes ingresantes (medios diarios, mensuales, anuales)
- Crecidas (Duración, Caudal Pico, Volumen....gráficos)
- Movimientos de embalse
- Precipitaciones (intensidades, diarias, mensuales, anuales, relación área-duración-lámina, relación intensidad-duración-recurrencia, datos de nuevas estaciones, etc.)
- ¿ Imágenes satelitales ?
- ¿ Cambios en el uso del suelo de la cuenca ?
- Incorporación de nuevas herramientas informáticas para el manejo de la información: Sistemas de Información Geográfico. Estructura y osibilidades.

<b>CADILLAL</b>		Cota del Dia	Vol. Erogado por Val. Descarg.	Vol. Erogado por Val. 52"	Volumen Erogado por Val. de Vertedero	Volumen Erogado por Val. de 12"	Volumen Erogado por Val. de 14"	Nivel Evaporado	Volumen del Dique	Caida	Vol. Turbinado	Vol. Evaporado	Volumen Erogado por Vertedero
		m	Hm^3	Hm^3	Hm^3	Hm^3	Hm^3	mm	Hm^3	m	Hm^3	Hm^3	Hm^3
<b>ene-11</b>													
1	s	590,78	0,00	0,00	0,07	0,00	0,17	4,32	78,79	45,28	0,00	0,02	0,00
2	d	591,12	0,00	0,00	0,07	0,00	0,17	7,25	80,29	45,62	0,00	0,03	0,00
3	l	591,44	0,00	0,00	0,07	0,00	0,17	4,95	81,71	45,94	0,00	0,02	0,00
4	m	591,70	0,00	0,00	0,07	0,00	0,17	15,44	82,88	46,20	0,00	0,07	0,00
5	m	591,97	0,00	0,00	0,07	0,00	0,17	2,67	84,11	46,47	0,00	0,01	0,00
6	j	592,15	0,00	0,00	0,07	0,00	0,17	1,87	84,94	46,65	0,00	0,01	0,00
7	v	592,37	0,00	0,00	0,07	0,00	0,17	8,67	85,96	46,87	0,00	0,04	0,00
8	s	592,57	0,00	0,00	0,07	0,00	0,17	0,29	86,90	47,07	0,00	0,00	0,00
9	d	592,71	0,00	0,00	0,07	0,00	0,17	3,09	87,55	47,21	0,00	0,01	0,00
10	l	592,85	0,00	0,00	0,07	0,00	0,17	0,63	88,22	47,35	0,00	0,00	0,00
11	m	593,34	0,00	0,00	0,10	0,00	0,17	4,94	90,58	47,84	0,00	0,02	0,00
12	m	593,80	0,00	0,00	0,10	0,00	0,17	5,62	92,83	48,30	0,00	0,03	0,00
13	j	594,07	0,00	0,00	0,10	0,00	0,17	5,46	94,18	48,57	0,00	0,03	0,00
14	v	594,23	0,00	0,00	0,07	0,00	0,17	3,22	94,99	48,73	0,00	0,02	0,00
15	s	594,31	0,00	0,00	0,07	0,00	0,17	5,18	95,40	48,81	0,00	0,03	0,00

FUENTE: Hidroeléctrica Tucumán s.a.

# ACTUALIZACION HIDROLOGICA

- Finalidad (2):
  - INCORPORAR REGISTROS EXTRAORDINARIOS O EXTREMOS A LAS SERIES DISPONIBLES, PARA ACTUALIZAR LOS RESULTADOS DE LA ESTADÍSTICA.
  - Frecuencia de realización: cuando ocurre el fenómeno. Está influenciada por el cambio del clima, que ha traído ocurrencia de magnitudes más extremas y más frecuentes.
  - Nota: antes de incluir el registro se deberá validar la información, verificando el funcionamiento de la estación y analizando lo ocurrido en la zona de influencia. A su vez, antes de actualizar la estadística, proceder a realizar un análisis de outliers.

# ACTUALIZACION HIDROLOGICA

- Finalidad (3):
  - DISPONER DE UNA BASE DE DATOS DE FÁCIL ACCESO Y CORRECTA INTERPRETACIÓN.
  - Sistema de Información Geográfica
  - Gráficos
  - Intranet (manejo interno), Internet (publicación de datos).

Antes de comenzar el estudio, debemos hacernos algunas preguntas:

- ¿ Finalidad del estudio ?:
  - ACTUALIZACIÓN HIDROLÓGICA
  - **VERIFICACIÓN DE LA CRECIDA DE DISEÑO**
  - GENERAR UNA SERIE HIDROLÓGICA COMPLETA PARA SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE UN EMBALSE
  - AJUSTE DE UN MODELO DETERMINÍSTICO
  - APLICACIÓN DE UN NUEVO MODELO ESTADÍSTICO O DETERMINÍSTICO.

# VERIFICACIÓN DE LA CRECIDA DE DISEÑO

Debido a:

- La aparición de nuevos métodos (determinísticos, empíricos o estadísticos) o software para la determinación de parámetros de diseño (máxima probable, diseño para captaciones con garantía, diseño de aliviaderos, elaboración de manuales de operación de compuertas, etc). Recomiendo la lectura del siguiente doc: *Lopardo y Seoane. "Evolución en los criterios hidrológicos e hidráulicos de aliviaderos para el control de crecidas". V Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos hidroeléctricos. Tuc. 2010.*

*Continúa.....*

# VERIFICACIÓN DE LA CRECIDA DE DISEÑO

- ▶ La ocurrencia de un fuerte impacto ambiental o productivo sobre la cuenca, provocado por la naturaleza o la mano del hombre.
- ▶ La consecución de mejores y más datos por disponer de nuevas estaciones de registro (lluvias, caudales, imágenes satelitales).
- ▶ La aparición de un evento extremo extraordinario.
- ▶ Cambio en los estándares o categorizaciones en el diseño de obras con riesgo agua abajo.

*Ejemplos a continuación:*

# Escala de Diseño de Chow (1994)

<b>ESTRUCTURAS</b>	<b>RECURRENCIA (años)</b>	<b>% del VLE</b>
PEQUEÑAS	HASTA 200	ENTRE EL 75 Y EL 100% VLE
MEDIANAS	200 A 1000	ENTRE EL 60 Y EL 75% VLE
GRANDES	500 A VLE	HASTA EL 60% VLE

VLE: Valor Limite Estimado

VLE: definido como la máxima magnitud posible de un evento hidrológico en un lugar dado, empleando la mejor información hidrológica disponible. Ejemplos: PMP, TMP o CMP.

La PMP proporciona la altura de una lámina de agua, cuya distribución temporal es necesaria para formular la TMP, que puede emplearse como entrada en un modelo lluvia-caudal para determinar una CMP.

# Escala de diseño propuesta para la Provincia De Santa Fe:

<b>RIESGO DE PERDIDAS</b>	<b>RECURRENCIA (años)</b>	<b>% del VLE</b>
ECONOMICAS POCO SIGNIFICATIVAS	HASTA 10	HASTA EL 50% VLE
ECONOMICAS SIGNIFICATIVAS	10 A 100	ENTRE EL 50 Y EL 70% VLE
DE VIDAS HUMANAS O IMPACTO ECONOMICO IMPORTANTE EN AREAS URBANAS DE ESCASOS RECURSOS	100 A 1000	ENTRE EL 70 Y EL 100% VLE
VLE: Valor Limite Estimado		

# OTROS ESTANDARES

- ▶ “Norma del Servicio de Conservación de Recursos Naturales”, (USDA NRCS, 1960) de Estados Unidos, establece las disposiciones mínimas de diseño para los aliviaderos: recomienda la adopción de frecuencia de precipitaciones P100 (período de retorno de 100 años) y la PMP (Precipitación Máxima Probable), dependiendo del caso.
- ▶ Guía Técnica española (“Guía Técnica de Seguridad de Presas” Nº 4, recomienda para una presa de Categoría A cuya rotura puede afectar a núcleos urbanos o servicios esenciales, así como producir daños materiales o medioambientales muy importantes), adoptar un período de retorno mucho mayor a 100 años.

Criterios para la determinación del nivel de diseño (magnitud del evento hidrológico considerado).

Chow y otros; 1994

➤ APROXIMACIÓN EMPÍRICA

➤ ANÁLISIS DE RIESGO

➤ ANÁLISIS HIDROECONÓMICO

# 1. APROXIMACION EMPIRICA

- ▶ a. Basados en las experiencias: Pocos datos disponibles. Factores de seguridad.

- ▶ Adopción de un Factor de Seguridad (Fs)

$$Fs = Q_a / Q_d$$

- ▶ Determinación del Margen de Seguridad (Ms)

$$Fs = Q_a - Q_d$$

- ▶ b. Adopción del máximo evento registrado, determinándose la probabilidad de que el evento máximo de los últimos N años sea igualado o excedido una vez en los próximos n años.

$$P(x \geq X) = n / (n + N)$$

*ejemplo..*

## EL CADILLAL DEL ING. CARLOS WAUTERS (1903)

- ▶ Datos: utilizó los registros que tenía Miguel Lillo desde 1884 en San Miguel de Tucumán y los aforos del río se realizaban, desde el año 1900, en el Dique La Aguadita, cuyo máximo era de  $287 \text{ m}^3/\text{seg}$ .
- ▶ Analiza una tormenta de febrero de 1902 con 48mm caídos en media hora, otra de marzo de 1897 con 84mm caídos en una hora y otra de 157mm caídos en 10 horas en Marzo de 1889.
- ▶ Mediante cálculos arriba a la conclusión que el embalse podría recibir sin peligro una creciente de  $2.000 \text{ m}^3/\text{seg}$ . que durara no más de 7 horas o una de  $1.200 \text{ m}^3/\text{seg}$ . que durara más de 12 horas.

## 2. ANÁLISIS DE RIESGO:

probabilidad de falla.

- Determinamos la probabilidad **P** de que un evento de recurrencia **R** sea superado **k** veces durante los próximos **n** años:

$$P(R) = 1 - \frac{n!}{k!(n-k)!} (1-P)^{n-k} * P^k / (n + N)$$

- El mayor evento no será superado, entonces  $k=0$ , determinamos el Riesgo Natural:

$$R_m = 1 - (1 - P(x \geq X))^n$$

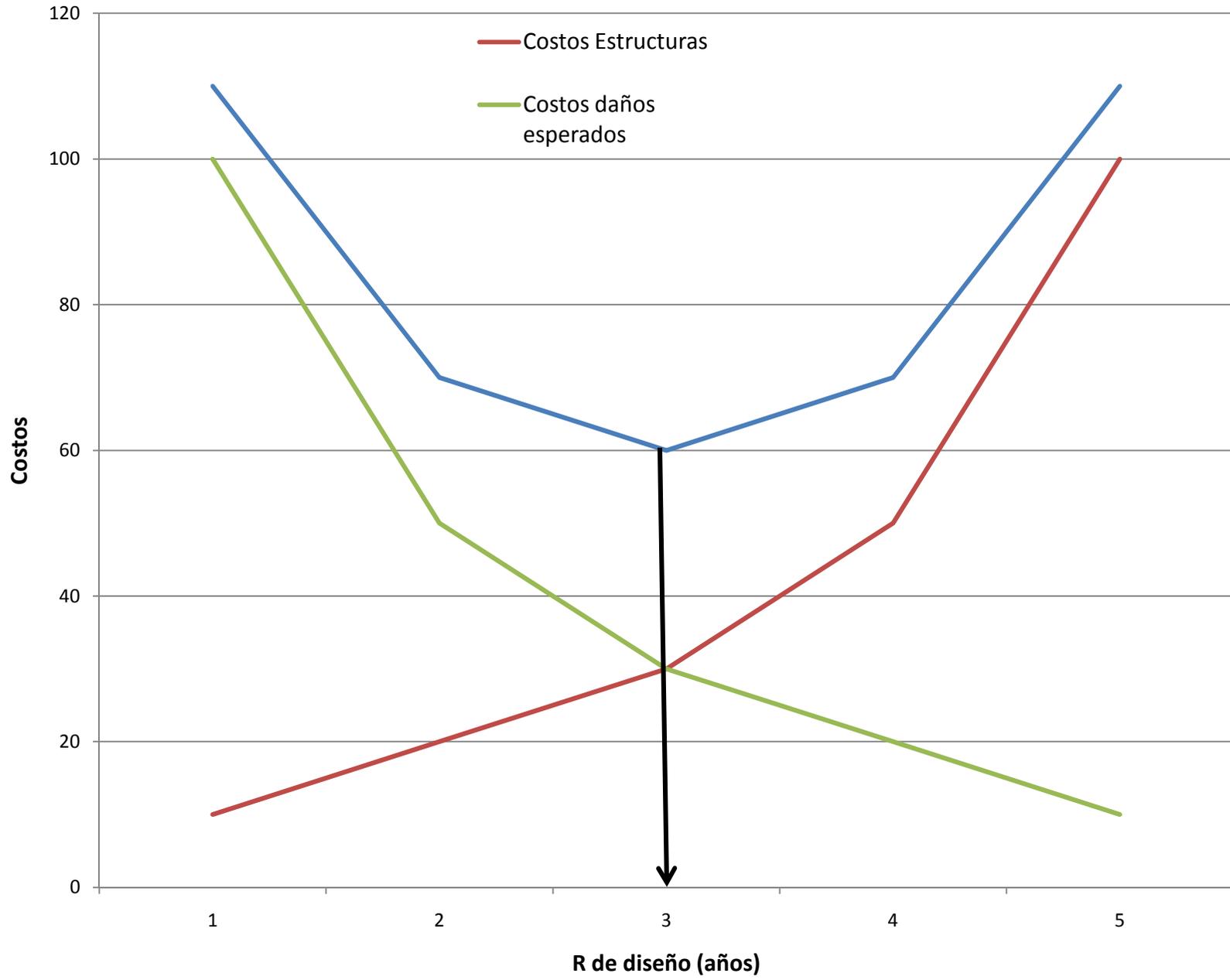
$R_m$  representa la probabilidad de que un evento ( $x \geq X$ ) ocurra por lo menos una vez en **n** años.

# 3. ANALISIS HIDROECONOMICO

- Se trata de obtener la recurrencia de diseño que optimice los costos y los beneficios, relacionando:

la Recurrencia del evento hidrológico,  
el costo de una solución ingenieril acorde y  
el costo de los daños por superación.

*Gráfico.....*



Antes de comenzar el estudio, debemos hacernos algunas preguntas:

- ¿ Finalidad del estudio ?:
  - ACTUALIZACIÓN HIDROLÓGICA
  - VERIFICACIÓN DE LA CRECIDA DE DISEÑO
  - **GENERAR UNA SERIE HIDROLÓGICA COMPLETA PARA SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE UN EMBALSE**
  - AJUSTE DE UN MODELO DETERMINÍSTICO
  - APLICACIÓN DE UN NUEVO MODELO ESTADÍSTICO O DETERMINÍSTICO.

► Relleno de series hidrológicas:

- 1) Correlación Simple - Relleno
- 2) Correlación Iterativa - Relleno
- 3) Markoviano - Relleno y Extensión
- 4) Thomas Fierin - Relleno y Extensión simétrica
- 5) Entre Estaciones - Relleno y Extensión
- 6) Precipitación Escorrentía - Relleno
- 7) Redes Neuronales Relleno y Extensión
- 8) Curva Másica - Relleno
- 9) Transposición Caudales Areas - Relleno y Extensión
- 10) Transposición Caudales Areas/Precipitación - Relleno y Extensión
- 11) 33%Precipitación - Relleno y Extensión
- 12) 21%Precipitación Relleno y Extensión.

**FUENTE: REVISIÓN DE METODOLOGÍAS PARA EXTENSIÓN Y RELLENO DE DATOS EN SERIES HISTÓRICAS, Y SU APLICACIÓN A LOS RÍOS DE EL SALVADOR. TRABAJO DE GRADUACIÓN PREPARADO PARA LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA PARA OPTAR AL GRADO DE INGENIERO CIVIL. KENNY JOHANNA BERCIÁN SOLÍS - KAREN IVETTE PALOMO RIVERA. OCTUBRE 2004. SAN SALVADOR, EL SALVADOR, C.A**

Antes de comenzar el estudio, debemos hacernos algunas preguntas:

- ¿ Finalidad del estudio ?:
  - ACTUALIZACIÓN HIDROLÓGICA
  - VERIFICACIÓN DE LA CRECIDA DE DISEÑO
  - GENERAR UNA SERIE HIDROLÓGICA COMPLETA PARA SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE UN EMBALSE
  - **AJUSTE DE UN MODELO DETERMINÍSTICO**
  - APLICACIÓN DE UN NUEVO MODELO ESTADÍSTICO O DETERMINÍSTICO.

# AJUSTE DE UN MODELO DETERMINISTICO

- Transformación lluvia-(parámetros)-caudal:

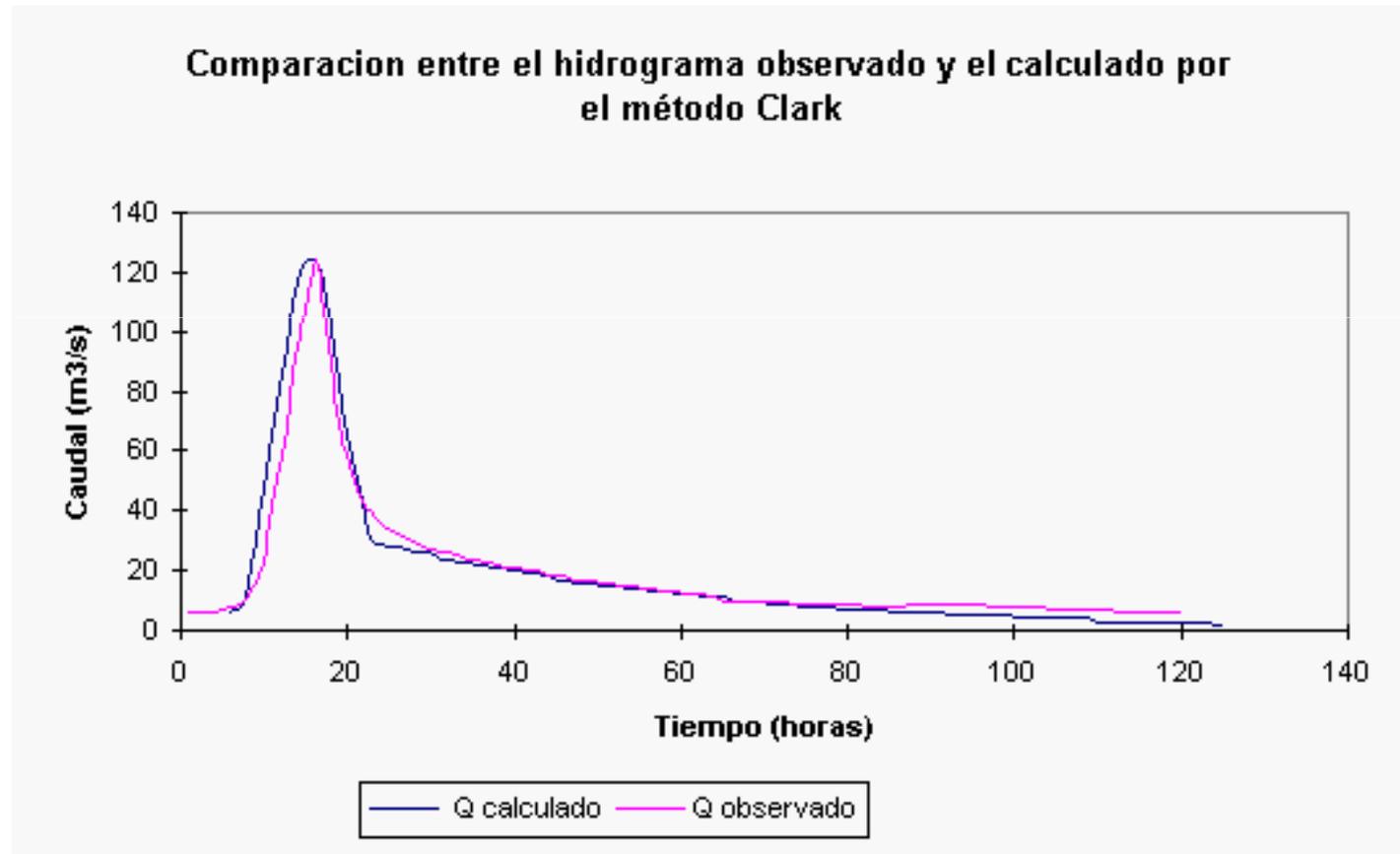
Hidrograma Unitario

Método de Clark

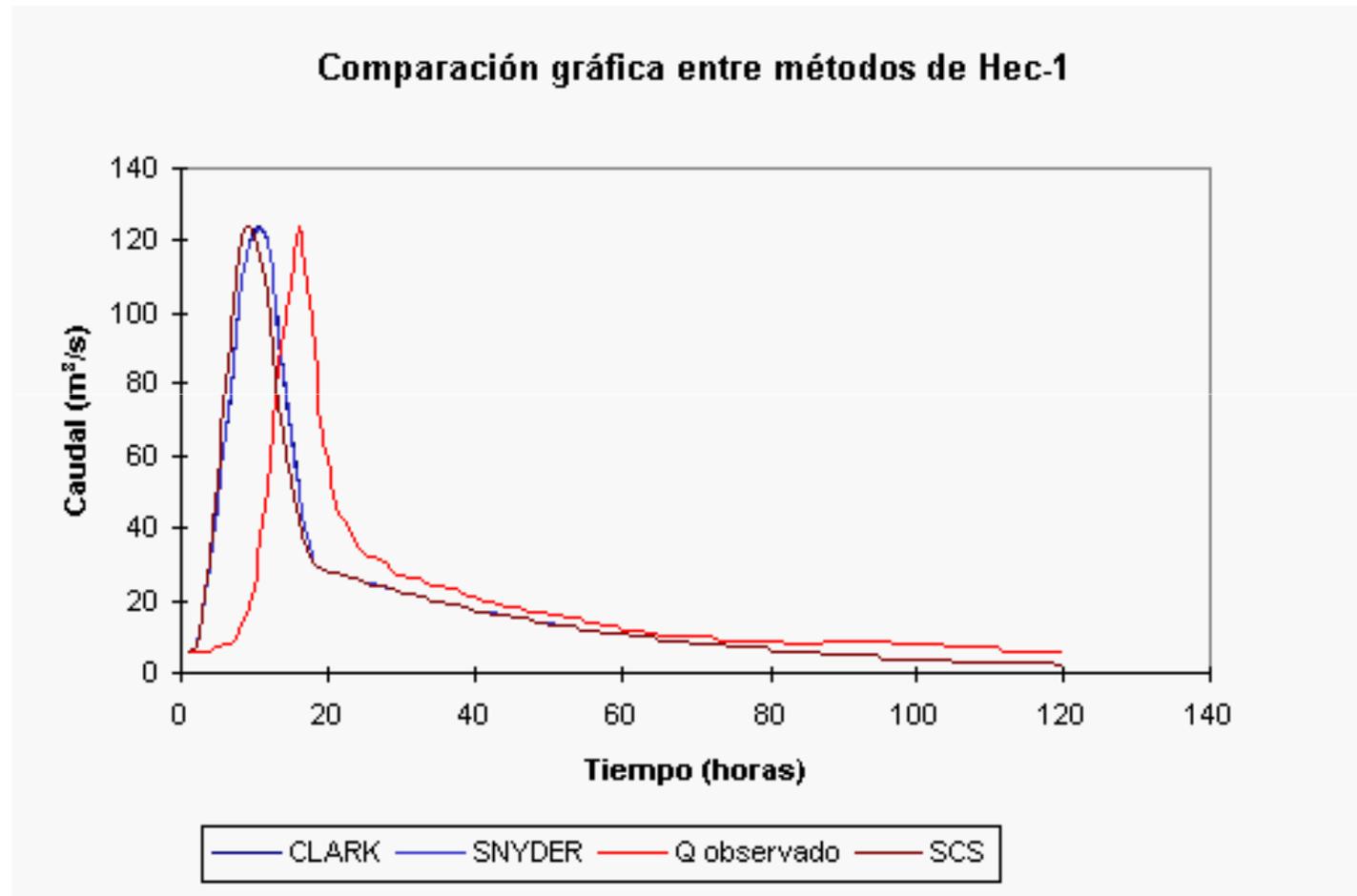
Método de Snyder

Hidrograma Adimensional SCS

Calibración u Optimización de los parámetros del modelo mediante comparación con nuevos hietogramas e hidrogramas registrados. Análisis de sensibilidad.



# Comparación de resultados con la aplicación de distintos modelos



# Mejor ajuste

- Se considera la mejor restitución aquella que minimiza un función objetiva que es la raíz cuadrada de la diferencia ponderada elevada al cuadrado entre los ordenadas del hidrograma observado y el calculado, presumiendo que la diferencia será mínima para las estimaciones óptimas de los parámetros.

# CAMBIO CLIMATICO

- Debemos tener en cuenta, en el planteo de escenarios hidrológicos, la aparición de anomalías provocadas por un fenómeno llamado “cambio climático”.
- Algunas publicaciones indican que éste fenómeno incide más en las regiones de clima árido y semiárido, tanto en excesos como en sequías.
- 2/3 del territorio de Argentina posee estas características.

# Primer Taller Regional sobre Adaptación y Mitigación del Cambio Climático

S.M. de Tucumán, 26 de septiembre de 2008

- ▶ El plenario coincide que ante los datos brindados por los conferencistas queda demostrado que el Cambio Climático (CC) está instalado en la región del Noroeste Argentino (NOA).
- ▶ Los datos brindados demuestran los efectos sinérgicos entre esta nueva situación y la topografía de la región.
- ▶ Frente a esta nueva situación, que implica un cambio en los patrones de precipitación y temperatura y que tiene una fuerte influencia a nivel de ecosistemas naturales y cultivados así como a nivel social y económico en general, se proponen una serie de medidas que implican adaptación, mitigación y políticas de instrumentación.

# EDUCACION Y COMUNICACIÓN AMBIENTAL

- ▶ Educación y concientización de la problemática en las diferentes áreas educativas (Mejoramiento de planes educativos)
- ▶ Mejorar la difusión sobre la nueva situación climática en la población
- ▶ Manifiesto público desde el plenario hacia la sociedad, expresando los peligros que implica la nueva situación climática.
- ▶ Promover la capacitación de planificación en caso de riesgo

# ORDENAMIENTO TERRITORIAL

- Sistematización de cuencas
- Creación de comité de cuencas locales
- Creación de área protegida por ej. Parque Aconquija

# FORESTACION

- Forestación en micro cuencas: generar información sobre cuencas a utilizar y priorizar en cuales trabajar
- Forestación con doble sentido: para secuestrar CO<sub>2</sub> y para contener inundaciones
- Insertar a la provincia en planes internacionales para la forestación
- Promover e incentivar la creación de viveros de arboles autóctonos para la reforestación

# REDES METEOROLOGICAS Y PLANES DE ALERTA TEMPRANA

- Desarrollar sistemas de alerta temprana.
- Instalación de radares en la provincia
- Planes concretos con Defensa Civil. Puntos básicos ante situaciones de peligro (por ej. Planes de Contingencia
- Incrementar la información meteorológica no sólo a nivel oficial sino a hacerla participe a la población

# LEGISLACION

- Respeto a las leyes que nos rigen en el presente.
- Incorporar la perspectiva del cambio climático a la regulación de los usos del suelo de la provincia
- Reglamentación de la Ley nº 7696, de Bienes de Uso en Zonas Inundables

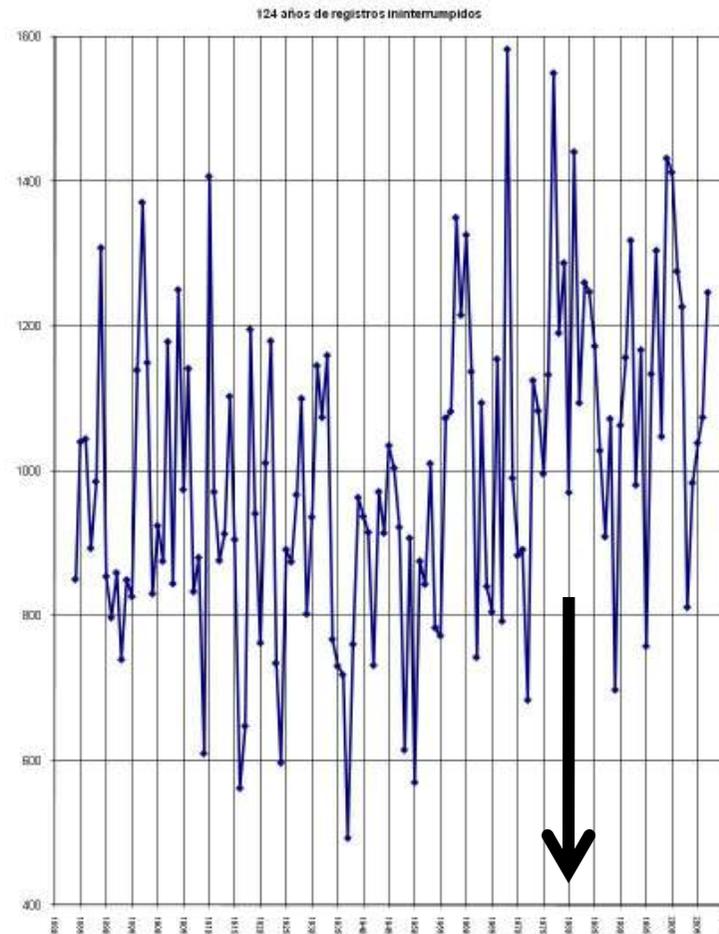
# MODELOS DE CONSUMO Y DE PRODUCCION

- Cambio en el consumo para producir el ahorro económico
- Uso de energías alternativas (caso de biogás en Tucumán)
- “Mejoramiento” en el tratamiento de residuos industriales

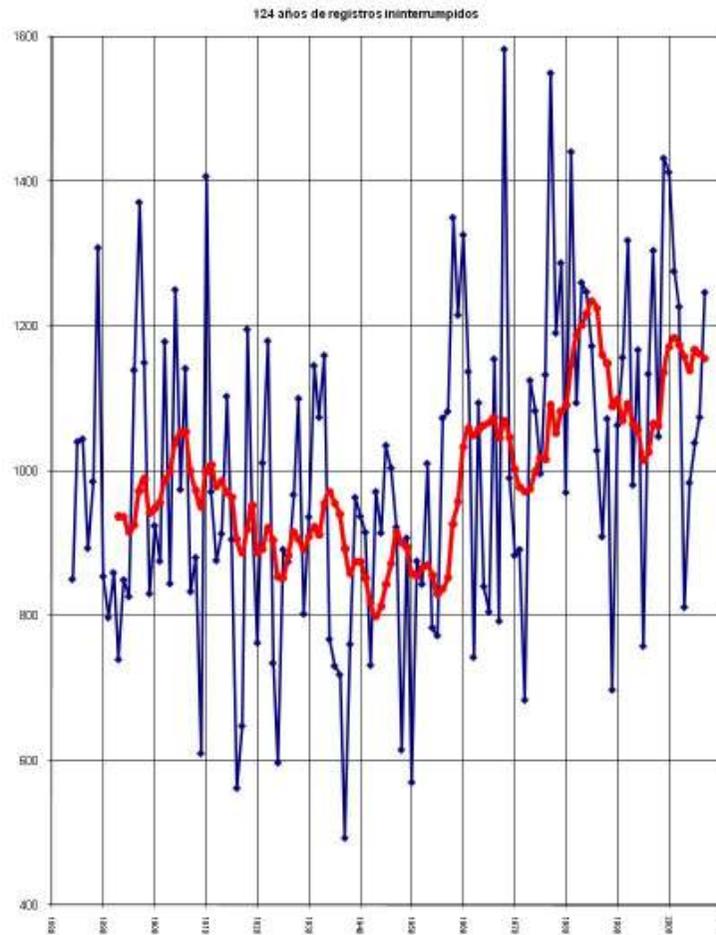
# FORTALECIMIENTO INSTITUCIONAL

- Fortalecer las instituciones relacionadas a riesgos ambientales
- Promover la creación de una institución coordinadora de prevención de riesgos ambientales a donde acudir en tal caso
- Crear un espacio real interdisciplinario e intersectorial

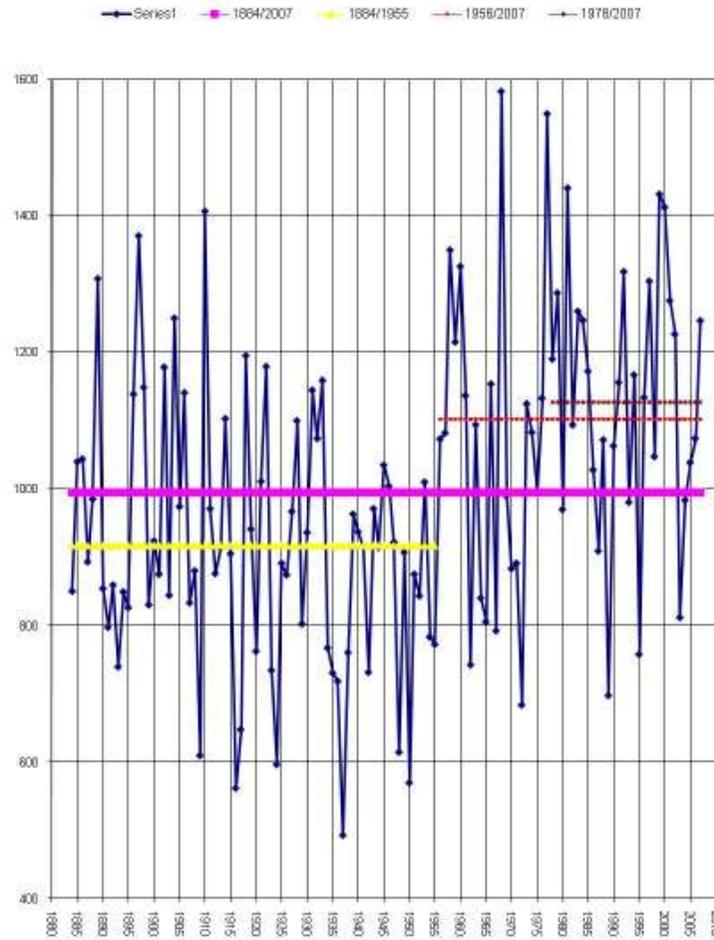
# En el NOA: salto climático en el año 1955



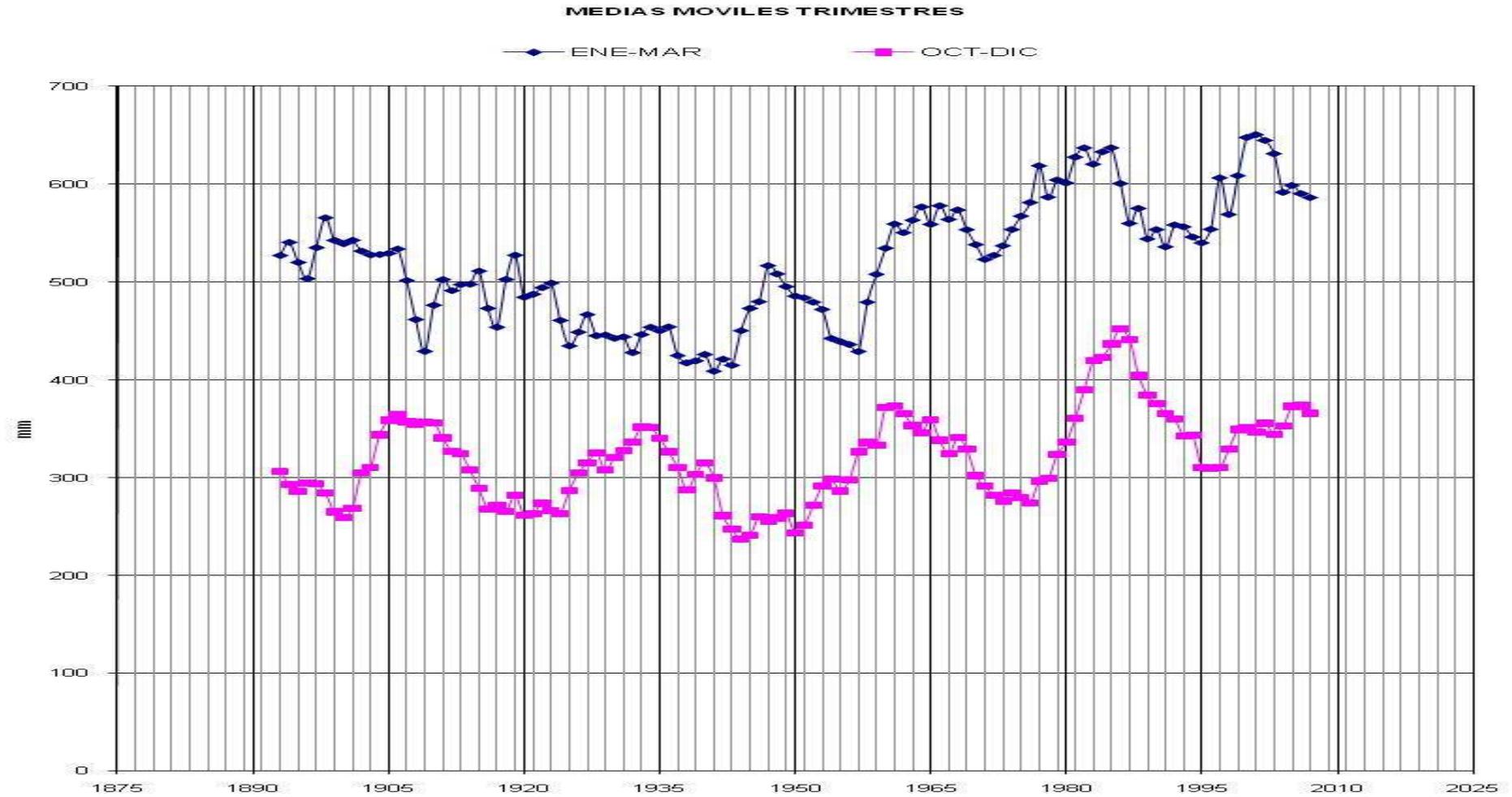
# MEDIAS MOVILES 10 AÑOS



# PROMEDIOS SEGÚN PERIODO



# LLUVIAS TRIMESTRALES



# EXTREMOS LLUVIOSOS

- Enero, promedio histórico: 195mm
- AÑO 1997
  - Enero 377, Febrero 356mm
- AÑO 2000
  - Enero 357, Febrero 355mm
- AÑO 2007
  - Enero 476 (max-maximorum ultimos 123 años),  
Febrero 356mm
- AÑO 2008
  - Enero 325mm

- Los **veranos de los años 2000, 2001, 2006 y 2007** fueron particularmente lluviosos, en cuanto a volumen, frecuencia e intensidad.
- En Concepción precipitaron 1350mm en el trimestre Enero-Marzo de 2000 (superando al máx-maximorum histórico de más de 70 años),
- 978mm **en 2001,**
- 800mm **en 2006 y**
- 943mm **en 2007,**
- Promedio histórico 551mm.

## Como ha influye esto en la hidrología de diseños?

- Eventos hidrológicos importantes en las presas de Tucumán:
  - 1984 en El Cadillal,
  - 2008 y 2011 en Rio Hondo,
  - 1992, 2006 y 2007 en Escaba.

# CONSIDERACIONES

- Debemos tenerse en cuenta que no solamente es importante la actualización hidrológica, sino COMO un evento impacta en la presa, inclusive ante cambios repentinos en las condiciones originales del complejo o de la cuenca.
- En los casos de presas con aporte nival, la situación es más compleja, ya que agrega una variable más para el análisis.
- Ni hablar de los sistemas de embalses en cadena, que requieren del planteo de distintos escenarios combinados, con un manejo de emergencia, y verificar el peor de los resultados, de difícil relación con la estadística.