

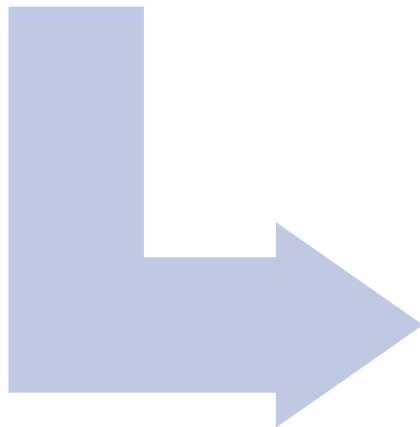
AVANCES EN LA REGLAMENTACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO BRAVO

Evaluación del esquema matemático para el cálculo de pérdidas y ganancias en la cuenca

EL MODELO MATEMÁTICO DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA DE LA CUENCA DEL RÍO BRAVO

¿Para qué lo queremos?
¿Por qué es necesaria su
dinamización?

**¿Qué debe cumplir el modelo
para que nos ayude a tomar
decisiones?**



- Un comportamiento **aceptable en el escenario histórico**
- Un comportamiento **aceptable en los escenarios alternos.**

PREÁMBULO

A continuación se demostrará que:

Aplicación Dinámica de la ecuación V_{pg}

- Tiene un comportamiento aceptable en el escenario histórico y está calibrado.
- Tiene un comportamiento aceptable en escenarios alternos y no genera ni destruye masa fuera de los rangos históricos.

Aplicación No Dinámica de la ecuación V_{pg}

- **NO** se comporta de forma aceptable en escenarios alternos. Destruye masa fuera del rango histórico de manera consistente
- Reproduce mejor la historia porque está ajustado para ello, disminuyendo su capacidad de simular escenarios alternos.

CONTENIDO

- Antecedentes
- Revisión del ejercicio del consultor
- Evaluación de la ecuación de pérdidas y ganancias
 - ❑ Prueba de Escenario Histórico: Hidrometría vs. Modelo (Dinámico y No Dinámico)
 - a) Correlaciones
 - b) Magnitud de error
 - ❑ Prueba de Escenarios Alternos
 - a) Evaluación de Consistencia
 - b) Evaluación de Variabilidad
 - c) Evaluación de Coherencia
- Conclusiones y recomendaciones

Durante la última sesión del GITT (08/11/2018), **los asesores del CCRB realizaron un ejercicio cuyo objetivo era demostrar la siguiente hipótesis:**

- El modelo en su etapa dinámica '*crea masa en el sistema*' para escenarios diferentes al histórico de calibración.

Derivado de esto, en el acuerdo GITT 2018.XI.08.-008 se estableció que: "La SGT revisará la prueba de balance y preservación de masas presentada por los asesores del CCRB..."

CÁLCULO DEL VOLUMEN DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS

La ecuación para el cálculo del volumen de pérdidas y ganancias (V_{pg}) de un tramo se define como:

$$V_{pg} = C_{ar} \cdot A_r + C_{ab} \cdot A_b + D \quad (1)$$

Sus características principales son ([Aldama, 2008](#); [Silva-Hidalgo, 2010](#)):

- Las pérdidas incluyen evaporación, infiltración y extracciones no contabilizadas.
- Las ganancias incluyen escurrimiento base y efecto tardío en retornos de riego.
- El modelo es simple y está en términos de los volúmenes aguas arriba y abajo.
- La naturaleza del modelo **hace indivisibles las pérdidas de las ganancias y más bien las representa en forma agrupada**, ya sea como pérdidas netas o ganancias netas.

CÁLCULO DEL VOLUMEN DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS

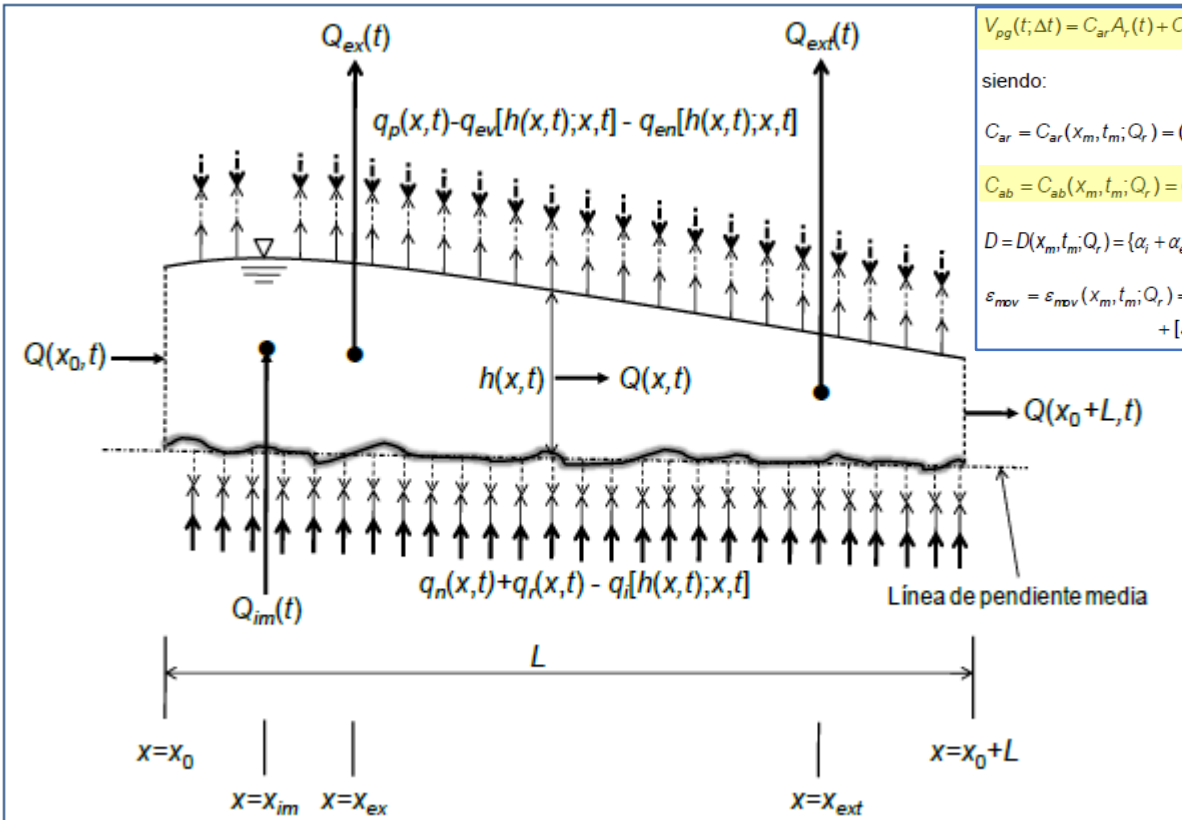


Figura 7.17. Gastos de ingreso y egreso de un tramo de cauce.

$$V_{pg}(t, \Delta t) = C_{ar} A_r(t) + C_{ab} \bar{A}_b(t) + D - \varepsilon_{mov} \quad (7.79)$$

siendo:

$$C_{ar} = C_{ar}(x_m, t_m; Q_r) = (\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub}) \bar{h}'(Q_r) \mu L \quad (7.80)$$

$$C_{ab} = C_{ab}(x_m, t_m; Q_r) = (\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub}) \bar{h}'(Q_r) \nu L \quad (7.81)$$

$$D = D(x_m, t_m; Q_r) = \{\alpha_i + \alpha_{ev} + \alpha_{en} - \alpha_{sub} + (\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub}) [h_r - \bar{h}'(Q_r) Q_r] L\} \Delta t \quad (7.82)$$

$$\varepsilon_{mov} = \varepsilon_{mov}(x_m, t_m; Q_r) = \{r_i + r_{ev} + r_{en} - r_{sub} + [\varepsilon_{moh} + r_h + \bar{h}'(Q_r) + \varepsilon_{apq} L] (\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub})\} L \Delta t \quad (7.83)$$

El término C_{ab} es un parámetro que depende de todos los procesos que ocurren a lo largo de un tramo y **NO sólo al flujo base.**

$$V_{pg}(t, \Delta t) = C_{ar} A_r(t) + C_{ab} \bar{A}_b(t) + D - \varepsilon_{mov}$$

$$C_{ab} = C_{ab}(x_m, t_m; Q_r) = (\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub}) \bar{h}'(Q_r) \nu L$$

CÁLCULO DEL VOLUMEN DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS

Dado que el valor final del **volumen Ab depende de las pérdidas y ganancias del tramo**, la ecuación (1) tiene dos incógnitas: V_{pg} y Ab .

Actualmente existen dos planteamientos para resolver el problema:

- **Aplicación Dinámica.** Se plantea la ecuación de balance hidrológico para calcular Ab y se resuelve el sistema simultáneo (dos ecuaciones, dos incógnitas):

$$V_{pg} = C_{ar} \cdot Ar + C_{ab} \cdot Ab + D \quad (1)$$

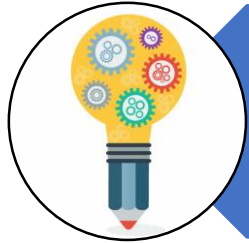
$$Ab = Ar + E_{cp} + Re - Ext + V_{pg} \quad (2)$$

- **Aplicación No Dinámica:** Se usan los valores históricos de Ab (el término $C_{ab} \cdot Ab$ se vuelve fijo con un valor diferente para cada mes de cada año de registro), y se resuelve la ecuación con Ar como única variable.

$$V_{pg} = C_{ar} \cdot Ar + C_{ab} \cdot Ab + D \quad (3)$$

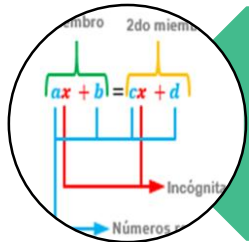
$$C_{ab} \cdot Ab = \text{fijo} \quad (4)$$

ANÁLISIS DE LA HIPÓTESIS DE LOS ASESORES



Análisis Conceptual

Se desarrollan y analizan a continuación



Planteamiento Matemático

Enfoque principal del ejercicio de los asesores



Pruebas Numéricas

ANÁLISIS DE LA HIPÓTESIS DE LOS ASESORES



Para demostrar su hipótesis, los asesores del CCRB plantean un **ejercicio para comparar escenarios con variaciones del volumen Ar** y evalúan la redistribución de volúmenes en el tramo.

El desarrollo del ejercicio se puede dividir en 3 pasos:

1. Se incrementa el Ar en 0%, 20% y 50%, y se simula el tramo en análisis.
2. Se disgregan los términos del balance incluyendo la ecuación de pérdidas y ganancias, y se agrupan los volúmenes con signo positivo (se asumen como entradas al sistema).
3. Se comparan las Entradas Totales en los volúmenes redistribuidos.

Asimismo, plantean la siguiente proposición como evidente:

Para un escenario con incremento en Ar, el aumento en la entrada total está dado únicamente por dicho incremento.

ANÁLISIS DE LA HIPÓTESIS DE LOS ASESORES

Perspectiva del análisis

$$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} V_{pg}^{\dagger}$$

$$C_{ab} \cdot \text{Ab}$$

$$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} V_{pg}$$

$$C_{ar} \cdot Ar + D$$

Entonces si se acepta la proposición anterior como cierta: **implícitamente se acepta que para cualquier estimulación del volumen aguas arriba (incluso si $\Delta Ar_n \rightarrow \infty$), el volumen aguas abajo siempre será el mismo.**

Ab

[†]Consideraciones del ejercicio

1. Disgregación de V_{pg}
2. $C_{ab} \cdot Ab$ Positivo (SC5)
3. $C_{ab} \cdot Ab$ Fijo (En el ND)

Cuenca Propia

ANÁLISIS CONCEPTUAL

ANÁLISIS DE LA HIPÓTESIS DE LOS ASESORES

El planteamiento del ejercicio puede expresarse como:

$$(E_T)_n = (E_T)_o + \Delta Ar_n \quad (5)$$

En donde:

$$(E_T)_n = Ar_o + \Delta Ar_n + Ecp_n + Re_n + (C_{ab} \cdot Ab)_n \quad (6)$$

$$(E_T)_o = Ar_o + Ecp_o + Re_o + (C_{ab} \cdot Ab)_o \quad (7)$$

Sustituyendo (6) y (7) en (5), se obtiene:

$$\cancel{Ar_o} + \cancel{\Delta Ar_n} + Ecp_n + Re_n + (C_{ab} \cdot Ab)_n = \cancel{Ar_o} + Ecp_o + Re_o + (C_{ab} \cdot Ab)_o + \cancel{\Delta Ar_n} \quad (8)$$

Y simplificando (8):

$$Ecp_o + Re_o + (C_{ab} \cdot Ab)_o = Ecp_n + Re_n + (C_{ab} \cdot Ab)_n \quad (9)$$

ANÁLISIS DE LA HIPÓTESIS DE LOS ASESORES

Mediante una inspección de la ecuación (9) se puede establecer lo siguiente:

$$\cancel{Ecp_o} + \cancel{Re_o} + (C_{ab} \cdot Ab)_o = \cancel{Ecp_n} + \cancel{Re_n} + (C_{ab} \cdot Ab)_n \quad (9)$$

$$Ecp_o = Ecp_n \quad (10)$$

$$Re_o = Re_n \quad (11)$$

- La ecuación (10) es válida, dado que la estimulación del volumen ΔAr_n no incluye aumentos en el escurrimiento por cuenca propia.
- La ecuación (11) es válida ya que el volumen de retorno es una fracción de la concesión. La concesión es fija y no aumenta al estimular Ar .

La ecuación (9) es entonces:

$$(C_{ab} \cdot Ab)_o = (C_{ab} \cdot Ab)_n \quad (12)$$

ANÁLISIS DE LA HIPÓTESIS DE LOS ASESORES

Dado que **el término C_{ab} es un parámetro propio del tramo y determinado empíricamente durante el proceso de calibración**, su valor no depende de la estimulación del volumen aguas arriba; por tanto la forma final de la ecuación (12) es:

$$Ab_o = Ab_n \quad (13)$$

La ecuación (13) **representa matemáticamente**, la proposición planteada como evidente para el ejercicio de los asesores: *“Para un escenario con incremento en Ar , el aumento en la entrada total está dado únicamente por dicho incremento”*.

Entonces si se acepta dicha proposición como cierta: **implícitamente se acepta que para cualquier estimulación del volumen aguas arriba (incluso si $\Delta Ar_n \rightarrow \infty$), el volumen aguas abajo siempre será el mismo.**

IMPLICACIONES DE LA APLICACIÓN DEL EJERCICIO

Retomando la ecuación (12):

$$(C_{ab} \cdot Ab)_o = (C_{ab} \cdot Ab)_n \quad (12)$$

Establece que para cualquier escenario, **el término $C_{ab} \cdot Ab$ es fijo.**

Esta afirmación es igual al planteamiento de la aplicación No Dinámica expuesto en las ecuaciones (3) y (4):

$$V_{pg} = C_{ar} \cdot Ar + C_{ab} Ab + D \quad (3)$$

$$C_{ab} Ab = \textit{constante} \quad (4)$$

Por tanto, al realizar el ejercicio con el Modelo No Dinámico se cumple la proposición y hace parecer verosímil **que para cualquier estimulación del volumen aguas arriba, el volumen aguas abajo siempre será el mismo.**

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ASESORES

CORRIDA	ENTRADAS (hm ³)				SALIDAS (hm ³)			MODELO V _{pg} (hm ³)		
	Ar _o	ΔAr _n	Ecp _n	Re _n	Ext _n	V _{pg}	Ab	C _{ar} ·Ar	C _{ab} ·Ab	D
Vpg No Dinámico (Ar)	12.6173	0.0000	4.8593	0.5794	2.7780	-2.4881	12.9428	-3.1130	1.3932	-0.7684
Vpg No Dinámico (Ar+20%)	12.6173	2.5235	4.8593	0.5874	2.8092	-3.1372	14.7292	-3.7620	1.3932	-0.7684
Vpg No Dinámico (Ar+50%)	12.6173	6.3086	4.8593	0.5968	2.8429	-4.1544	17.4460	-4.7552	1.3932	-0.7684
Vpg Dinámico (Ar)	12.6572	0.0000	4.8593	0.5743	2.7511	-0.6529	15.1540	-3.1255	3.6828	-0.7684
Vpg Dinámico (Ar+20%)	12.6572	2.5314	4.8593	0.5804	2.7747	-0.5024	17.6289	-3.7770	4.3826	-0.7684
Vpg Dinámico (Ar+50%)	12.6572	6.3286	4.8593	0.5865	2.7968	-0.2630	21.5758	-4.7474	5.6405	-0.7684

La condición de frontera no es la misma para ambas pruebas.

Como consecuencia, las extracciones y retornos varían entre pruebas.

El ejercicio realmente solo compara el valor de **C_{ab}·Ab** entre ambas versiones de la ecuación de Vpg.

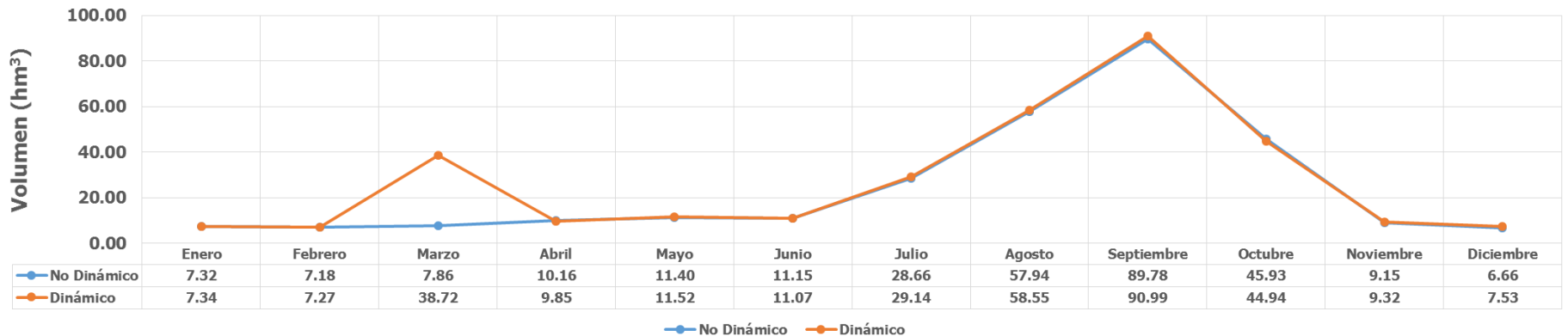
Se observa que los volúmenes de pérdida son mayores en la aplicación No Dinámica.

- **Los resultados presentados se realizan con el volumen medio global (59 años).**
- **Es recomendable identificar las inconsistencias mediante un análisis mes a mes.**

ANÁLISIS MES A MES

ANÁLISIS NO DINÁMICO										
Ar	Ecp	Re	Ext	Vg	Vp	Ab	ENT TOTAL	SAL TOTAL		
hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	
Enero	1	6.453	0.674	0.161	0.808	0.034	-2.893	3.630	7.322	7.331
Febrero	2	5.602	0.862	0.706	2.060	0.011	-1.987	2.225	7.182	7.101
ANÁLISIS NO DINÁMICO										
Ar	Ecp	Re	Ext	Vg	Vp	Ab	ENT TOTAL	SAL TOTAL		
hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	
Marzo	3	5.832	1.315	0.714	3.298	0.001	-2.285	2.297	7.863	7.881
ANÁLISIS DINÁMICO										
Ar	Ecp	Re	Ext	Vg	Vp	Ab	ENT TOTAL	SAL TOTAL		
hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	hm3/mes	
Marzo	3	5.920	1.315	0.726	3.335	30.756	-0.742	35.338	38.717	39.415
Noviembre	11	8.112	0.970	0.000	0.114	0.063	-4.840	4.190	9.145	9.145
Diciembre	12	6.416	0.236	0.000	0.058	0.012	-5.710	0.896	6.664	6.664

ANÁLISIS MENSUAL DE ENTRADAS TOTALES



Septiembre	9	69.888	20.360	0.641	3.341	0.105	-4.782	83.140	90.993	91.264
Octubre	10	35.048	9.588	0.257	1.226	0.044	-1.545	42.171	44.938	44.942
Noviembre	11	8.226	0.970	0.000	0.114	0.125	-3.428	5.779	9.321	9.321
Diciembre	12	6.418	0.236	0.000	0.058	0.878	-4.148	3.327	7.532	7.532

CONCLUSIONES DEL EJERCICIO DE LOS ASESORES

- **No es coherente con el principio de conservación de masa.**
- Establece que el volumen aguas abajo debe ser fijo en cada escenario e independiente del volumen aguas arriba.
- La hipótesis solo funciona para las ecuaciones No Dinámicas y a su vez expone la deficiencia/limitación para escenarios alternos usando el $C_{ab}Ab$ fijo.
- El planteamiento del ejercicio no es suficiente para demostrar la '*generación o destrucción de masa*' en el sistema y fortuitamente muestra que la SC5 presenta inconsistencias puntuales (marzo). Esto no desacredita/invalida la aplicación Dinámica de las ecuaciones.
- No permite afirmar a priori que el comportamiento será el mismo para todas las subcuencas del sistema.

CONCLUSIONES DEL EJERCICIO DE LOS ASESORES

- Con base en la información bibliográfica, se puede observar que la propuesta No Dinámica no emplea la ecuación de pérdidas y ganancias conforme al planteamiento matemático y la metodología de aplicación, la cual fue aceptada en el seno del GEM en septiembre de 2010 (Acuerdo 2010.VIII.001).
- **Asume los valores del modelo No Dinámico como punto de referencia. LA COMPARACIÓN DEBE HACERSE CONTRA DATOS OBSERVADOS/MEDIDOS (HIDROMETRÍA)**
- La naturaleza de la parametrización original **hace indivisibles las pérdidas de las ganancias y más bien las representa en forma agrupada**, ya sea como pérdidas netas o ganancias netas (Aldama, 2008; Silva-Hidalgo, 2010).

EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS

EVALUACIÓN DEL MODELO

Se diseñaron experimentos para evaluar el desempeño del modelo bajo dos circunstancias:



Escenario
Histórico



Escenarios
Alternos

VALIDACIÓN DEL MODELO

EVALUACIÓN DEL MODELO: DESEMPEÑO HISTÓRICO

Para esta prueba, se usó la información hidrométrica histórica para establecer los volúmenes Aguas Arriba (Ar) en el modelo y se simularon los volúmenes de escurrimientos Aguas Abajo (Ab). Con los resultados obtenidos de Ab, se evaluó lo siguiente:

Se evaluaron dos indicadores:

1. La correlación de los escurrimientos aguas abajo Simulados vs Observado (Hidrometría)
2. La raíz del error cuadrático medio por cada subcuenca y mes durante los 59 años de modelación.

$$RECM_i^j = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{59} ((Ab_{Sim} - Ab_{Obs})^2)}{59}}$$

EVALUACIÓN DEL MODELO: DESEMPEÑO HISTÓRICO

Correlaciones Ab: Simulado vs Hidrometría (216 meses en las SC antes de Falcón)

No Dinámico: 55 meses con correlación menor a 0.70
Correlación global de 0.80

	SC1	SC2																SC28 I	SC29
Enero	0.985264	0.9969																0.688249	0.104065
Febrero	0.976353	0.9981																0.798362	0.13041
Marzo	0.942419	0.9952																0.379027	0.280979
Abril	0.970166	0.9986																0.667348	0.078058
Mayo	0.969475	0.990876	0.907029	0.483047	0.208713	0.352379	0.984379	0.995989	0.472481	0.999639	0.998836	0.967309	0.997983	0.998426	0.999468	0.419145		0.704022	0.042977
Junio	0.957766	0.972193	0.823746	0.881597	0.422392	0.363302	0.936794	0.995405	0.952497	0.999945	0.999832	0.997128	0.999663	0.999677	0.993926	0.143709		0.675654	0.11433
Julio	0.986587	0.9808																0.883998	0.106599
Agosto	0.920053	0.9746																0.789385	0.322875
Septiembre	0.922086	0.9396																0.972698	0.219015
Octubre	0.990481	0.9472																0.880319	0.758869
Noviembre	0.993254	0.9923																0.540315	0.705511
Diciembre	0.996126	0.9985																0.486609	0.497944

El modelo para ambos casos (V_{pg} Dinámico y No Dinámico) está calibrado

El modelo al usar la ecuación V_{pg} No Dinámica es **incapaz de calcular el volumen aguas abajo (Ab)** para su uso en el cálculo del V_{pg} .

Dinámico: 55 meses con correlación menor a 0.70
Correlación global de 0.77

	SC1	SC2																SC28 I	SC29
Enero	0.97455	0.9859																0.683331	0.097451
Febrero	0.939195	0.9968																0.776251	0.132943
Marzo	0.138993	0.9800																0.212485	0.256486
Abril	0.860538	0.8699																0.630179	0.048309
Mayo	0.829503	0.9052																0.690431	0.042939
Junio	0.178792	0.9292																0.668295	0.076356
Julio	0.687425	0.8557																0.883969	0.110742
Agosto	0.618042	0.930345	0.925127	0.971146	0.823099	0.840975	0.956185	0.985941	4.22E-03	0.999262	0.997249	0.96598	0.99442	0.995993	0.993511	0.177621		0.789299	0.297141
Septiembre	0.813746	0.919014	0.992684	0.994369	0.95468	0.956445	0.957169	0.993065	0.709952	0.999697	0.997562	0.921172	0.996643	0.997971	0.996576	0.077333		0.972698	0.199999
Octubre	0.986193	0.927598	0.986963	0.993935	0.911675	0.721588	0.994309	0.997126	0.758151	0.999798	0.999121	0.916695	0.995148	0.998294	0.99972	0.440514		0.880319	0.680607
Noviembre	0.990369	0.984909	0.940997	0.931817	0.834374	0.667312	0.875559	0.995121	0.228002	0.999848	0.998408	0.939936	0.995585	0.99325	0.998002	0.682777		0.540315	0.650144
Diciembre	0.994254	0.986879	0.965563	0.065054	0.959764	0.191396	0.967773	0.997112	0.346581	0.99818	0.996346	0.910442	0.985829	0.896082	0.991863	0.558466		0.480409	0.450795

En consecuencia, alcanza su calibración haciendo uso de **708 términos premultiplicados $C_{ab}Ab$** para cada subcuena. Solución que es válida solo para el escenario histórico, dado que se conoce la hidrometría.

EVALUACIÓN DEL MODELO: HIPÓTESIS INICIALES

Para **conocer el desempeño del modelo en escenarios alternos**, se realizó un análisis donde se estimula el sistema con incrementos de volumen A_r en todas las subcuencas. Dichos incrementos varían de 0 al máximo rango histórico registrado por subcuenca y por mes.

Las hipótesis planteadas para el ejercicio son las siguientes:

- Los coeficientes C_{ar} , C_{ab} y D están definidos adecuadamente, como resultado del proceso de calibración.
- Los valores de V_{pg} , A_r y A_b deben ajustarse a la ecuación de pérdidas y ganancias de forma consistente y coherente.

EVALUACIÓN DEL MODELO: DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Se extraen los valores de Ar, Ab y Vpg de todas las subcuencas

Slot Name	Value	Units
Ar_SC	0.00	1e+06 m3/month
Ab_SC	NaN	1e+06 m3/month
Vpg_SC	NaN	1e+06 m3/month

	SC1 1e+06 m3/month	SC2 1e+06 m3/month	SC4 1e+06 m3/month	SC5 1e+06 m3/month	SC6 1e+06 m3/month
01-1950	NaN O	NaN O	NaN O	NaN O	NaN O
02-1950	-3.55 R 277	-0.17 R 277	-0.05 R 277	0.18 R 277	0.00 R 277
03-1950	-9.70 R 277	-0.07 R 277	-0.17 R 277	15.90 R 277	0.00 R 277
04-1950	-4.52 R 277	0.04 R 277	-0.15 R 277	-1.07 R 277	0.00 R 277
05-1950	-4.43 R 277	0.01 R 277	-0.19 R 277	0.75 R 277	0.00 R 277
06-1950	8.69 R 277	0.00 R 277	0.32 R 277	-0.12 R 277	0.00 R 277
07-1950	9.01 R 277	-0.12 R 277	0.40 R 277	-1.05 R 277	0.00 R 277
08-1950	-0.43 R 277	-0.07 R 277	2.79 R 277	-3.69 R 277	0.00 R 277
09-1950	-3.84 R 277	-0.03 R 277	-0.48 R 277	-3.88 R 277	0.00 R 277
10-1950	-2.63 R 277	0.56 R 277	-0.02 R 277	-1.58 R 277	0.00 R 277
11-1950	-1.81 R 277	-0.40 R 277	-0.02 R 277	-0.23 R 277	0.00 R 277
12-1950	-1.13 R 277	-0.20 R 277	-0.00 R 277	0.59 R 277	0.00 R 277
01-1951	-2.98 R 277	-0.09 R 277	-0.03 R 277	-0.40 R 277	0.00 R 277
02-1951	-0.52 R 277	-0.21 R 277	-0.22 R 277	0.08 R 277	0.00 R 277
03-1951	-2.89 R 277	-0.17 R 277	-0.22 R 277	6.52 R 277	0.00 R 277
04-1951	0.67 R 277	-0.01 R 277	-0.47 R 277	-0.94 R 277	0.00 R 277
05-1951	-3.10 R 277	0.14 R 277	-0.24 R 277	0.24 R 277	0.00 R 277

Los resultados se organizan y analizan en un postproceso

Variable GainLoss Coeff	NaN	decimal
Total GainLoss	NaN	1e+06 m3/month
Unidentified Loss	NaN	1e+06 m3/month

EVALUACIÓN DEL MODELO: LA CONCEPCIÓN DEL PLANO

Para demostrar las hipótesis anteriores, el planteamiento de este nuevo análisis propone los siguientes considerandos:

1. La ecuación de pérdidas y ganancias puede ser representada como una función del plano en tres ejes: A_r , A_b y V_{pg} .
2. La geometría del plano depende de los coeficientes C_{ar} , C_{ab} y D .

$$V_{pg} = C_{ar} \cdot A_r + C_{ab} \cdot A_b + D \quad (a)$$

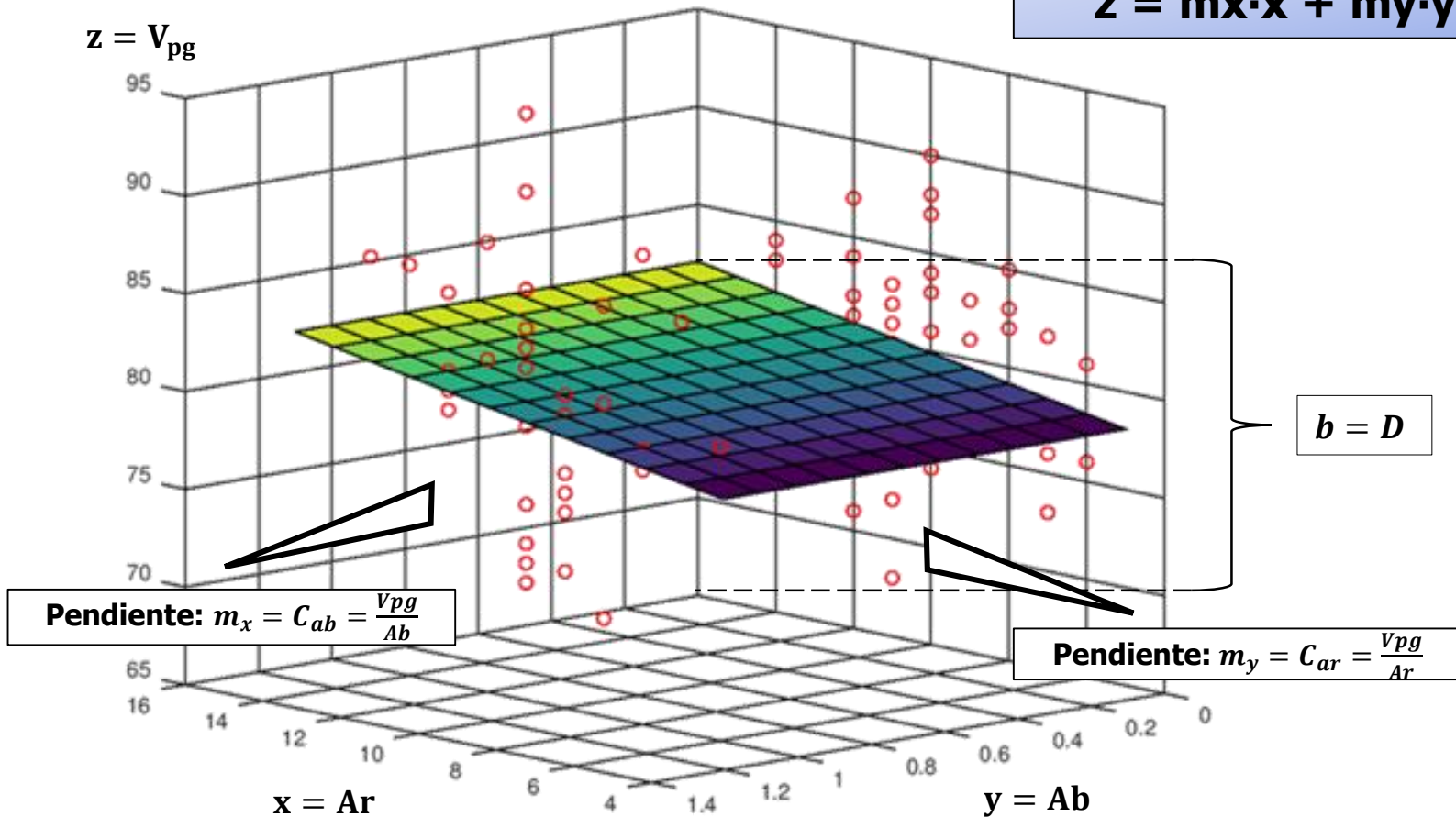
$$z = m_x \cdot x + m_y \cdot y + b \quad (b)$$

3. Los valores de los coeficientes son resultado de la calibración y por tanto, el plano es el punto de referencia para evaluar la creación o destrucción de masa en el modelo.

EVALUACIÓN DEL MODELO: LA CONCEPCIÓN DEL PLANO

$$V_{pg} = C_{ar} \cdot Ar + C_{ab} \cdot Ab + D$$

$$z = m_x \cdot x + m_y \cdot y + b$$

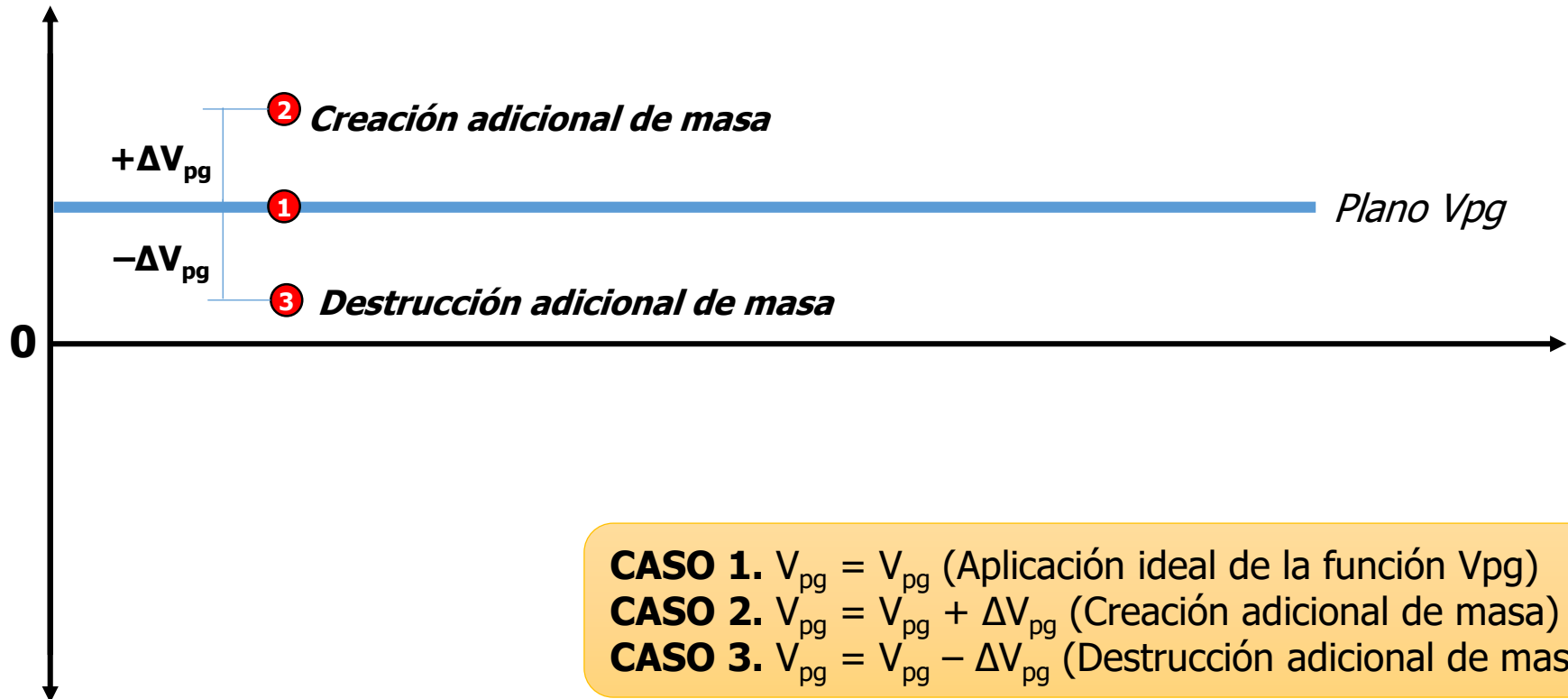


El plano V_{pg} es la representación gráfica del modelo de pérdidas y ganancias cuyos coeficientes fueron caracterizados con los datos hidrométricos.

EVALUACIÓN DEL MODELO: INTERPRETACIÓN DEL PLANO

Sea el modelo de pérdidas y ganancias equivalente a una función del plano:

$$V_{pg} = C_{ar} \cdot Ar + C_{ab} \cdot Ab + D \equiv m_x \cdot x + m_y \cdot y + b \quad (c)$$



- CASO 1.** $V_{pg} = V_{pg}$ (Aplicación ideal de la función V_{pg})
CASO 2. $V_{pg} = V_{pg} + \Delta V_{pg}$ (Creación adicional de masa)
CASO 3. $V_{pg} = V_{pg} - \Delta V_{pg}$ (Destrucción adicional de masa)

EVALUACIÓN DE LAS SUBCUENCAS

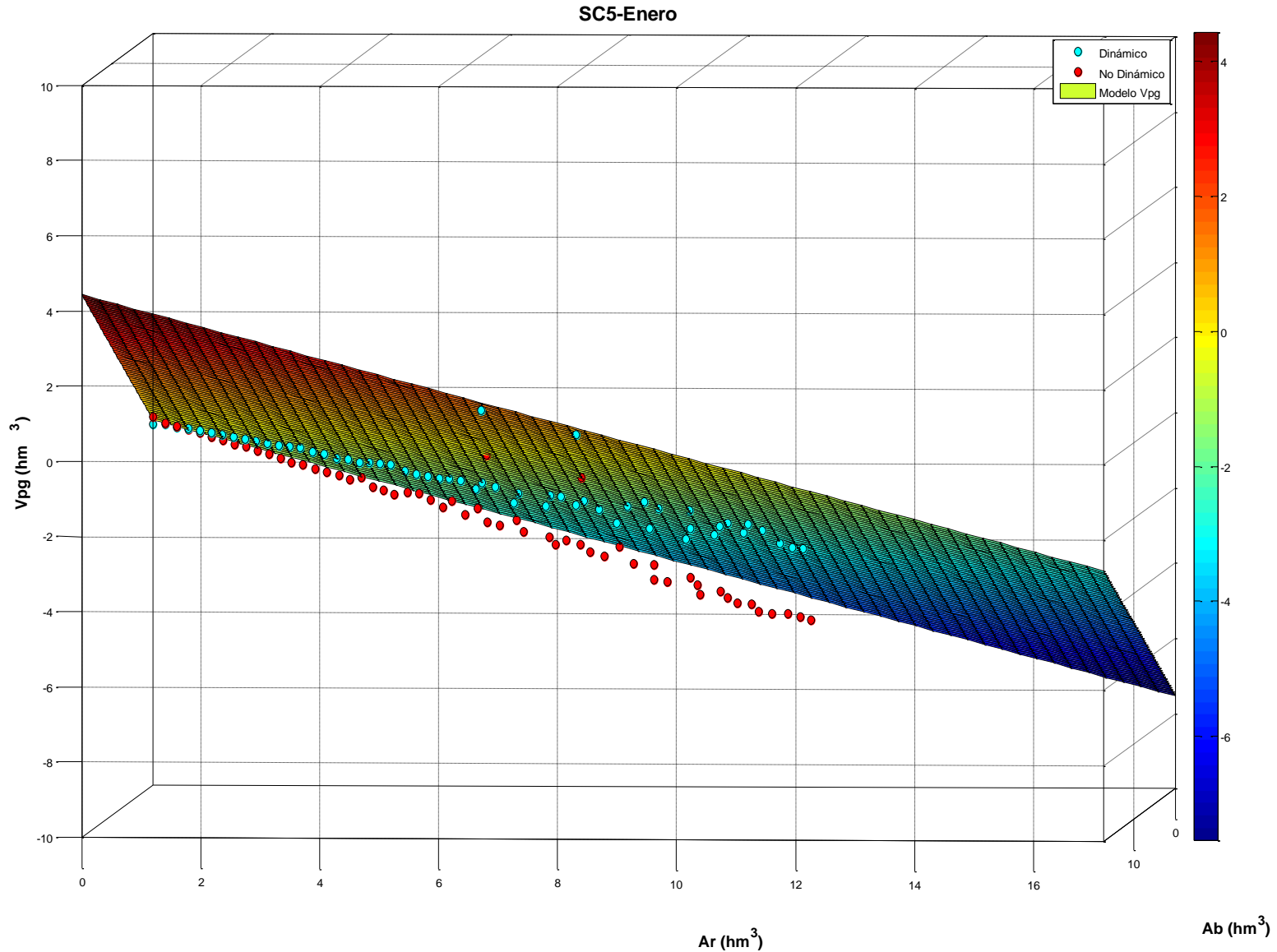
Para la evaluación de cada subcuenca se realiza lo siguiente:

1. Se grafica la función del plano V_{pg} para cada mes en los rangos históricos de Ar y de Ab.
2. Se estimulan los volúmenes aguas arriba de cada tramo (dentro del rango histórico) y se corre la simulación.
3. Los resultados para ambos Modelos (Dinámico y No Dinámico) se comparan con la función del plano V_{pg} .

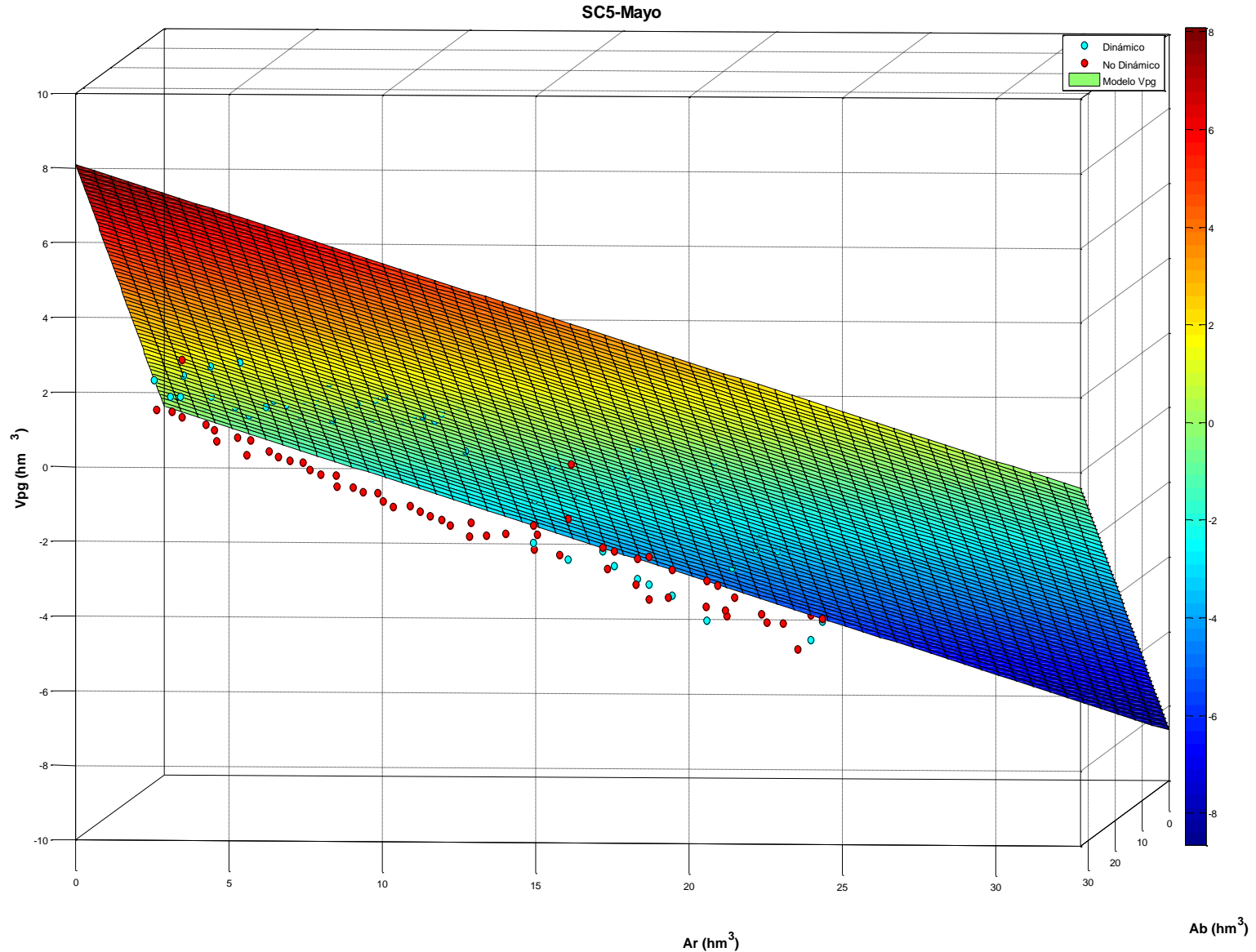
Con los resultados se pueden realizar diferentes análisis:

- **Consistencia** de los resultados con el modelo de Pérdidas y Ganancias calibrado: Pruebas de bondad de ajuste.
- **Variabilidad** a través de la cuantificación de pérdidas y ganancias (globales y netas), para cada Ar estimulado.
- **Coherencia** del cálculo de pérdidas y ganancias en escenarios alternos.

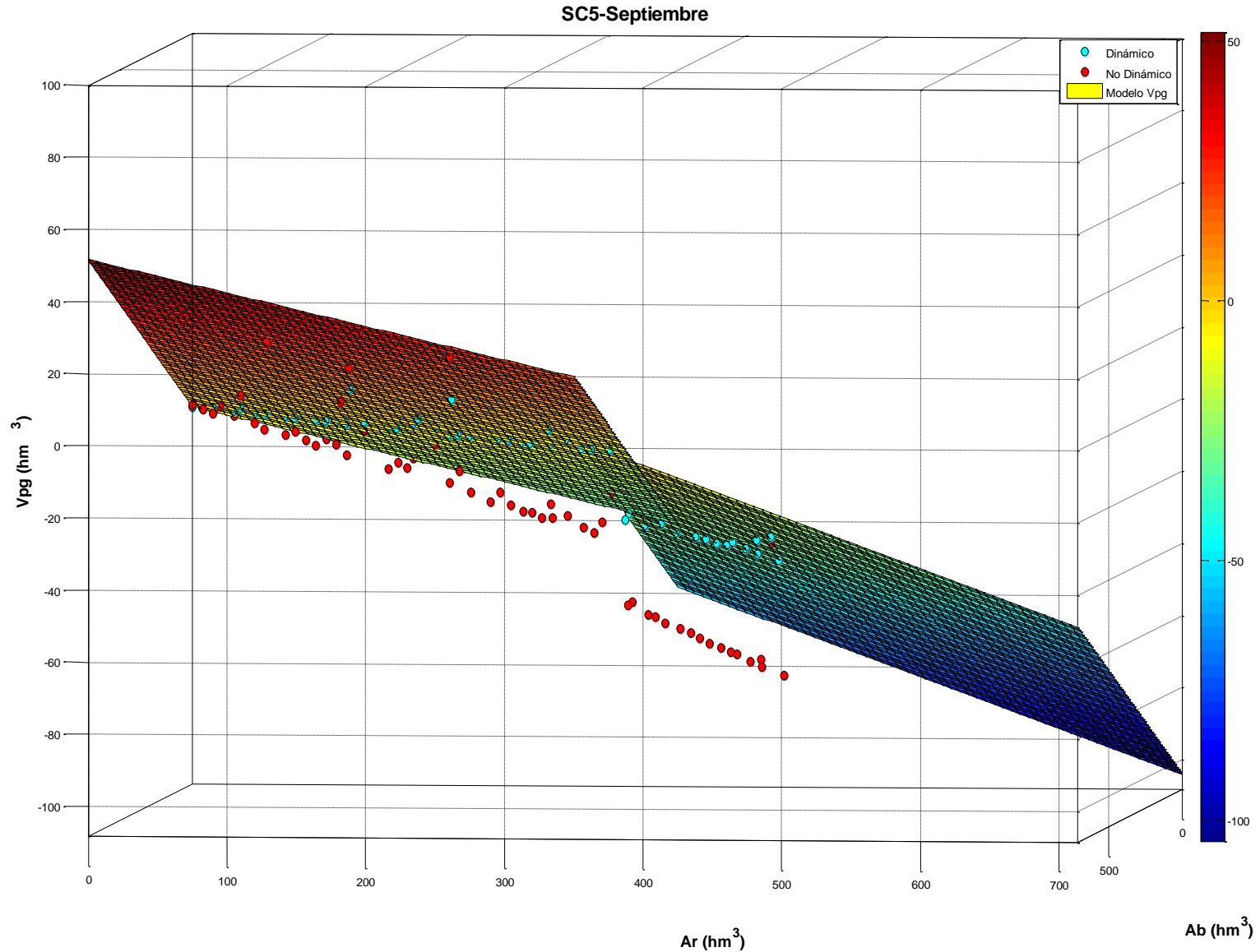
CONSISTENCIA. EVALUACIÓN DE LA SUBCUENCA SC5: ENERO



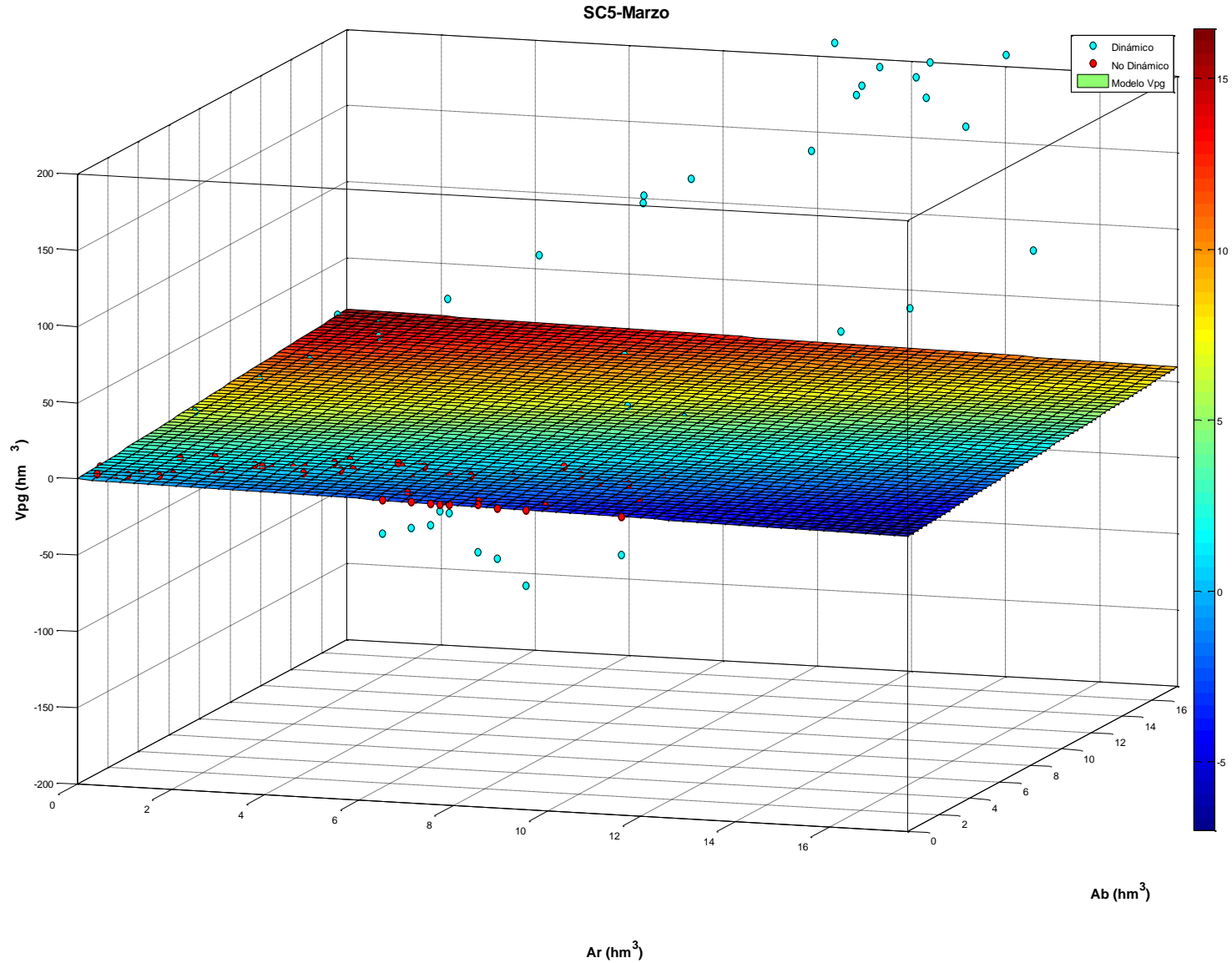
CONSISTENCIA. EVALUACIÓN DE LA SUBCUENCA SC5: MAYO



CONSISTENCIA. EVALUACIÓN DE LA SUBCUENCA SC5: SEPTIEMBRE



CONSISTENCIA. EVALUACIÓN DE LA SUBCUENCA SC5: MARZO



CONSISTENCIA: PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE (RMSE)

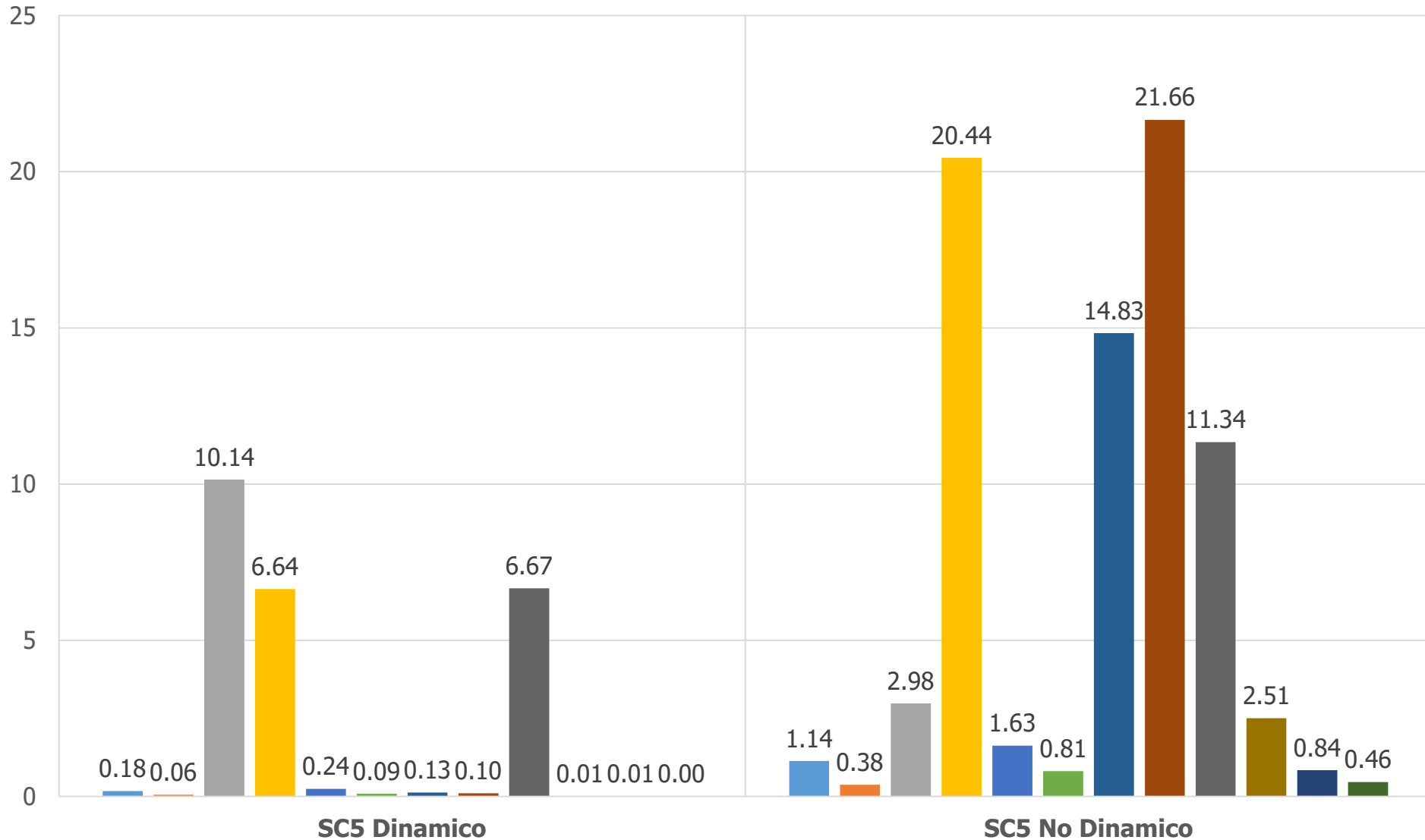
Para cuantificar la consistencia de ambos modelos (Dinámico y No Dinámico), se calculó la raíz del error cuadrático medio entre los valores del plano (V_{pg}) y los valores simulados (V'_{pg}) para cada subcuenca y cada mes:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{pgi} - V'_{pgi})^2} \quad (d)$$

Su evaluación permite identificar qué modelo se aproxima con menor error al plano teórico.

CONSISTENCIA: ERROR CUADRÁTICO MEDIO (ECM) DE LA SUBCUENCA SC5

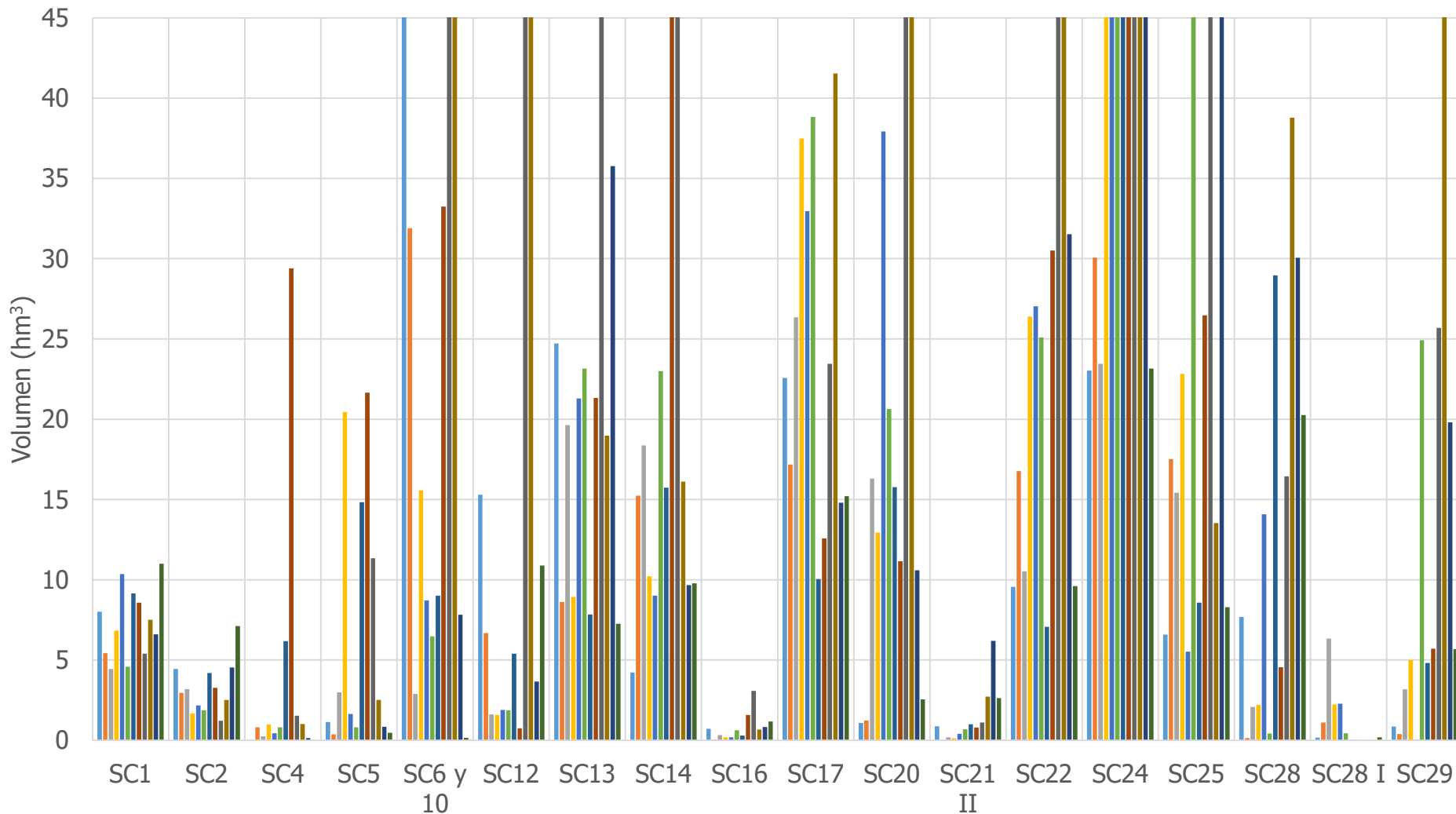
■ enero ■ febrero ■ marzo ■ abril ■ mayo ■ junio ■ julio ■ agosto ■ septiembre ■ octubre ■ noviembre ■ diciembre



CONSISTENCIA: ECM RESPECTO A LOS PLANOS (NO DINÁMICO)

NO DINÁMICO: RAÍZ DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO

■ Enero ■ Febrero ■ Marzo ■ Abril ■ Mayo ■ Junio ■ Julio ■ Agosto ■ Septiembre ■ Octubre ■ Noviembre ■ Diciembre

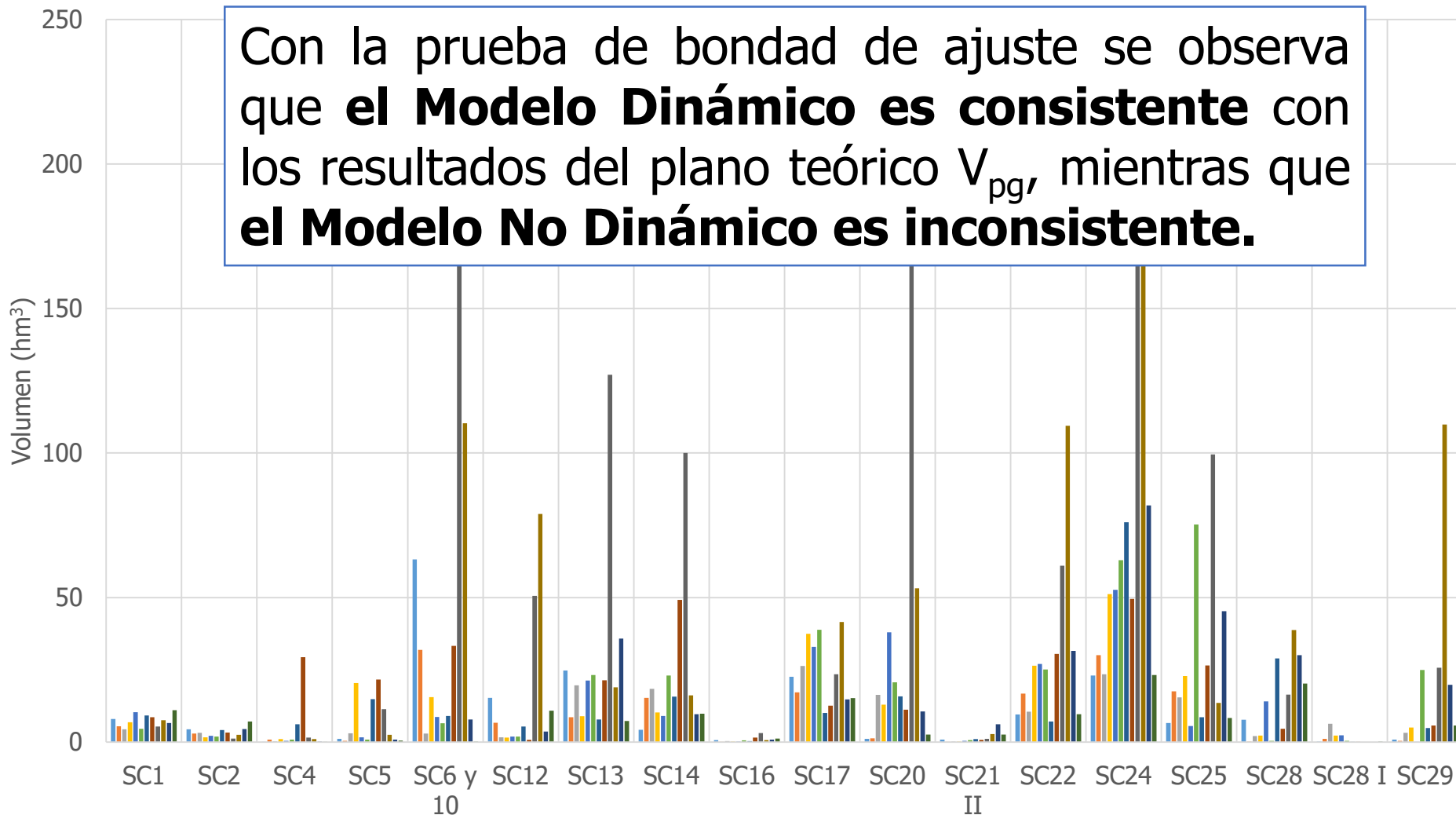


CONSISTENCIA: ECM RESPECTO A LOS PLANOS (NO DINÁMICO)

NO DINÁMICO: RAÍZ DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO

■ Enero ■ Febrero ■ Marzo ■ Abril ■ Mayo ■ Junio ■ Julio ■ Agosto ■ Septiembre ■ Octubre ■ Noviembre ■ Diciembre

Con la prueba de bondad de ajuste se observa que **el Modelo Dinámico es consistente** con los resultados del plano teórico V_{pg} , mientras que **el Modelo No Dinámico es inconsistente.**



VARIABILIDAD: PÉRDIDA Y GANANCIA DE MASA GLOBAL



La Consistencia nos dice el nivel de ajuste que se tiene al modelo V_{pg} .

La metodología del modelo dinámico permite un ajuste de manera satisfactoria al plano representativo del modelo V_{pg} .

Por lo tanto, si existiera creación o destrucción desmedida de masa tendría que atribuirse a los coeficientes caracterizados con la hidrometría histórica.

Para revisar si existe tal creación o destrucción se procede a revisar con qué magnitud y variabilidad se crea y destruye masa en función de los escurrimientos aguas arriba.

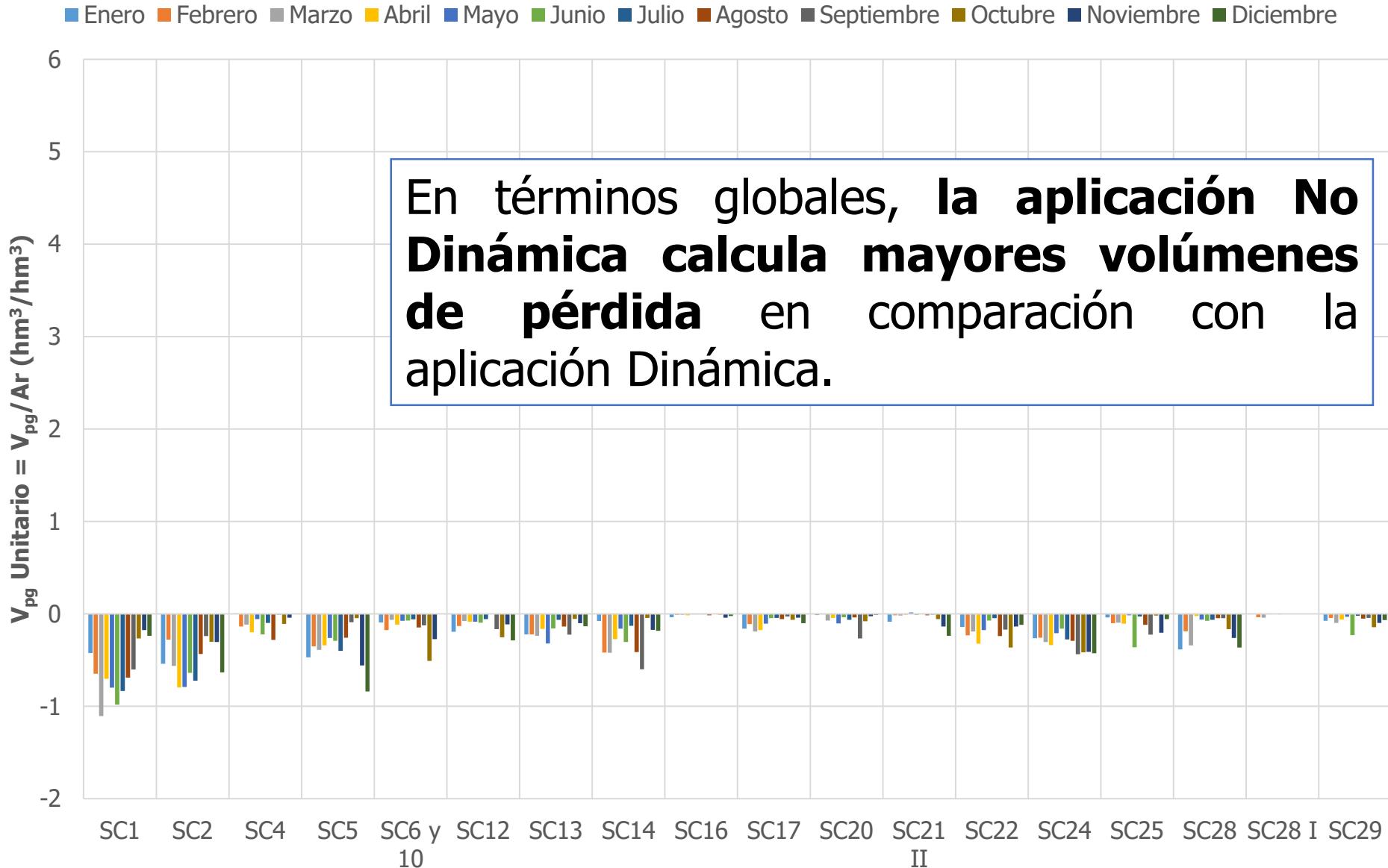
VARIABILIDAD: PÉRDIDA Y GANANCIA DE MASA GLOBAL

Para cuantificar las pérdidas y ganancias, se suman los valores calculados para ambos modelos (V'_{pg}) y se comparan con el volumen de escurrimiento Ar para cada subcuenca y mes del año:

$$(V_{pg})_{\text{unitario}} = \frac{\sum V'_{pg}}{\sum Ar} \quad (e)$$

Con la ecuación (e) se determina el volumen de pérdida o ganancia global, por unidad de volumen que escurre aguas arriba.

VARIABILIDAD: PÉRDIDA O GANANCIA DE MASA GLOBAL (NO DINÁMICO)



PÉRDIDA Y GANANCIA DE MASA ENTRE MODELOS

Conocida la tendencia global de ambos modelos, es necesario evaluar por separado el comportamiento de las pérdidas y las ganancias:

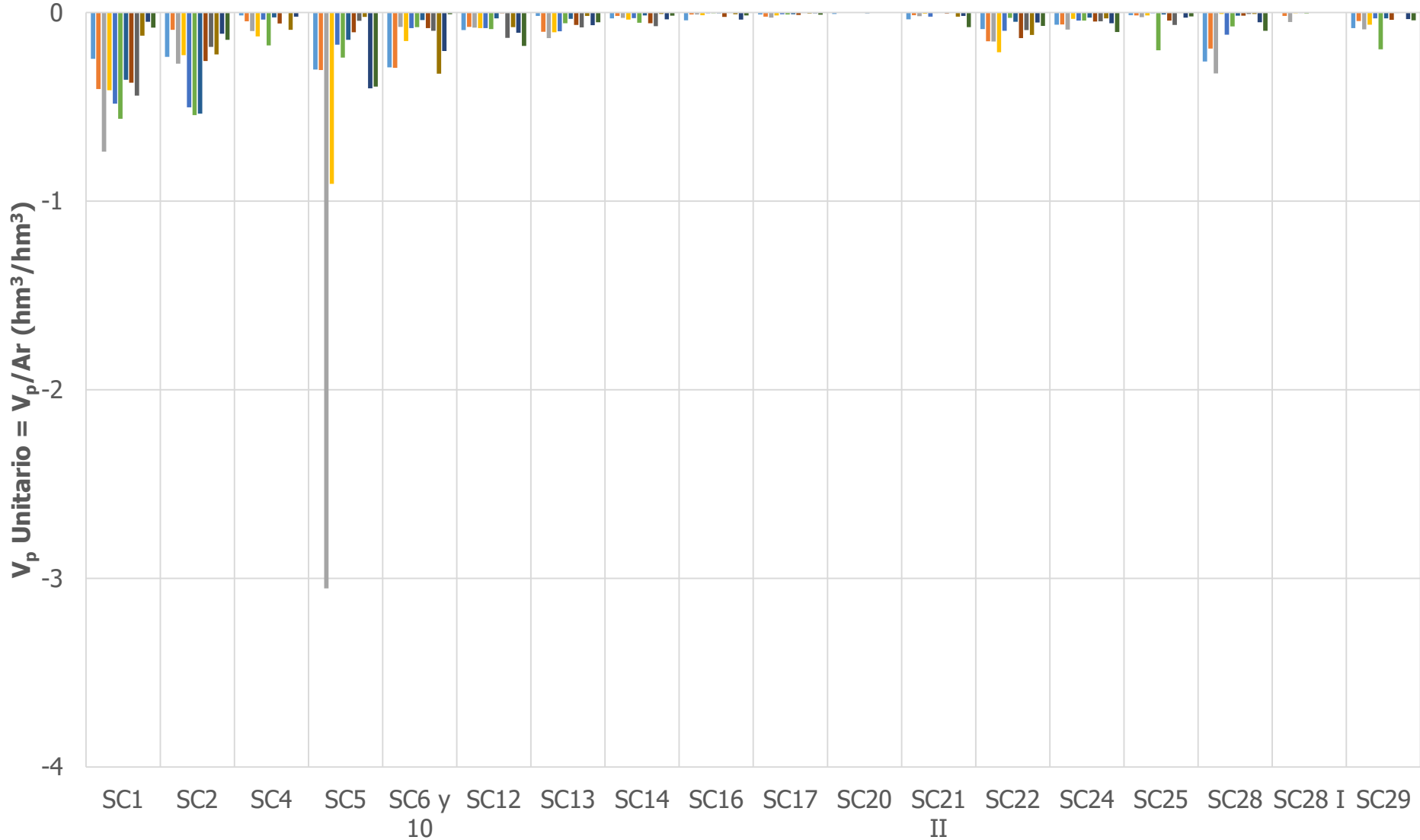
$$(V_p)_{\text{unitario}} = \frac{\sum V'_p}{\sum Ar_{(v'_p)}} \quad (\text{e})$$

$$(V_g)_{\text{unitario}} = \frac{\sum V'_g}{\sum Ar_{(v'_g)}} \quad (\text{f})$$

- Con la **ecuación (e)** se contabilizan los volúmenes de **pérdida** y sus Ar asociados, para determinar la proporción de pérdidas.
- La **ecuación (f)** hace lo mismo con los volúmenes de **ganancia**.

PÉRDIDA DE MASA (DINÁMICO)

■ Enero ■ Febrero ■ Marzo ■ Abril ■ Mayo ■ Junio ■ Julio ■ Agosto ■ Septiembre ■ Octubre ■ Noviembre ■ Diciembre



PÉRDIDA DE MASA (NO DINÁMICO)

■ Enero
 ■ Febrero
 ■ Marzo
 ■ Abril
 ■ Mayo
 ■ Junio
 ■ Julio
 ■ Agosto
 ■ Septiembre
 ■ Octubre
 ■ Noviembre
 ■ Diciembre



La aplicación No Dinámica calcula mayores volúmenes de pérdida en comparación con la Dinámica.

Las ecuaciones No Dinámica tiende a crear y destruir masa con gran variabilidad.

COHERENCIA DEL VPG EN ESCENARIOS ALTERNOS

Para determinar la **coherencia** se prueba el siguiente axioma:

*En un abanico de escenarios alternos donde los diferentes valores de A_r oscilan dentro de los rangos mínimos y máximos históricos, el V_{pg} **deberá encontrarse dentro de su respectivo rango histórico.***

- Los V_{pg} históricos correspondientes a los valores de A_r medidos a partir de información histórica observada (hidrometría) fueron determinados en el proceso de restitución de escurrimientos y retornos.

COHERENCIA DEL VPG EN ESCENARIOS ALTERNOS

La diferencia entre los V_{pg} máximos y mínimos mensuales históricos contra los simulados se puede expresar matemáticamente de la siguiente forma:

$$\text{Diferencia de Máximos} = VpgMax_{sim}^m - VpgMax_{obs}^m \quad (g)$$

$$\text{Diferencia de Mínimos} = VpgMin_{sim}^m - VpgMin_{obs}^m \quad (h)$$

**Donde m es un mes específico en una de las subcuencas analizadas*

Gráficamente se puede entender de la siguiente manera:

COHERENCIA DEL VPG EN ESCENARIOS ALTERNOS

Caso 1: La diferencia (negativa) encontrada entre los Vpg representa valores simulados que se encuentran **dentro del rango histórico**

Ar vs. Vpg No Dinámico SC1Abril

* No Dinámico
 — Tendencia NDin
 ○ Histórico
 — Tendencia Hist

DIFERENCIAS DE MÁXIMOS

1

2

Caso 2: La diferencia (positiva) encontrada entre los Vpg representa valores simulados que se encuentran **fuera del rango histórico**

DIFERENCIAS DE MÍNIMOS

3

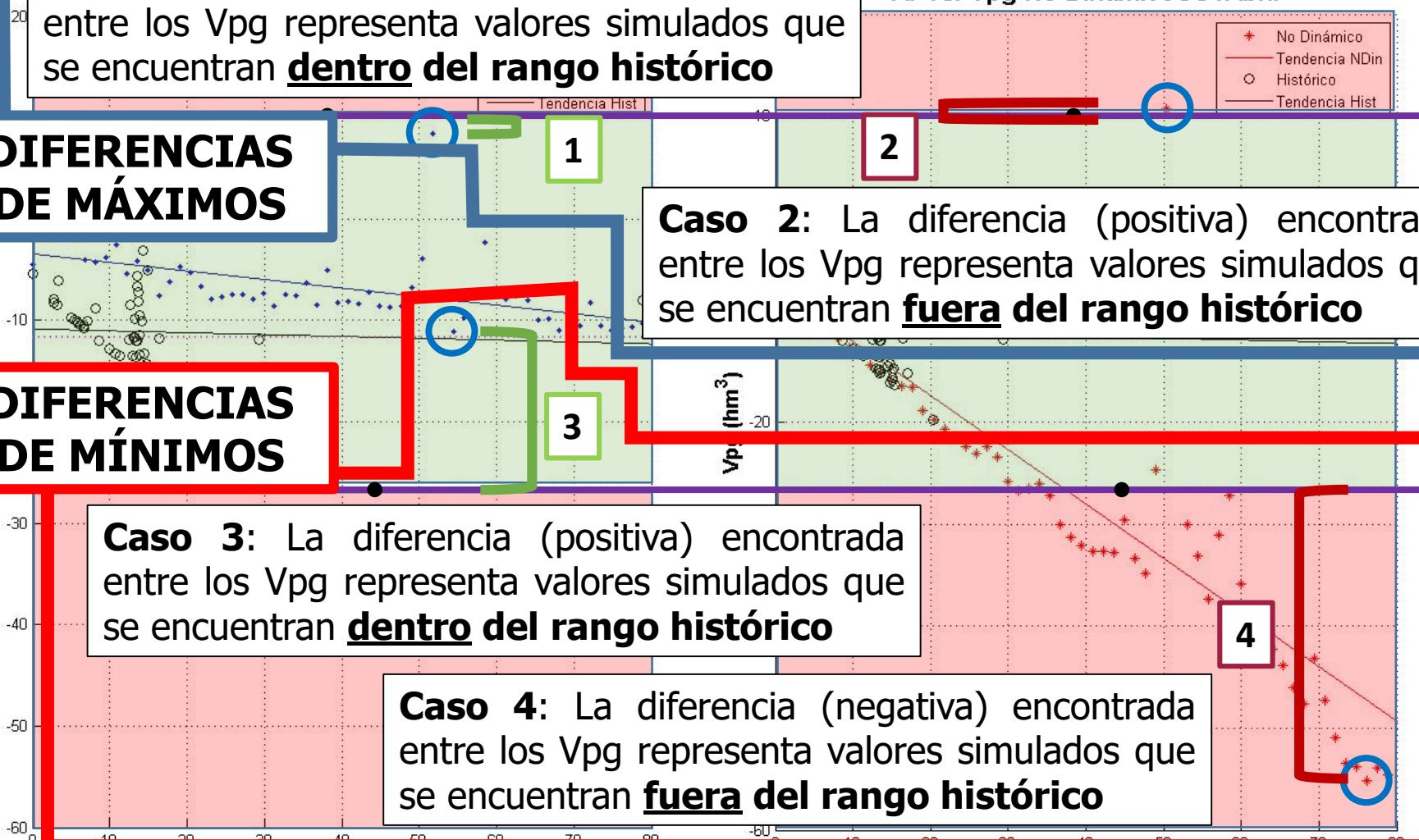
Caso 3: La diferencia (positiva) encontrada entre los Vpg representa valores simulados que se encuentran **dentro del rango histórico**

4

Caso 4: La diferencia (negativa) encontrada entre los Vpg representa valores simulados que se encuentran **fuera del rango histórico**

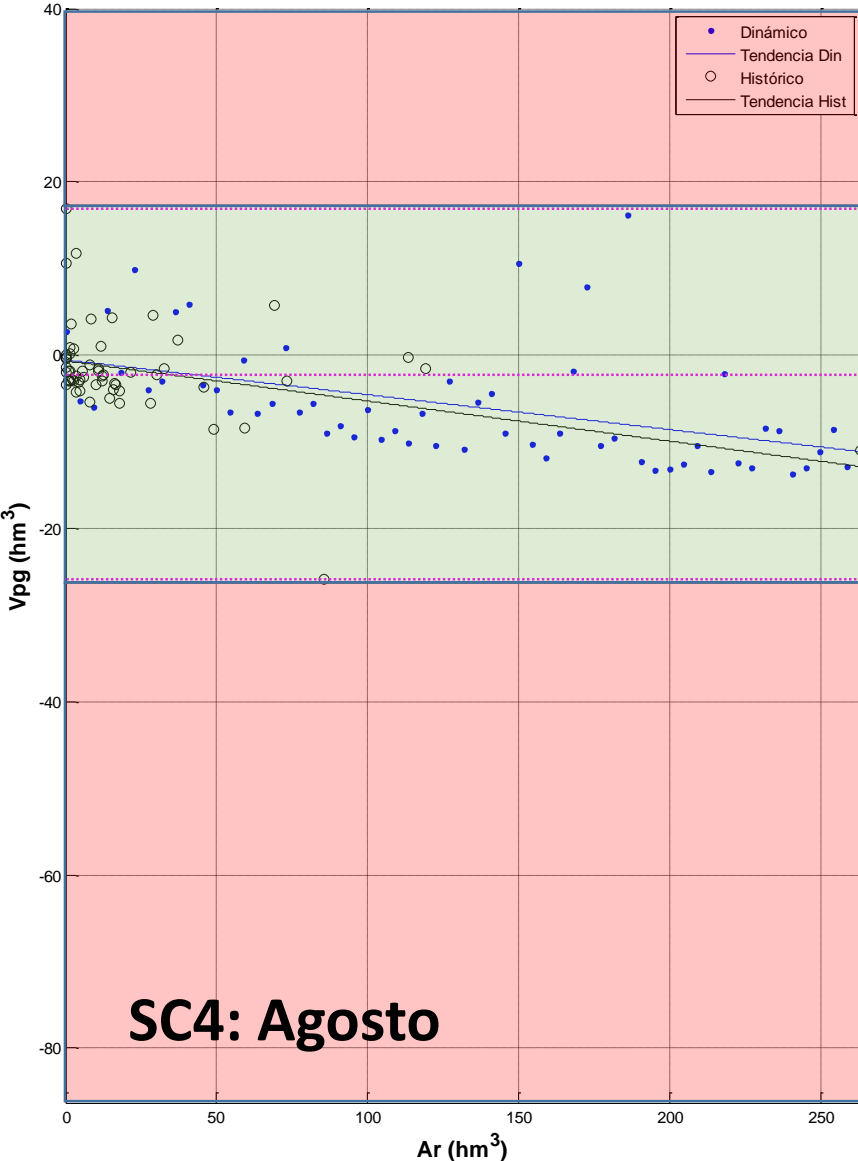
Ar (hm^3)

Ar (hm^3)

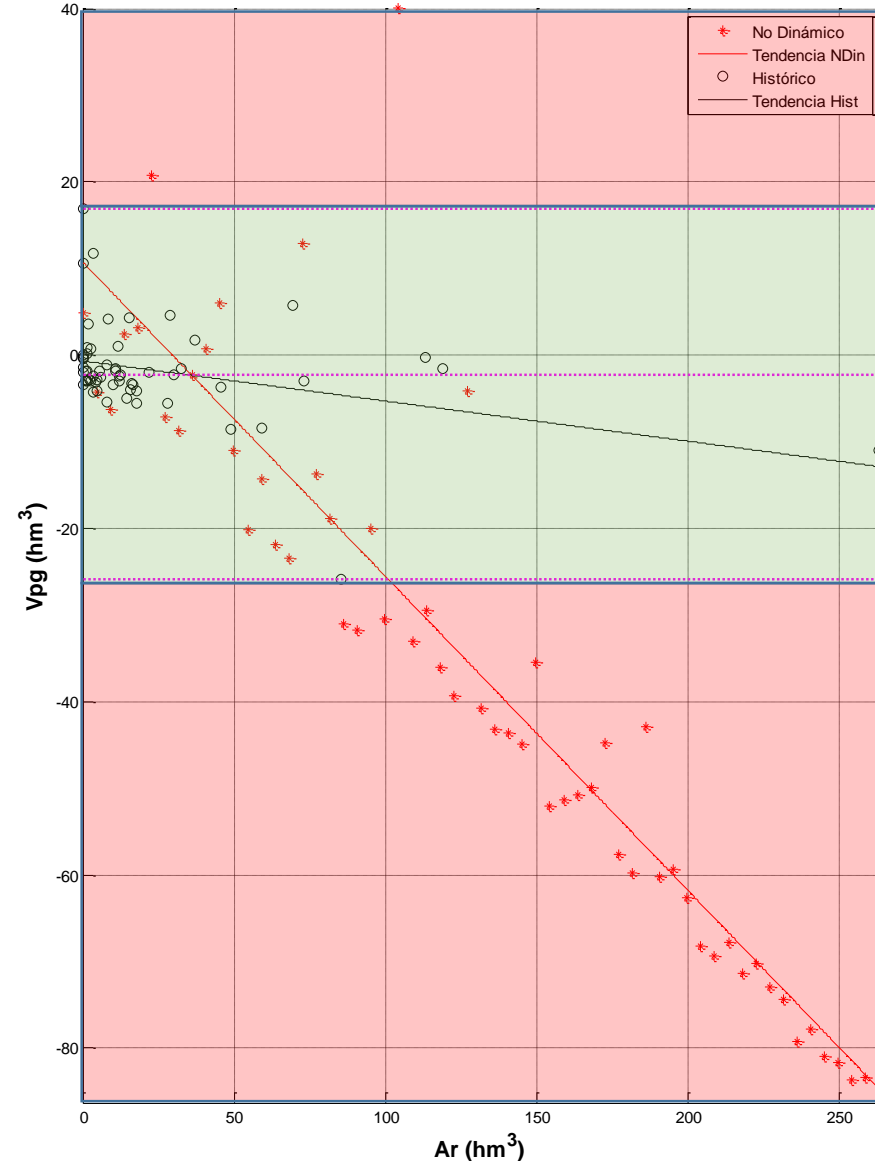


COHERENCIA DEL VPG EN ESCENARIOS ALTERNOS

Ar vs. Vpg Dinámico/SC4Agosto

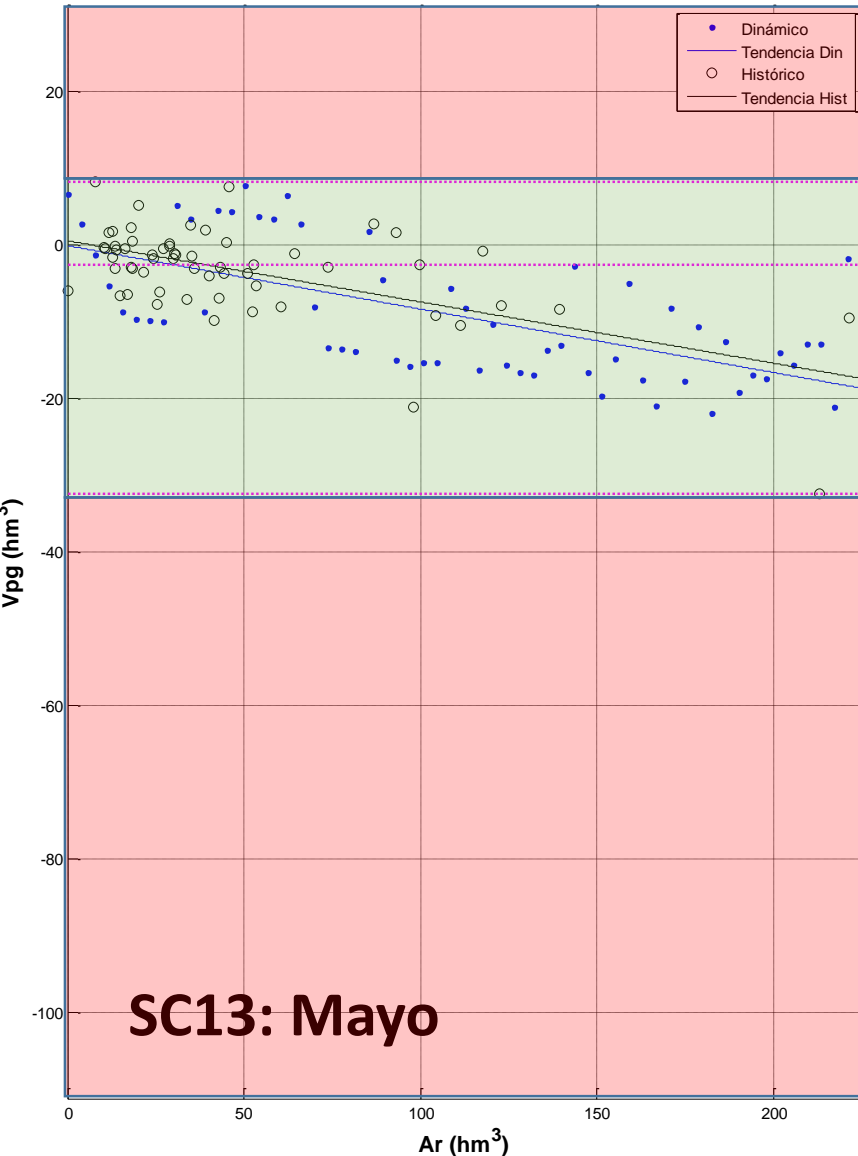


Ar vs. Vpg No Dinámico/SC4Agosto

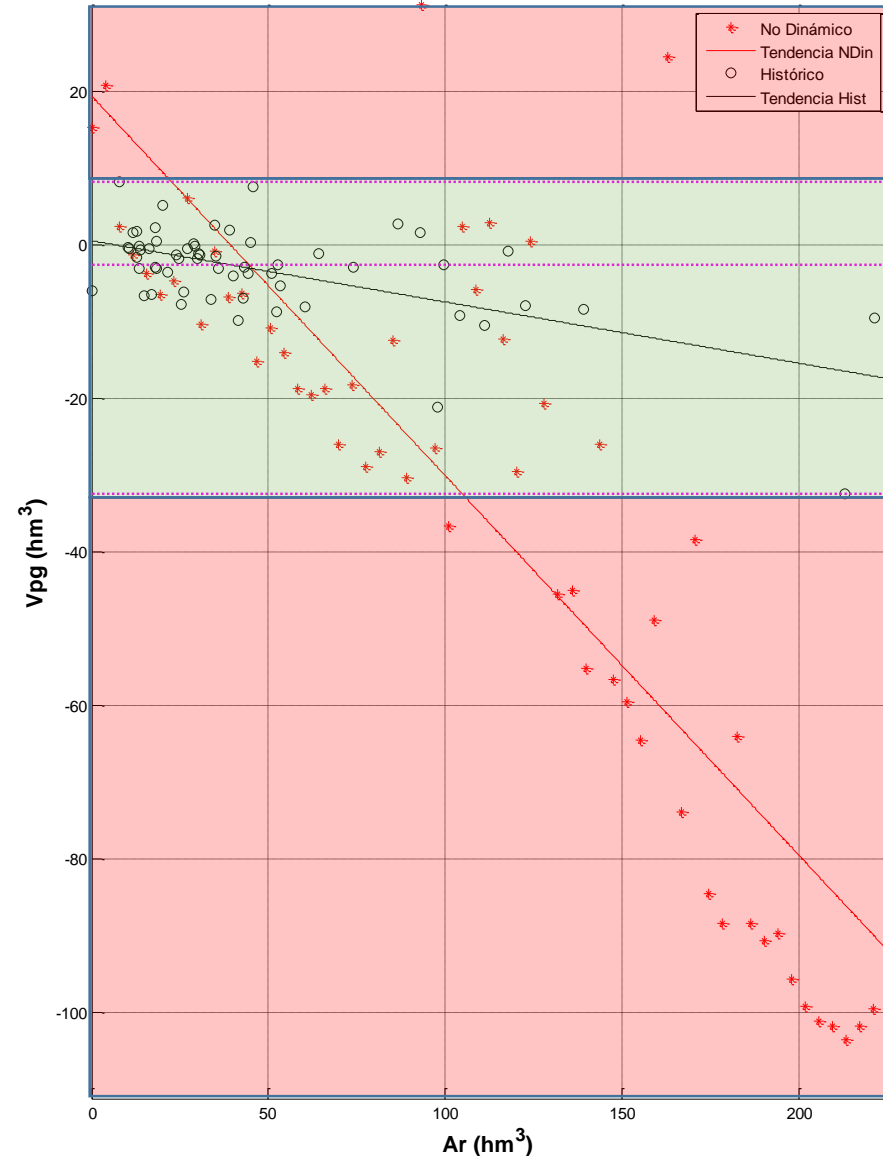


COHERENCIA DEL VPG EN ESCENARIOS ALTERNOS

Ar vs. Vpg Dinámico/SC13Mayo

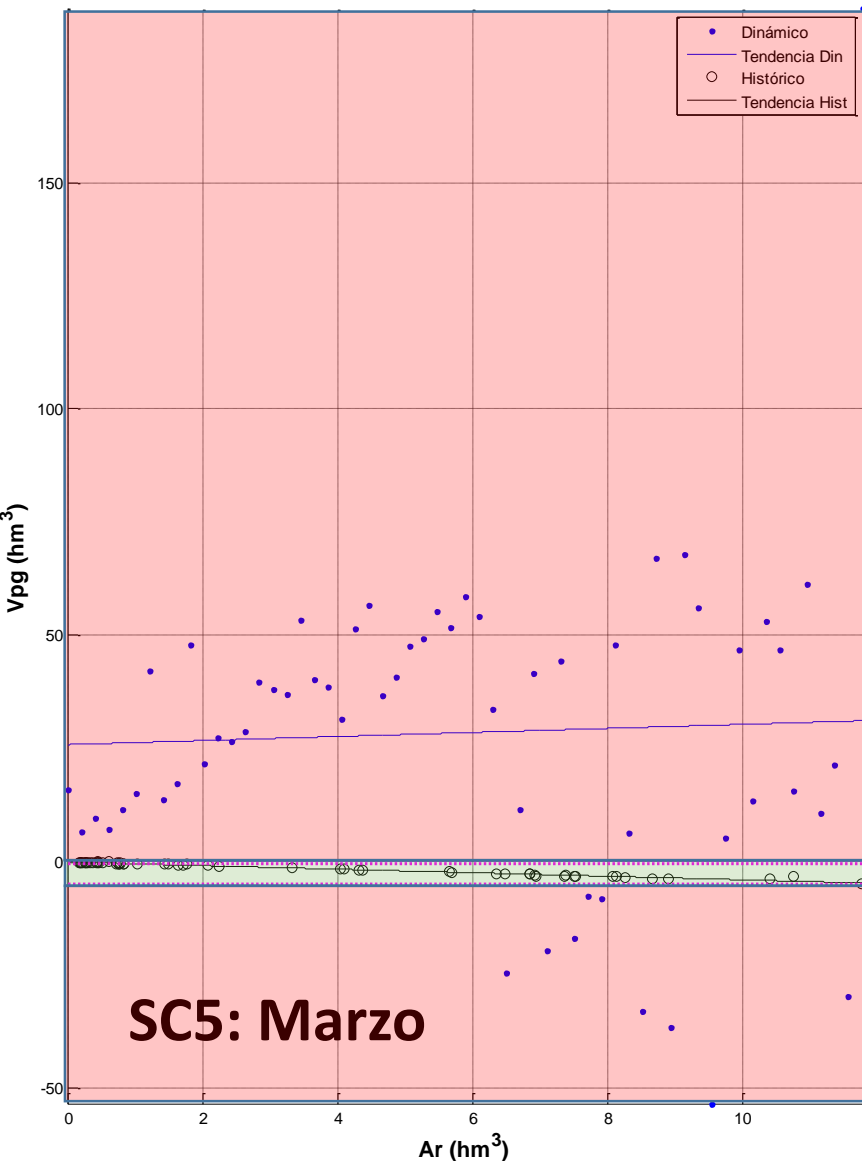


Ar vs. Vpg No Dinámico/SC13Mayo

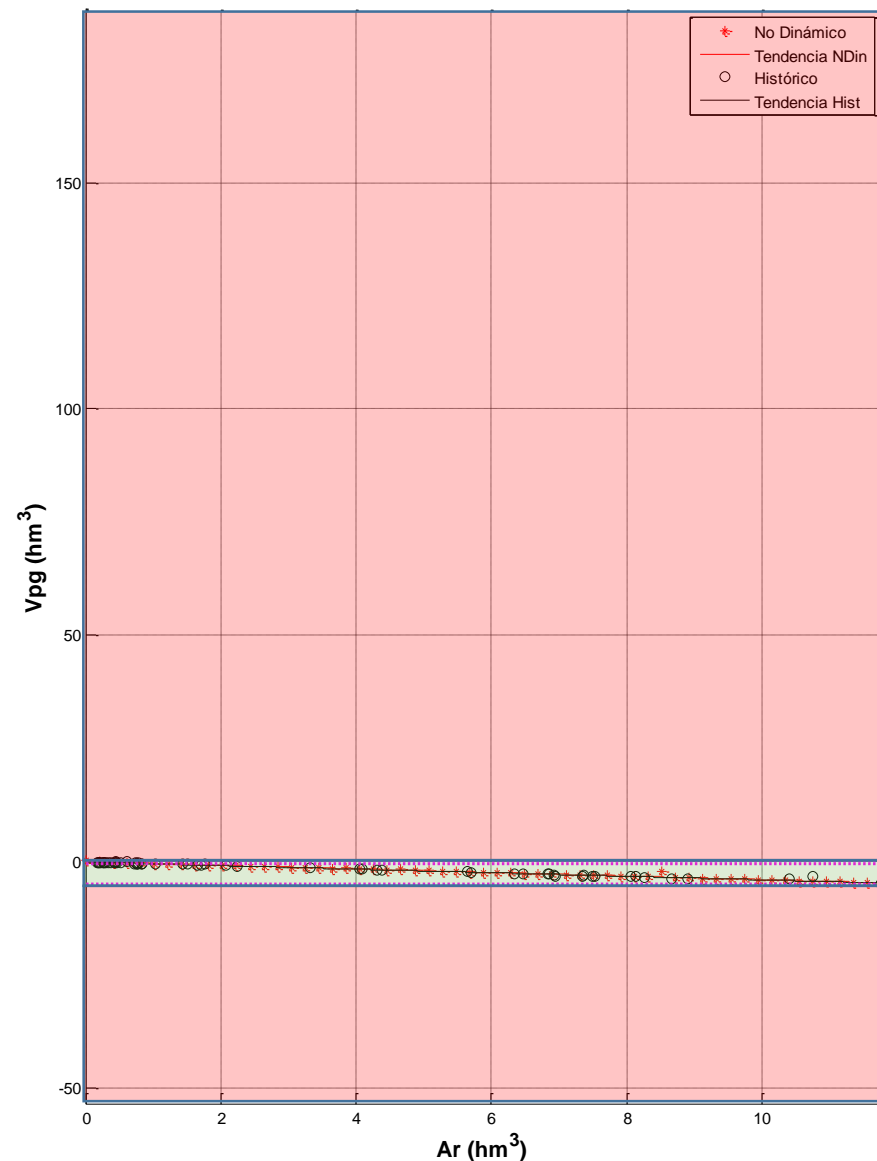


COHERENCIA DEL VPG EN ESCENARIOS ALTERNOS

Ar vs. Vpg Dinámico/SC5Marzo

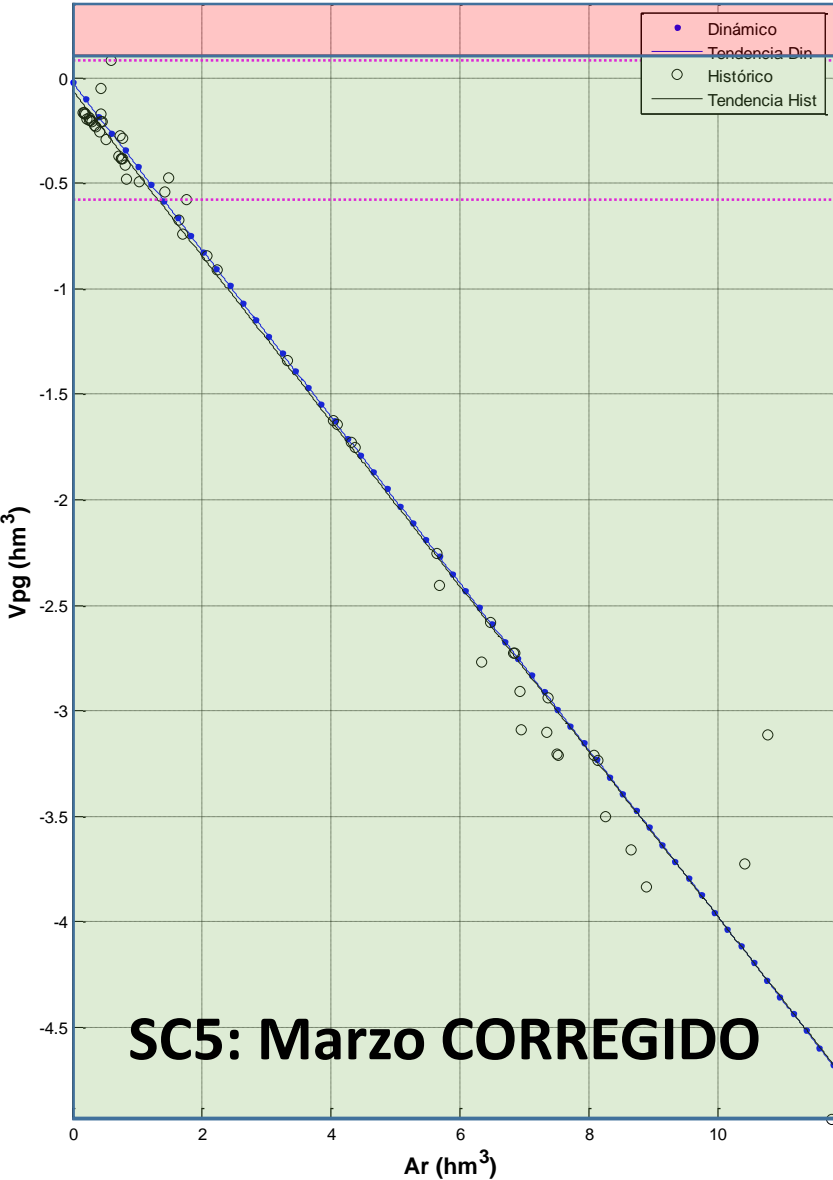


Ar vs. Vpg No Dinámico/SC5Marzo

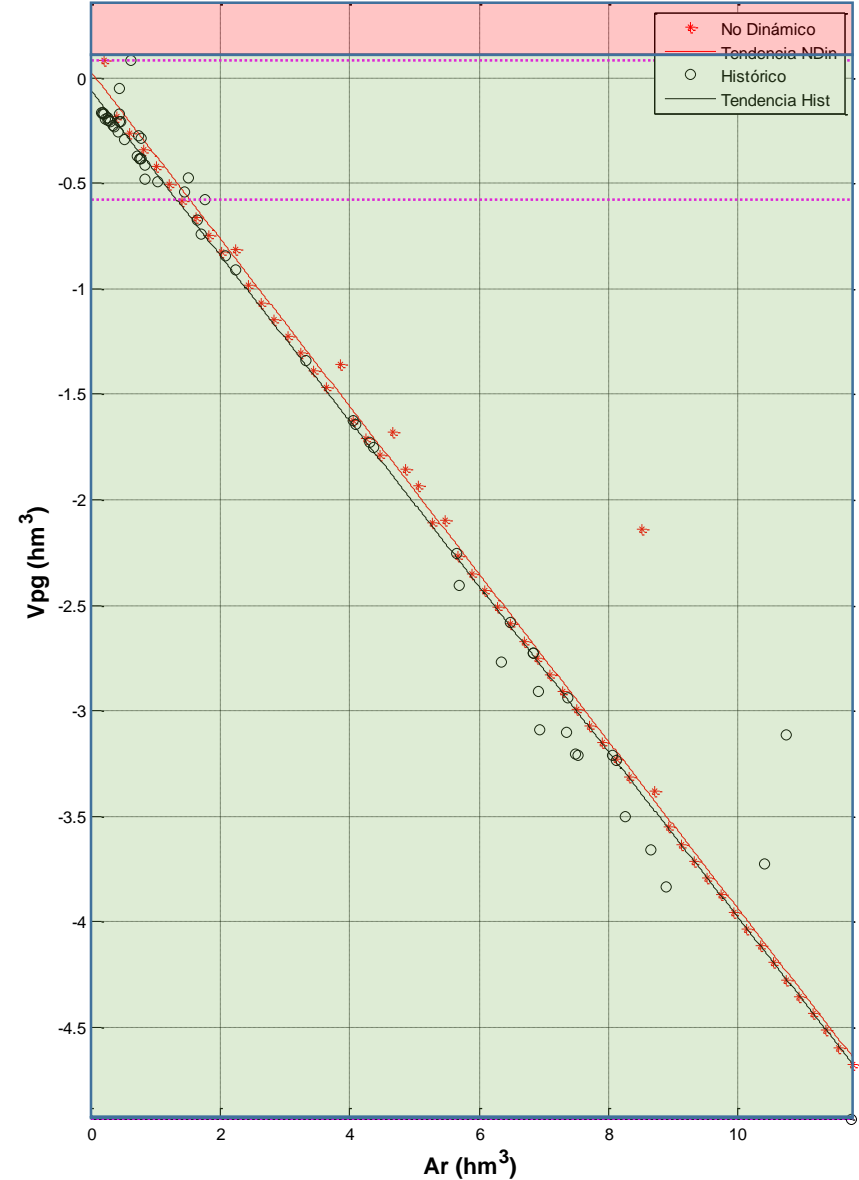


COHERENCIA DEL VPG EN ESCENARIOS ALTERNOS

Ar vs. Vpg Dinámico/SC5Marzo

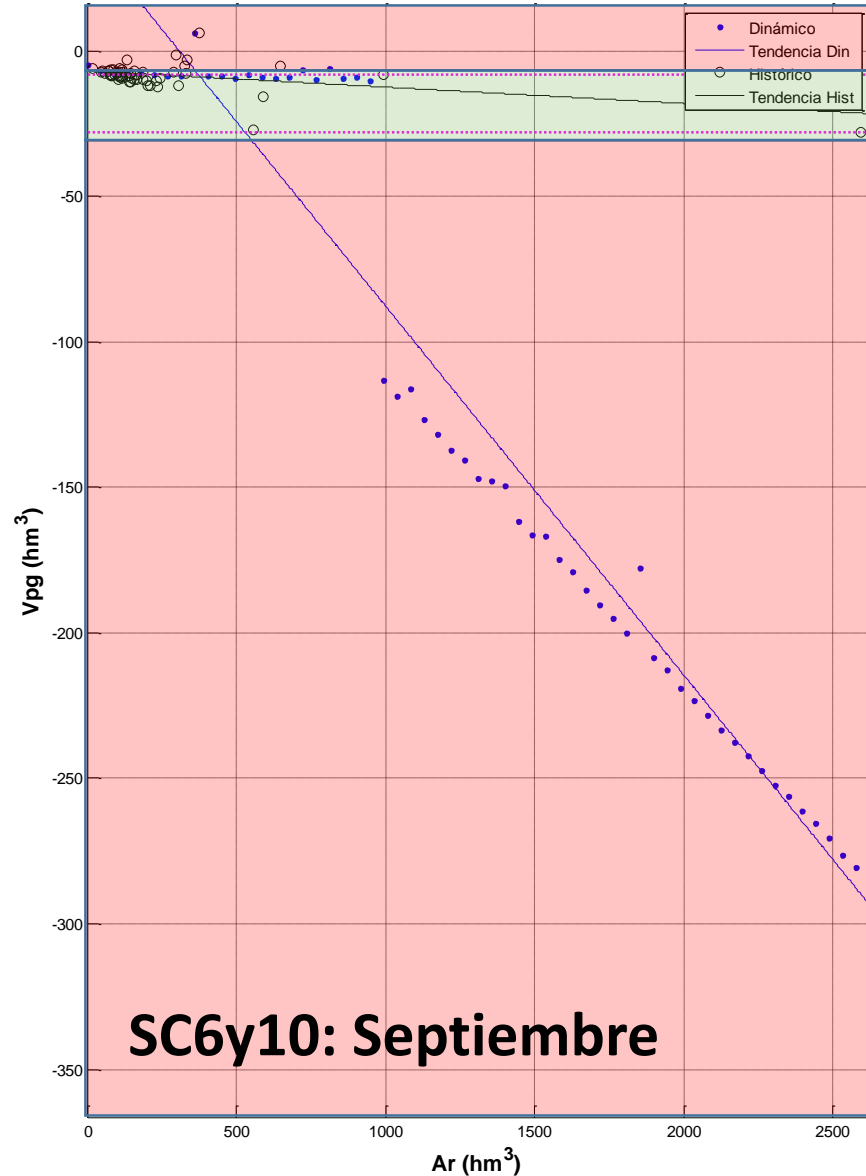


Ar vs. Vpg No Dinámico/SC5Marzo

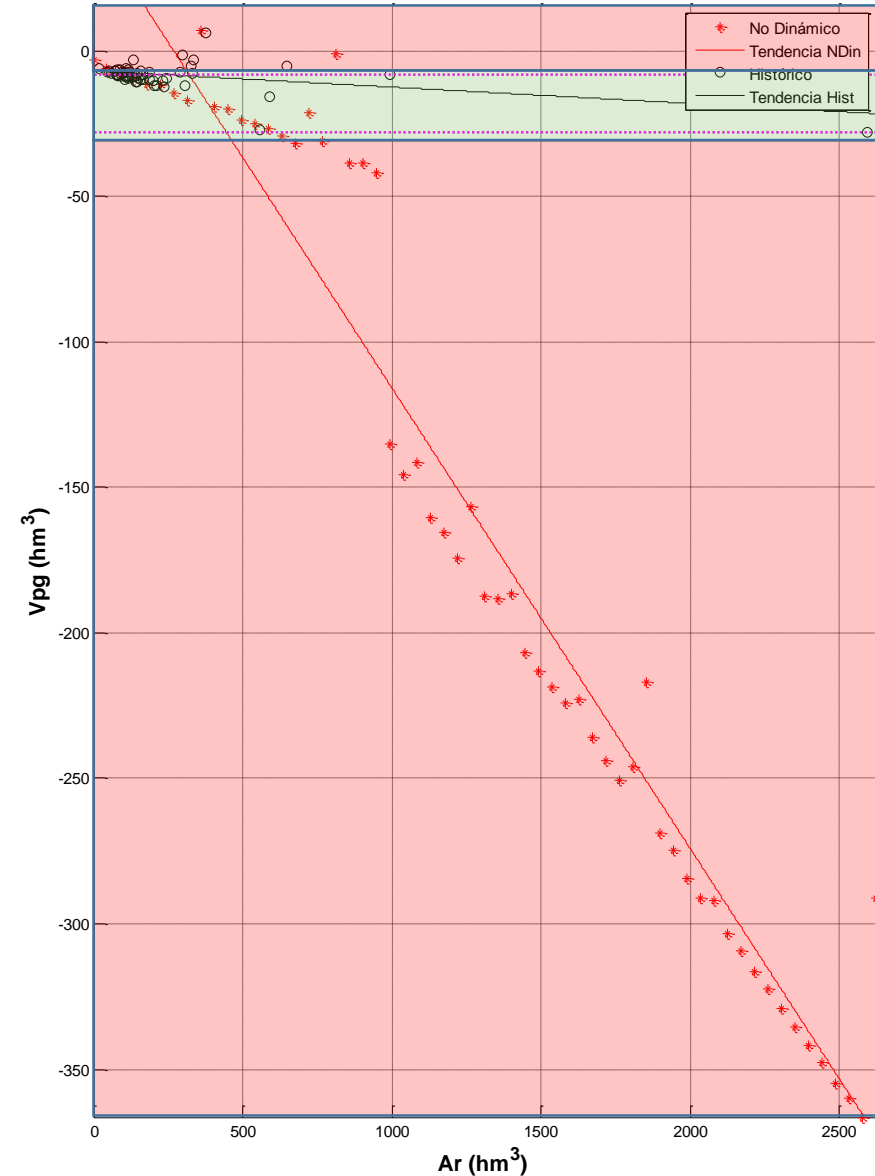


COHERENCIA DEL VPG EN ESCENARIOS ALTERNOS

Ar vs. Vpg Dinámico/SC6y10Septiembre

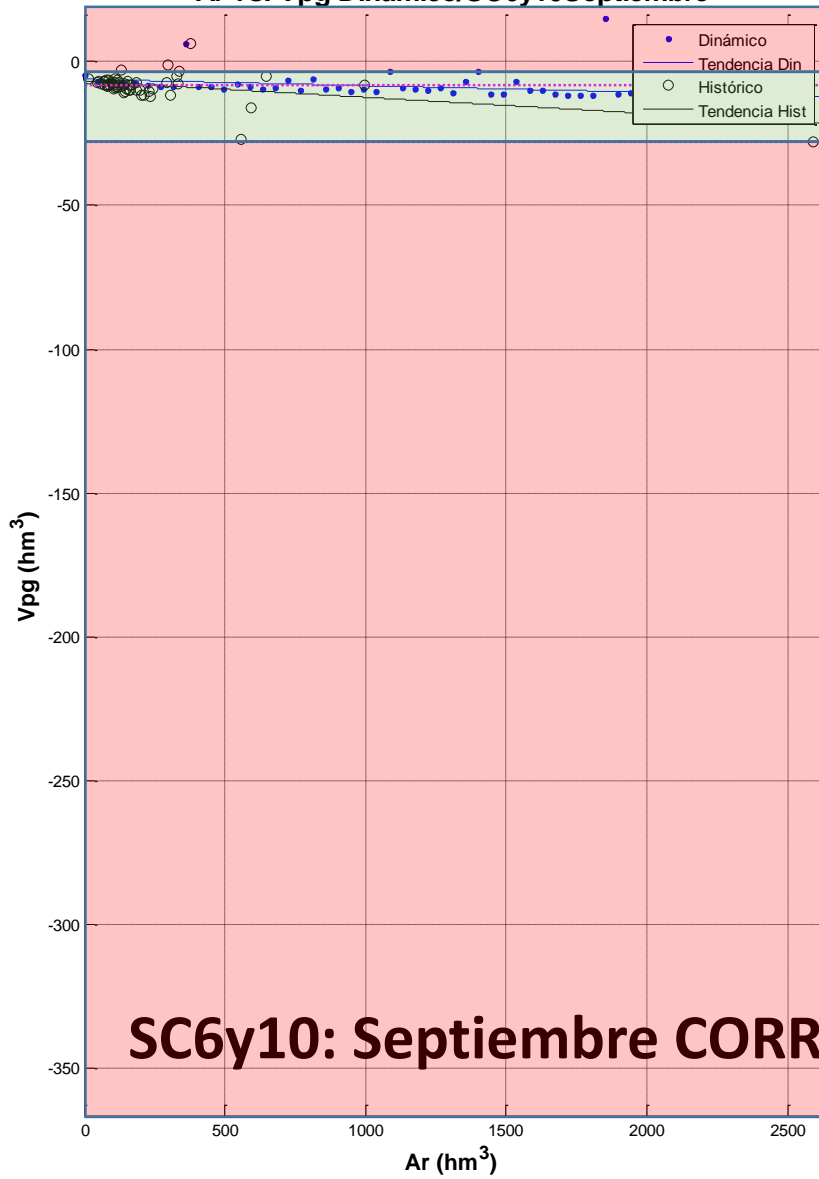


Ar vs. Vpg No Dinámico/SC6y10Septiembre

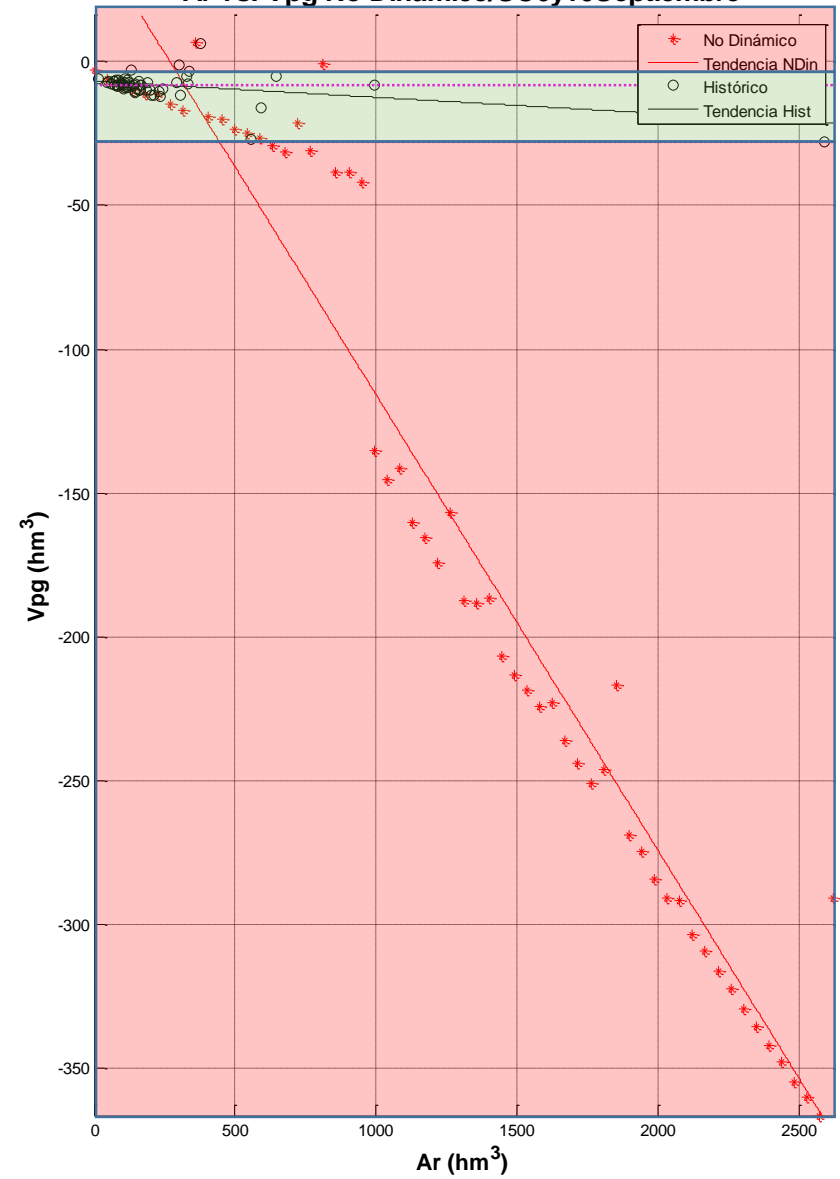


COHERENCIA DEL VPG EN ESCENARIOS ALTERNOS

Ar vs. Vpg Dinámico/SC6y10Septiembre



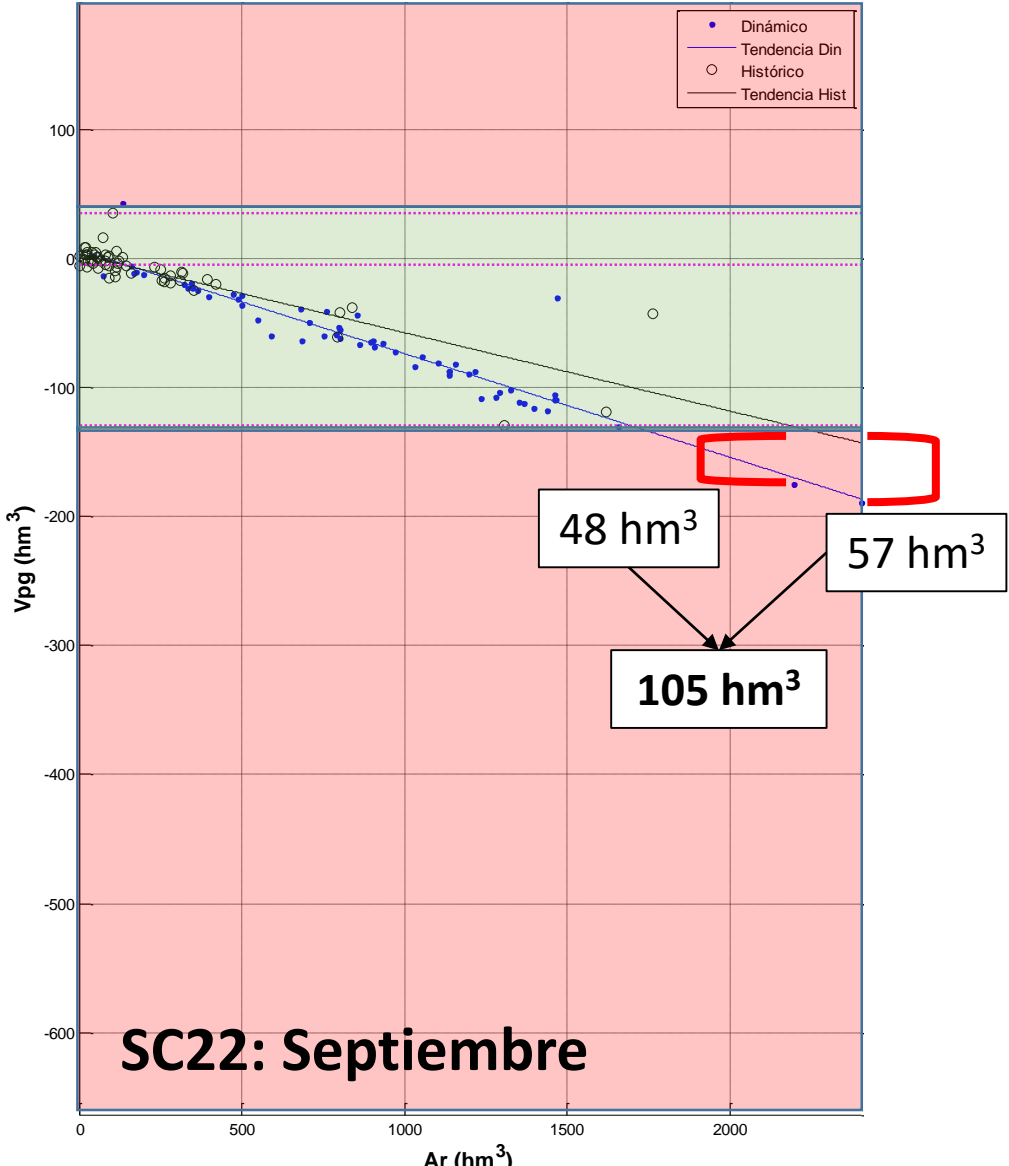
Ar vs. Vpg No Dinámico/SC6y10Septiembre



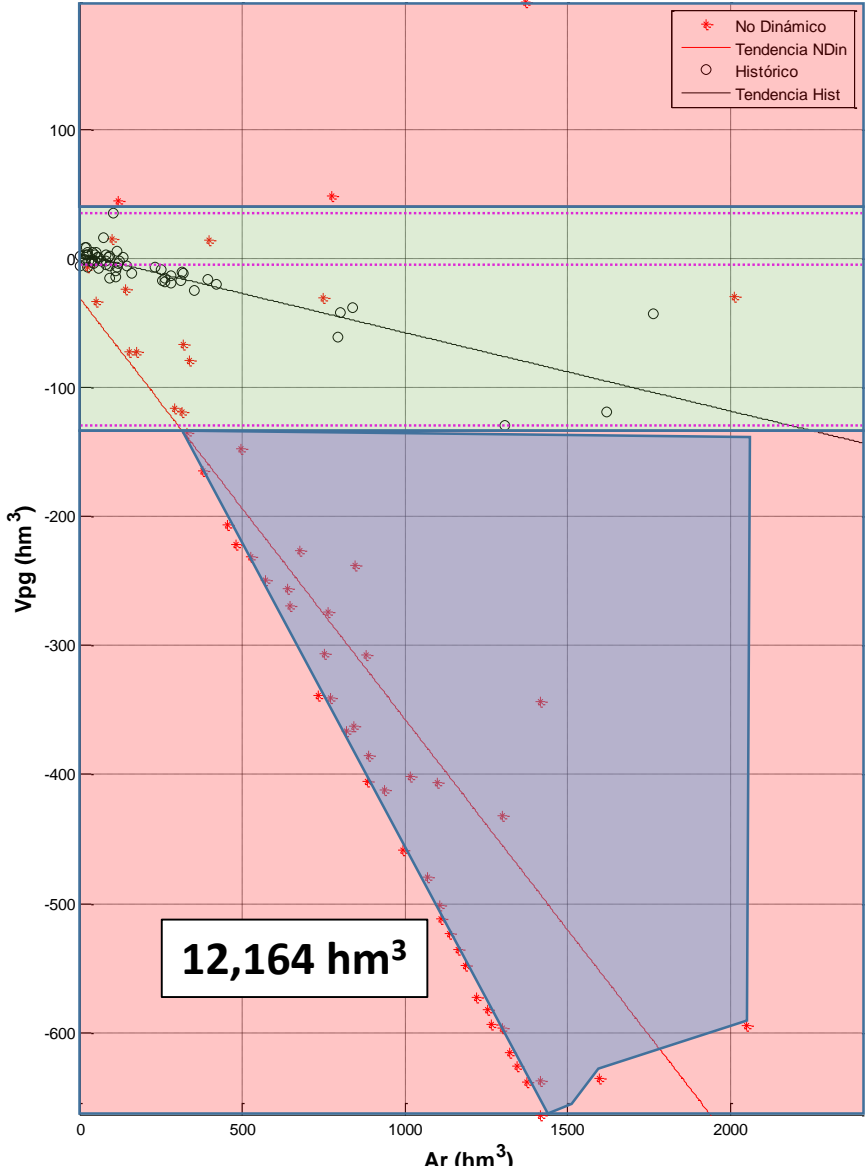
COHERENCIA DEL VPG EN ESCENARIOS ALTERNOS



Ar vs. Vpg Dinámico/SC22Septiembre



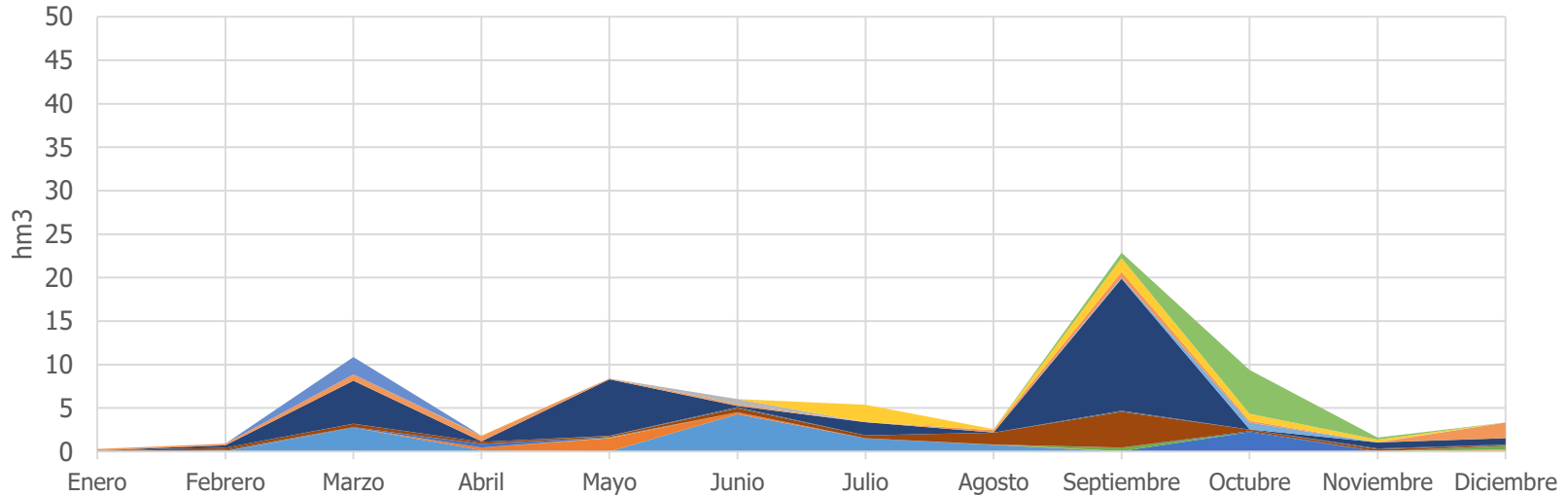
Ar vs. Vpg No Dinámico/SC22Septiembre



Acumulado de excedentes Máximos del rango Vpg anualizados (59 años)

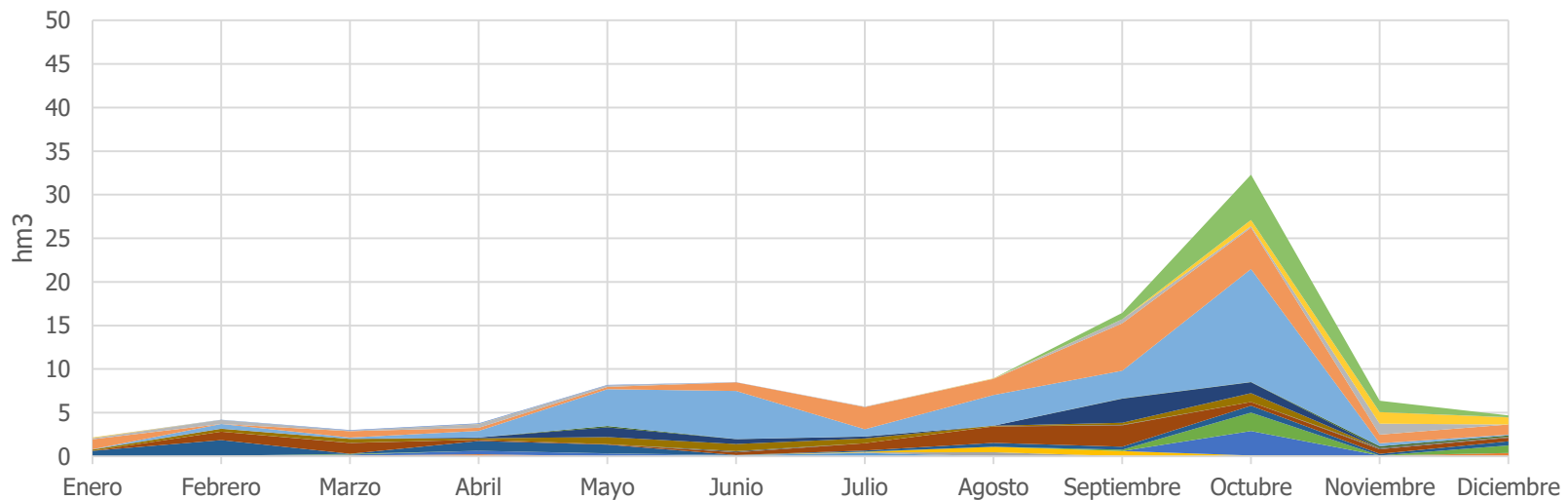
■ SC1 ■ SC2 ■ SC4 ■ SC5 ■ SC6 y 10 ■ SC12 ■ SC13 ■ SC14 ■ SC16 ■ SC17 ■ SC20 ■ SC21 II ■ SC22 ■ SC24 ■ SC25 ■ SC28 ■ SC28 I ■ SC29

DINAMICO

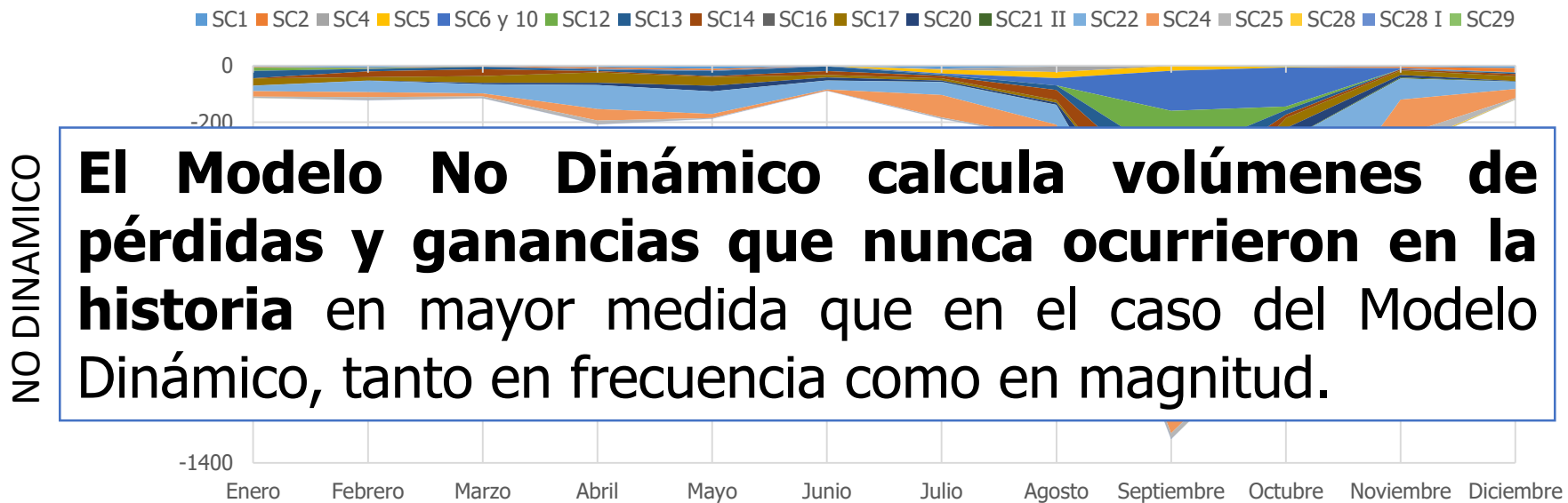
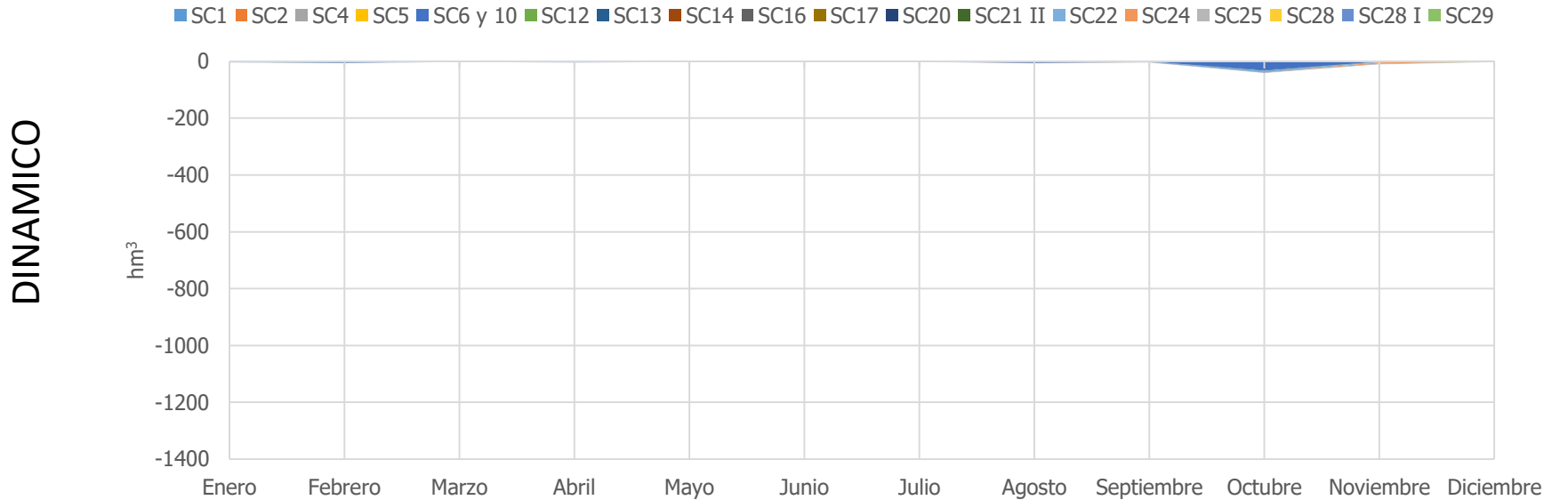


NO DINAMICO

■ SC1 ■ SC2 ■ SC4 ■ SC5 ■ SC6 y 10 ■ SC12 ■ SC13 ■ SC14 ■ SC16 ■ SC17 ■ SC20 ■ SC21 II ■ SC22 ■ SC24 ■ SC25 ■ SC28 ■ SC28 I ■ SC29



Acumulado de excedentes Mínimos del rango Vpg anualizados (59 años)



El Modelo No Dinámico calcula volúmenes de pérdidas y ganancias que nunca ocurrieron en la historia en mayor medida que en el caso del Modelo Dinámico, tanto en frecuencia como en magnitud.

CONSECUENCIAS PUNTUALES DEL USO DE LOS MODELOS



Incremento

203.018

Volumen de salida Boquilla			
Fecha	Referencia	Ejemplo	EFICIENCIA DE REFERENCIA
ene-80	25.799	25.799	
feb-80	101.980	101.980	
mar-80	186.859	186.859	
abr-80	140.677	140.677	
may-80	141.153	141.153	
jun-80	150.490	150.490	
jul-80	140.906	140.906	
ago-80	122.221	122.221	
sep-80	46.982	250.000	
oct-80	50.688	50.688	
nov-80	65.237	65.237	
EFICIENCIA DE REFERENCIA:			0.134
ene-81	20.263	20.263	
feb-81	40.329	40.329	
mar-81	186.859	186.859	

No Dinámico

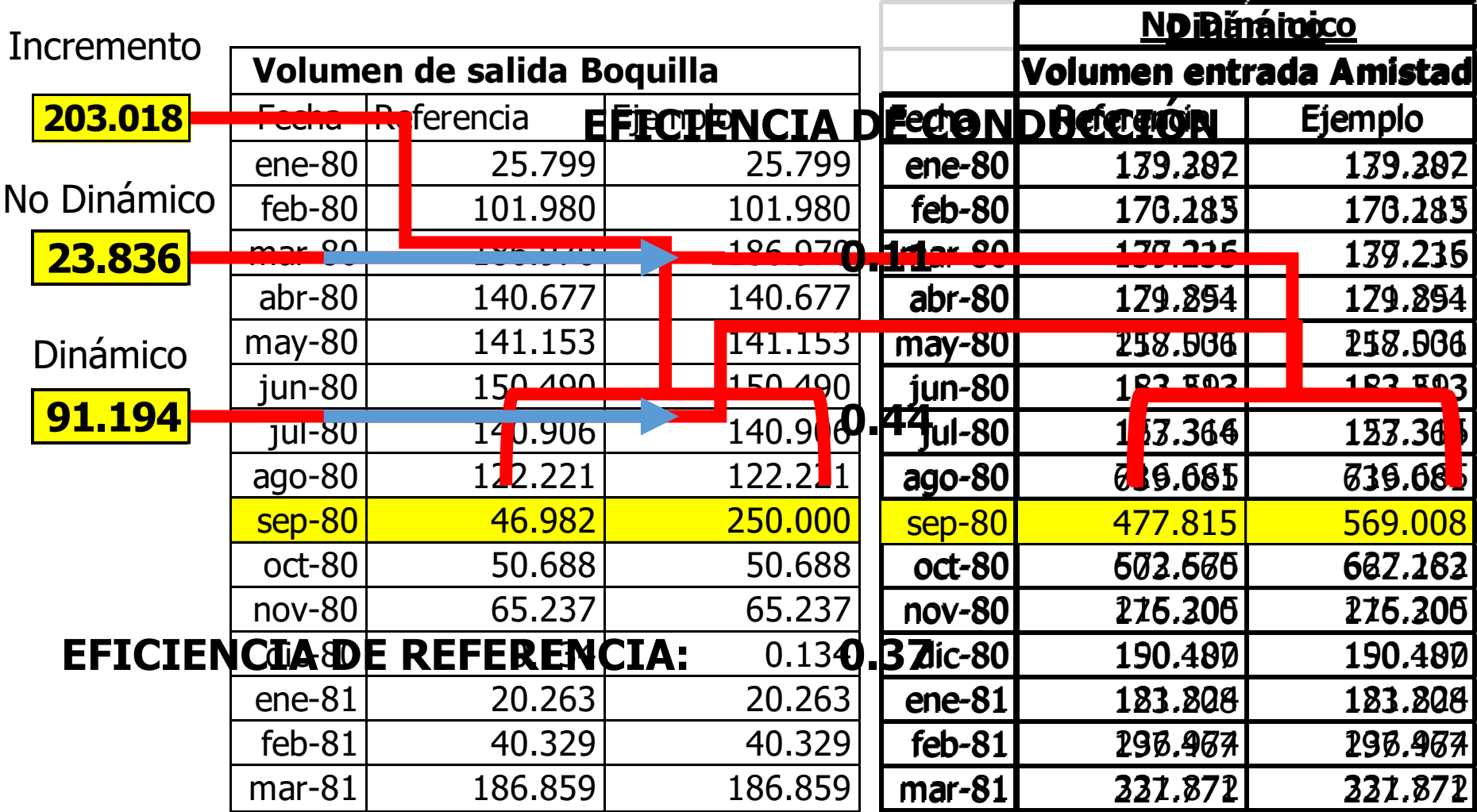
23.836

ND Dinámico		
Fecha	Ejemplo	EFICIENCIA DE REFERENCIA
ene-80	139.282	
feb-80	170.285	
mar-80	139.235	
abr-80	129.894	
may-80	258.906	
jun-80	183.803	
jul-80	183.366	
ago-80	639.665	
sep-80	477.815	
oct-80	602.566	
nov-80	215.205	
dic-80	190.480	
ene-81	183.808	
feb-81	290.967	
mar-81	227.872	

91.194

EFICIENCIA DE REFERENCIA: 0.134

Dinámico



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE LA APLICACIÓN NO DINÁMICA:



- El uso de los 708 términos premultiplicados $C_{ab} \cdot Ab$ por cada subcuenca no cuenta con un fundamento teórico sólido que justifique o valide su uso. Adicionalmente, no son términos calibrados en forma simultánea con los demás.
- Los cálculos tienden a ser inconsistentes con respecto al plano V_{pg} caracterizado con la historia y a los rangos históricos.
- Su planteamiento causa una sobrecalibración que reproduce satisfactoriamente el escenario histórico, pero para escenarios alternos arroja resultados inconsistentes e incoherentes.
- **La alta variabilidad de sus resultados, lo vuelve poco confiable para escenarios alternos.**

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE LA APLICACIÓN DINÁMICA:



- El Modelo Dinámico conserva satisfactoriamente la calibración.
- Para escenarios alternos, calcula volúmenes que se encuentran en rango de los parámetros empíricos.
- Los valores de V_{pg} , A_r y A_b se ajustan a la ecuación de pérdidas y ganancias de manera consistente.
- La parametrización de los coeficientes C_{ar} , C_{ab} y D es adecuada, encontrándose que deben hacerse correcciones mínimas para refinar la estimación (SC5).
- La aplicación de las ecuaciones dinámicas se justifica teóricamente en Aldama (**2008**); Silva-Hidalgo, H. (**2010**); Silva-Hidalgo, H.; López-Corzo, R.; García, A. & Verduzco, L. (**2012**); UACH, Facultad de Ingeniería (**2013**); UACH, Facultad de Ingeniería (**2016**) y Zetina, E.; Aparicio, F. & Elizalde, M. (**2018**).

HIPERVÍNCULOS

se desarrolla un modelo del volumen de pérdidas -que incluyen la evaporación en el cauce, la infiltración, las extracciones no contabilizadas- y ganancias -que representan las aportaciones subsuperficiales y subterráneas que constituyen el escurrimiento base y los efectos tardíos de los retornos de riego. Dicho modelo matemático cumple los requisitos de ser simple y estar expresado en términos de los volúmenes de escurrimiento desde aguas arriba y hacia aguas abajo, cuyos valores son conocidos en cuencas aforadas. La naturaleza del propio modelo hace indivisibles las pérdidas de las ganancias y más bien las representa en forma agrupada, ya sea como pérdidas netas o ganancias netas.

Para diferentes valores supuestos de la fracción que los retornos de riego representan de las correspondientes extracciones, se aplica el principio de parsimonia, para realizar una estimación *a priori* del escurrimiento directo, la cual consiste en igualarla a los volúmenes residuales disminuidos por los retornos cuando aquéllos son positivos, y hacerla nula cuando son negativos. Esto implica hacer nulos los volúmenes de pérdidas y ganancias cuando los volúmenes residuales son positivos, e iguales a dichos volúmenes cuando éstos son negativos. En otras palabras se elige la explicación más parsimoniosa o más simple para explicar los

se desarrolla un modelo del volumen de pérdidas -que incluyen la evaporación en el cauce, la infiltración, las extracciones no contabilizadas- y ganancias -que representan las aportaciones subsuperficiales y subterráneas que constituyen el escurrimiento base y los efectos tardíos de los retornos de riego. Dicho modelo matemático cumple los requisitos de ser simple y estar expresado en términos de los volúmenes de escurrimiento desde aguas arriba y hacia aguas abajo, cuyos valores son conocidos en cuencas aforadas. La naturaleza del propio modelo hace indivisibles las pérdidas de las ganancias y más bien las representa en forma agrupada, ya sea como pérdidas netas o ganancias netas.

Consultor: Dr. Álvaro Alberto ALDAMA-RODRÍGUEZ (México)



Diciembre 2008

Finalmente, se lleva a cabo un estudio detallado del cumplimiento del Tratado sobre Distribución de las Aguas Internacionales celebrado entre México y los Estados Unidos. Se demuestra, mediante análisis hidrológicos y estadísticos, que nuestro país ha cumplido las disposiciones tanto del Tratado como del Acta 234, reglamentaria de dicho instrumento jurídico.



CENTRO DE INVESTIGACION EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.
POSGRADO

MODELO MATEMÁTICO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL EN CUENCAS HIDROLÓGICAS

Tesis que como requisito para obtener el grado de:

Doctor en Ciencia y Tecnología Ambiental

presentado de forma natural; el método planteado en el presente trabajo permite la estimación conjunta de las ganancias y pérdidas a lo largo del tramo de cauce, más no su disociación. Por tanto, $[E_{cp,i}^{r,n,(k)}]^{apos}$ representa un estimador del volumen

Director de tesis:

Dr. Ignacio Ramiro Martín Domínguez

Chihuahua, Chih., Marzo de 2010

4.8 Conclusiones

valores de escurrimiento natural que físicamente son imposibles (valores negativos).

Aprovechando el análisis detallado de las variables que inciden en el balance hídrico de un tramo de río, fue posible proponer un método robusto para la determinación conjunta de los escurrimientos naturales restituidos, del retorno de irrigación, así como del volumen neto ganado y perdido en los cauces. El método permite completar la ecuación de balance, dando lugar a una mejor estimación de los escurrimientos naturales a la salida de la cuenca, así como del escurrimiento directo a lo largo del cauce. Los valores de escurrimiento natural restituido que se obtuvieron con este método en la cuenca del río bravo resultaron físicamente posibles (no negativos); las tasas (porcentajes) de retorno de irrigación procedente de los distritos de riego que fueron obtenidas, resultaron consistentes con las características físicas de cada zona agrícola así como con la infraestructura y técnicas de riego existentes.

En conclusión, no siempre posible restituir el escurrimiento natural total por dos razones. En primer término, para cuencas con un alto grado de aprovechamiento de sus recursos hídricos la parametrización de pérdidas y ganancias refleja el estado de alteración sucedido a través de los años. En segundo, no es posible estimar mediante restitución el volumen de escurrimiento base que se hubiera presentado de forma natural; el método planteado en el presente trabajo permite la estimación conjunta de las ganancias y pérdidas a lo largo del tramo de cauce, más no su disociación. Por tanto, $[E_{cp,i}^{r,n,(k)}]^{apos}$ representa un estimador del volumen de escurrimiento restituido neto por cuenca propia, que no es otra cosa que el escurrimiento neto total para el estado alterado de la cuenca que es drenada por el tramo de cauce bajo estudio. Este estimador es lo más cercano al escurrimiento



CENTRO DE INVESTIGACION EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.
POSGRADO

MODELO MATEMÁTICO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL EN CUENCAS HIDROLÓGICAS

5.4 Escurrimiento directo medio mensual, retornos de irrigación, volumen neto de pérdidas y ganancias y escurrimiento restituído neto medio mensual por cuenca propia que llaga aguas abajo en subcuencas intermedias y de emisión.

En la Figura 5.19, se observa que los montículos en el estiaje prácticamente han desaparecido en el hidrograma de escurrimiento directo medio mensual, por lo que el valor de $\rho = 0.36$ se considera apropiado; este hidrograma se puede considerar como el definitivo para la SC-VII.

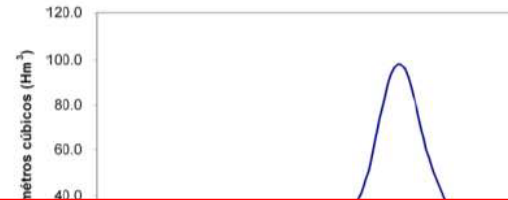
Tabla 5.3. Parámetros del modelo de pérdidas y ganancias para la SC-VII

Mes k	$C_{ar}^{(k)}$	$C_{ab}^{(k)}$	D	Coefficiente de correlación
Enero	0.0095895	-0.0075494	0.01918829	0.1841
Febrero	0.1827450	-0.0410521	-0.10757132	0.7903
Marzo	0.1845572	3.5321008	-0.01038005	0.8576
Abril	0.2733362	0.0000000	-0.11453463	0.8317
Mayo	0.2795730	-0.2827258	0.30862294	0.8550
Junio	0.1860041	-0.0317286	-0.04128820	0.7551
Julio	0.2593444	-0.1763832	0.85578181	0.6921
Agosto	0.4750736	-0.3513829	0.88580975	0.7758
Septiembre	0.5182857	-0.3209894	0.57834726	0.8387
Octubre	0.0048331	-0.0045330	0.16987187	0.2120
Noviembre	0.0302817	-0.0271399	0.06508527	0.2313
Diciembre	0.2435766	-0.1650366	0.03694554	0.5862

Los valores correspondientes a los parámetros obtenidos mediante regresión múltiple del modelo de pérdidas y ganancias para la SC-VII, así como los valores del coeficiente de correlación, se muestran en la Tabla 5.3. Aunque algunos de los valores son positivos (pérdidas) y otros son negativos (ganancias), su interpretación o uso debe ser en forma conjunta (modelo de pérdidas y ganancias), como ganancias o pérdidas netas, según corresponda. Los valores de los coeficientes de correlación obtenidos son muy razonables considerando la sencillez del modelo de pérdidas y ganancias, con la excepción de los meses de enero y diciembre, para los cuales los eventos correspondientes a valores negativos del residual modificado son poco frecuentes.



CONAGUA - JCAS - CILA



Los valores correspondientes a los parámetros obtenidos mediante regresión múltiple del modelo de pérdidas y ganancias para la SC 28, se muestran en la Tabla 6.8. Aunque algunos de los valores son positivos (pérdidas) y otros son negativos (ganancias), su interpretación o uso debe ser en forma conjunta (modelo de pérdidas y ganancias), como ganancias o pérdidas netas, según corresponda.



Determinación conjunta de escurrimientos naturales restituidos, retornos de irrigación y volumen neto de pérdidas y ganancias en la cuenca del río Bravo (parte mexicana), para el periodo de 1950 al año 2008.

INFORME TÉCNICO

GRUPO INTERINSTITUCIONAL TÉCNICO DE TRABAJO (GITT), CONSEJO DE CUENCA RÍO BRAVO (CCRB).

Tabla 6.8. Parámetros del modelo de pérdidas y ganancias para la SC 28

Mes k	$C_{ar}^{(k)}$	$C_{ab}^{(k)}$	D
Enero	0.26207533	-0.22245091	0.34938702
Febrero	0.17245869	-0.23315221	5.42100773
Marzo	0.39486270	-0.37555429	1.34758283
Abril	0.02776426	-0.04699255	2.76165269
Mayo	0.00773292	-0.02029182	3.80165944
Junio	0.00336608	-0.02500941	3.47871787
Julio	0.08553878	-0.11351982	2.74414943
Agosto	-0.0038419	-0.00442066	1.31419041
Septiembre	0.01017272	-0.00688544	1.316671
Octubre	0.07972737	-0.04761886	1.82176387
Noviembre	0.16931220	-0.10464214	1.74250377
Diciembre	0.39128262	-0.3125872	-0.08339299

El escurrimiento natural restituido que se presenta a la salida de la SC 28 es del orden de 321.87 Hm³; su hidrograma resultante se presenta en la Figura 6.68.

Monterrey Nuevo León, 14 de diciembre de 2012





5.4 Escurrimiento directo medio mensual, retornos de irrigación, volumen neto de pérdidas y ganancias y escurrimiento restituído neto medio mensual por cuenca propia que llaga aguas abajo en subcuencas intermedias y de emisión.

En la Figura 5.19, se observa que los montículos en el estiaje prácticamente han desaparecido en el hidrograma de escurrimiento directo medio mensual, por lo

Tabla 5.3. Parámetros del modelo de pérdidas y ganancias para la SC-VII

Mes k	$C_{ar}^{(k)}$	$C_{ab}^{(k)}$	D	Coefficiente de correlación
Enero	0.0095895	-0.0075494	0.01918829	0.1841
Febrero	0.1827450	-0.0410521	-0.10757132	0.7903
Marzo	0.1845572	3.5321008	-0.01038005	0.8576
Abril	0.2733362	0.0000000	-0.11453463	0.8317
Mayo	0.2795730	-0.2827258	0.30862294	0.8550
Junio	0.1860041	-0.0317286	-0.04128820	0.7551
Julio	0.2593444	-0.1763832	0.85578181	0.6921
Agosto	0.4750736	-0.3513829	0.88580975	0.7758
Septiembre	0.5182857	-0.3209894	0.57834726	0.8387
Octubre	0.0048331	-0.0045330	0.16987187	0.2120
Noviembre	0.0302817	-0.0271399	0.06508527	0.2313
Diciembre	0.2435766	-0.1650366	0.03694554	0.5862

Chihuahua, Chih., Marzo de 2010



MODELO DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS

Modelo original ([Aldama, 2008](#); [Silva-Hidalgo, 2010](#))

$$V_{pg_j}^k = C_{ar}^k Ar_j^k + C_{ab}^k Ab_j^k + D^k$$

j = número de año
 $k = 1, 2, \dots, 12$

La calibración (estimación de C_{ar}^k , C_{ab}^k y D^k , $k = 1, 2, \dots, 12$) se hizo con esta ecuación

Modelo no dinámico modificado con premultiplicación:
(sin documentar)

$$V_{pg_j}^r = C_{ar}^r Ar_j^r + [C_{ab} Ab]_j^r + D^r$$

j = número de año **del registro**;
 $r = 1, 2, \dots, 12$

$$V_{pg_j}^r = C_{ar}^r Ar_j^r + P_j^r + D^r$$

Se tienen $59 \times 12 = 708$ valores **fijos** de P que corresponden al registro histórico y no a otros escenarios. P_j^r no fue calibrado en forma conjunta con los demás parámetros.

Modelos diferentes

[VOLVER](#)

LA HIPÓTESIS DEL FLUJO BASE

METODOLOGÍA PARA ESTIMAR PÉRDIDAS Y GANANCIAS



En Aldama (2008) y Silva-Hidalgo (2010), los autores emplean un análisis de escalas múltiples para identificar la dependencia de los términos involucrados en la ecuación de pérdidas y ganancias:

- Gastos de infiltración
- Evaporación
- Extracciones no contabilizadas
- Aportación subsuperficial y subterránea (flujo base)

Como resultado llegan a la forma parametrizada del volumen de pérdidas y ganancias, así como a la definición de cada uno de los términos que la componen.

PARAMETRIZACIÓN DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS

61

4.5 El problema de estimación

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{x_0}^{x_0+L} q_i[h(x, \tau); x, \tau] dx d\tau = \{\alpha_i + \beta_i [h_r - \tilde{h}'(Q_r) Q_r] L\} \Delta t + \beta_i \tilde{h}'(Q_r) [\mu A_r(t) + v \tilde{A}_b(t)] L + \{r_i + [\varepsilon_{moh} + r_h + \tilde{h}'(Q_r) + \varepsilon_{apqL}]\beta_i\} L \Delta t \quad (7.75)$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{x_0}^{x_0+L} q_{ev}[h(x, \tau); x, \tau] dx d\tau = \{\alpha_{ev} + \beta_{ev} [h_r - \tilde{h}'(Q_r) Q_r] L\} \Delta t + \beta_{ev} \tilde{h}'(Q_r) [\mu A_r(t) + v \tilde{A}_b(t)] L + \{r_{ev} + [\varepsilon_{moh} + r_h + \tilde{h}'(Q_r) + \varepsilon_{apqL}]\beta_{ev}\} L \Delta t \quad (7.76)$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{x_0}^{x_0+L} q_{en}[h(x, \tau); x, \tau] dx d\tau = \{\alpha_{en} + \beta_{en} [h_r - \tilde{h}'(Q_r) Q_r] L\} \Delta t + \beta_{en} \tilde{h}'(Q_r) [\mu A_r(t) + v \tilde{A}_b(t)] L + \{r_{en} + [\varepsilon_{moh} + r_h + \tilde{h}'(Q_r) + \varepsilon_{apqL}]\beta_{en}\} L \Delta t \quad (7.77)$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{x_0}^{x_0+L} q_{sub}[h(x, \tau); x, \tau] dx d\tau = \{\alpha_{sub} + \beta_{sub} [h_r - \tilde{h}'(Q_r) Q_r] L\} \Delta t + \beta_{sub} \tilde{h}'(Q_r) [\mu A_r(t) + v \tilde{A}_b(t)] L + \{r_{sub} + [\varepsilon_{moh} + r_h + \tilde{h}'(Q_r) + \varepsilon_{apqL}]\beta_{sub}\} L \Delta t \quad (7.78)$$

donde se han empleado las Ecs. (7.27) y (7.31). Sustituyendo las Ecs. (7.75) en la Ec. (7.47) permite escribir:

$$V_{pg}(t; \Delta t) = C_{ar} A_r(t) + C_{ab} \tilde{A}_b(t) + D - \varepsilon_{mov} \quad (7.79)$$

siendo:

$$C_{ar} = C_{ar}(x_m, t_m; Q_r) = (\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub}) \tilde{h}'(Q_r) \mu L \quad (7.80)$$

$$C_{ab} = C_{ab}(x_m, t_m; Q_r) = (\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub}) \tilde{h}'(Q_r) v L \quad (7.81)$$

$$D = D(x_m, t_m; Q_r) = \{\alpha_i + \alpha_{ev} + \alpha_{en} - \alpha_{sub} + (\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub}) [h_r - \tilde{h}'(Q_r) Q_r] L\} \Delta t \quad (7.82)$$

$$\varepsilon_{mov} = \varepsilon_{mov}(x_m, t_m; Q_r) = \{r_i + r_{ev} + r_{en} - r_{sub} + [\varepsilon_{moh} + r_h + \tilde{h}'(Q_r) + \varepsilon_{apqL}](\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub})\} L \Delta t \quad (7.83)$$

En la Ec. (7.79) - ε_{mov} representa el error de modelación del volumen de pérdidas y ganancias. Obsérvese que en dicha ecuación aparece el volumen de escurrimiento aguas abajo como el correspondiente al extremo inferior del cauce, $\tilde{A}_b(t)$, y no como el volumen de escurrimiento

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{x_0}^{x_0+L} q_i[h(x, \tau); x, \tau] dx d\tau = \{\alpha_i + \beta_i [h_r - \tilde{h}'(Q_r) Q_r] L\} \Delta t + \beta_i \tilde{h}'(Q_r) [\mu A_r(t) + v \tilde{A}_b(t)] L + \{r_i + [\varepsilon_{moh} + r_h + \tilde{h}'(Q_r) + \varepsilon_{apqL}]\beta_i\} L \Delta t \quad (4.73)$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{x_0}^{x_0+L} q_{ev}[h(x, \tau); x, \tau] dx d\tau = \{\alpha_{ev} + \beta_{ev} [h_r - \tilde{h}'(Q_r) Q_r] L\} \Delta t + \beta_{ev} \tilde{h}'(Q_r) [\mu A_r(t) + v \tilde{A}_b(t)] L + \{r_{ev} + [\varepsilon_{moh} + r_h + \tilde{h}'(Q_r) + \varepsilon_{apqL}]\beta_{ev}\} L \Delta t \quad (4.74)$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{x_0}^{x_0+L} q_{en}[h(x, \tau); x, \tau] dx d\tau = \{\alpha_{en} + \beta_{en} [h_r - \tilde{h}'(Q_r) Q_r] L\} \Delta t + \beta_{en} \tilde{h}'(Q_r) [\mu A_r(t) + v \tilde{A}_b(t)] L + \{r_{en} + [\varepsilon_{moh} + r_h + \tilde{h}'(Q_r) + \varepsilon_{apqL}]\beta_{en}\} L \Delta t \quad (4.75)$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{x_0}^{x_0+L} q_{sub}[h(x, \tau); x, \tau] dx d\tau = \{\alpha_{sub} + \beta_{sub} [h_r - \tilde{h}'(Q_r) Q_r] L\} \Delta t + \beta_{sub} \tilde{h}'(Q_r) [\mu A_r(t) + v \tilde{A}_b(t)] L + \{r_{sub} + [\varepsilon_{moh} + r_h + \tilde{h}'(Q_r) + \varepsilon_{apqL}]\beta_{sub}\} L \Delta t \quad (4.76)$$

donde se han empleado las Ecs. (4.11) y (4.15). Sustituyendo las Ecs. (4.73)-(4.76) en la Ec. (4.40) permite escribir:

$$V_{pg}(t; \Delta t) = C_{ar} A_r(t) + C_{ab} \tilde{A}_b(t) + D - \varepsilon_{mov} \quad (4.77)$$

siendo:

$$C_{ar} = C_{ar}(x_m, t_m; Q_r) = (\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub}) \tilde{h}'(Q_r) \mu L \quad (4.78)$$

$$C_{ab} = C_{ab}(x_m, t_m; Q_r) = (\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub}) \tilde{h}'(Q_r) v L \quad (4.79)$$

TÉRMINOS INVOLUCRADOS EN LOS COEFICIENTES

$$V_{pg}(t; \Delta t) = C_{ar}A_r(t) + C_{ab}\bar{A}_b(t) + D - \varepsilon_{mov} \quad (7.79)$$

siendo:

$$C_{ar} = C_{ar}(X_m, t_m; Q_r) = (\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub})\bar{h}'(Q_r)\mu L \quad (7.80)$$

$$C_{ab} = C_{ab}(X_m, t_m; Q_r) = (\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub})\bar{h}'(Q_r)\nu L \quad (7.81)$$

$$D = D(X_m, t_m; Q_r) = \{\alpha_i + \alpha_{ev} + \alpha_{en} - \alpha_{sub} + (\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub})[h_r - \bar{h}'(Q_r)Q_r]L\}\Delta t \quad (7.82)$$

$$\varepsilon_{mov} = \varepsilon_{mov}(X_m, t_m; Q_r) = \{r_i + r_{ev} + r_{en} - r_{sub} + [\varepsilon_{moh} + r_h + \bar{h}'(Q_r) + \varepsilon_{apq}L](\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub})\}L\Delta t \quad (7.83)$$

donde

$$\left. \begin{aligned} \alpha_i &= [\bar{q}_i(h_r; X_m, T_m) - h_r(\partial \bar{q}_i / \partial h)_{(h_r, X_m, T_m)}]L \\ \beta_i &= h_r(\partial \bar{q}_i / \partial h)_{(h_r, X_m, T_m)} \end{aligned} \right\} \quad (7.66)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{ev} &= [\bar{q}_{ev}(h_r; X_m, T_m) - h_r(\partial \bar{q}_{ev} / \partial h)_{(h_r, X_m, T_m)}]L \\ \beta_{ev} &= h_r(\partial \bar{q}_{ev} / \partial h)_{(h_r, X_m, T_m)} \end{aligned} \right\} \quad (7.67)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{en} &= [\bar{q}_{en}(h_r; X_m, T_m) - h_r(\partial \bar{q}_{en} / \partial h)_{(h_r, X_m, T_m)}]L \\ \beta_{en} &= h_r(\partial \bar{q}_{en} / \partial h)_{(h_r, X_m, T_m)} \end{aligned} \right\} \quad (7.68)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{sub} &= [\bar{q}_{sub}(h_r; X_m, T_m) - h_r(\partial \bar{q}_{sub} / \partial h)_{(h_r, X_m, T_m)}]L \\ \beta_{sub} &= h_r(\partial \bar{q}_{sub} / \partial h)_{(h_r, X_m, T_m)} \end{aligned} \right\} \quad (7.69)$$

$$V_{pg}(t; \Delta t) = C_{ar}A_r(t) + C_{ab}\bar{A}_b(t) + D - \varepsilon_{mov} \quad (4.77)$$

siendo:

$$C_{ar} = C_{ar}(X_m, t_m; Q_r) = (\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub})\bar{h}'(Q_r)\mu L \quad (4.78)$$

$$C_{ab} = C_{ab}(X_m, t_m; Q_r) = (\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub})\bar{h}'(Q_r)\nu L \quad (4.79)$$

$$D = D(X_m, t_m; Q_r) = \{\alpha_i + \alpha_{ev} + \alpha_{en} - \alpha_{sub} + (\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub})[h_r - \bar{h}'(Q_r)Q_r]L\}\Delta t \quad (4.80)$$

$$\varepsilon_{mov} = \varepsilon_{mov}(X_m, t_m; Q_r) = \{r_i + r_{ev} + r_{en} - r_{sub} + [\varepsilon_{moh} + r_h + \bar{h}'(Q_r) + \varepsilon_{apq}L](\beta_i + \beta_{ev} + \beta_{en} - \beta_{sub})\}L\Delta t \quad (4.81)$$

donde

$$\left. \begin{aligned} \alpha_i &= [\bar{q}_i(h_r; X_m, T_m) - h_r(\partial \bar{q}_i / \partial h)_{(h_r, X_m, T_m)}]L \\ \beta_i &= h_r(\partial \bar{q}_i / \partial h)_{(h_r, X_m, T_m)} \end{aligned} \right\} \quad (4.59)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{ev} &= [\bar{q}_{ev}(h_r; X_m, T_m) - h_r(\partial \bar{q}_{ev} / \partial h)_{(h_r, X_m, T_m)}]L \\ \beta_{ev} &= h_r(\partial \bar{q}_{ev} / \partial h)_{(h_r, X_m, T_m)} \end{aligned} \right\} \quad (4.60)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{en} &= [\bar{q}_{en}(h_r; X_m, T_m) - h_r(\partial \bar{q}_{en} / \partial h)_{(h_r, X_m, T_m)}]L \\ \beta_{en} &= h_r(\partial \bar{q}_{en} / \partial h)_{(h_r, X_m, T_m)} \end{aligned} \right\} \quad (4.61)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{sub} &= [\bar{q}_{sub}(h_r; X_m, T_m) - h_r(\partial \bar{q}_{sub} / \partial h)_{(h_r, X_m, T_m)}]L \\ \beta_{sub} &= h_r(\partial \bar{q}_{sub} / \partial h)_{(h_r, X_m, T_m)} \end{aligned} \right\} \quad (4.62)$$

En febrero de 2018 la SGT/CONAGUA dio a conocer una modificación al uso de la función de pérdidas y ganancias que de acuerdo con ellos permite calcular “correctamente” esta variable en forma dinámica, lo que implica que **las ganancias en un tramo de río (flujo base y flujo subsuperficial principalmente) son función de los flujos de agua que egresan al segmento del río (A_b)** y no de los niveles de agua en el subsuelo en la región adyacente al cauce.

Silva, H.H., López, C. R (2018). ASESORÍA TÉCNICA AL CONSEJO DE CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA EL ANÁLISIS DEL MODELO MATEMÁTICO DINÁMICO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO (RH 24, BRAVO –CONCHOS) Informe Final de actividades de la Etapa 1; p. 41

71

En conclusión, **no es posible restituir el escurrimiento natural total por dos razones. En primer término, la parametrización de pérdidas y ganancias refleja el estado alterado, esto es no natural, de la cuenca. En segundo, no es posible estimar el volumen de escurrimiento base natural, el cual sería función de los escurrimientos desde aguas arriba y hacia aguas abajo naturales, los cuales son desconocidos. Por tanto, $[E_{i,j}^{(k)}]^{*pos}$ representa un estimador del volumen de escurrimiento neto total para el estado alterado de la cuenca que es drenada por el tramo de cauce bajo estudio.**

Aldama, A. (2008). *Determinación del Balance Hidráulico y Disponibilidad Mensual de las Aguas Superficiales de la Región Hidrológica No. 24, Bravo–Conchos*. México: Organización Meteorológica Mundial; pp. 58, 59 y 61



Ar y Ab dependen del flujo base

CÁLCULO DEL VOLUMEN AGUAS ABAJO PARA EL ANÁLISIS

Silva-Hidalgo (2010) establece la estructura matemática del modelo de distribución, planteando las ecuaciones que gobiernan el funcionamiento de una cuenca hidrológica para cuatro posibles casos:

7.3 Estructura matemática del modelo de distribución de agua (ecuaciones que gobiernan el funcionamiento de los sistemas de presas-ríos en una cuenca hidrológica).

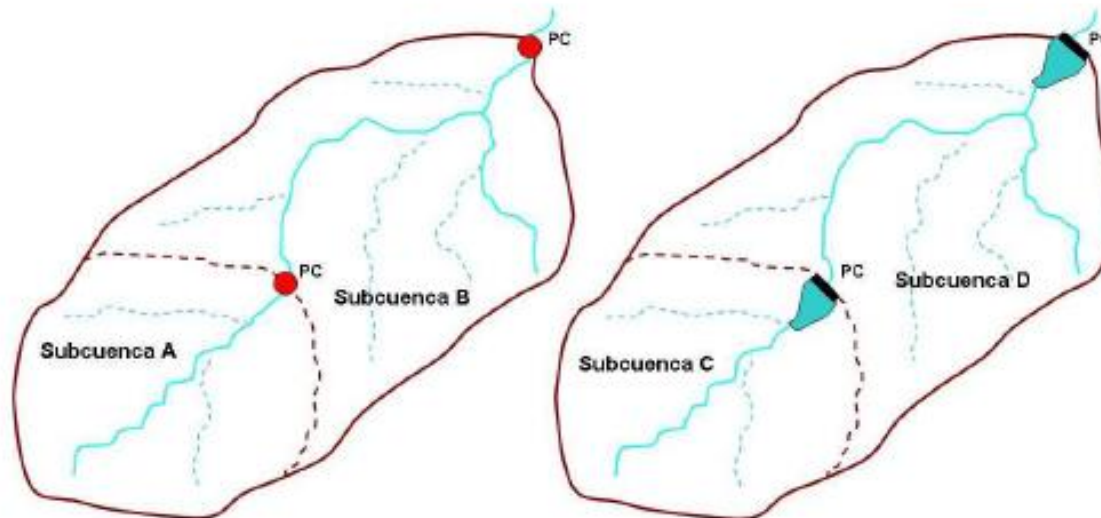


Figura 7.2. Configuración de sistemas de presa-ríos en una cuenca hidrológica.

CÁLCULO DEL VOLUMEN AGUAS ABAJO PARA EL ANÁLISIS

a) Cuenca de cabecera sin embalse a la salida

$$A_b(t; \Delta t) = I_m(t; \Delta t) + E_{cp}^{nr}(t; \Delta t) + R(t; \Delta t) - E_x(t; \Delta t) - E_{xt}(t; \Delta t) \quad (7.1)$$

b) Cuenca intermedia o de emisión sin embalse a la salida

$$A_b(t; \Delta t) = [A_r(t; \Delta t) + I_m(t; \Delta t) + E_d(t; \Delta t) + R(t; \Delta t) - E_x(t; \Delta t) - E_{xt}(t; \Delta t) - C_{ar}A_r(t; \Delta t) + D] / (1 - C_{ab}) \quad (7.2)$$

c) Cuenca de cabecera con embalse a la salida

$$E_p(t; \Delta t) = A_b(t; \Delta t) = I_m(t; \Delta t) + E_{cp}^{nr}(t; \Delta t) + R(t; \Delta t) - E_x(t; \Delta t) - E_{xt}(t; \Delta t) \quad (7.3)$$

d) Cuenca intermedia o de emisión con embalse a la salida

$$E_p(t; \Delta t) = A_b(t; \Delta t) = [A_r(t; \Delta t) + I_m(t; \Delta t) + E_d(t; \Delta t) + R(t; \Delta t) - E_x(t; \Delta t) - E_{xt}(t; \Delta t) - C_{ar}A_r(t; \Delta t) + D] / (1 - C_{ab}) \quad (7.4)$$

COMPARACIÓN CON EL MODELO DINÁMICO

ENTRADAS CONOCIDAS

$$A_b(t; \Delta t) = [A_r(t; \Delta t) + I_m(t; \Delta t) + E_d(t; \Delta t) + R(t; \Delta t) - E_x(t; \Delta t) - E_{xt}(t; \Delta t) - C_{ar} \cdot A_r(t; \Delta t) + D] / (1 - C_{ab}) \quad (7.2)$$

SALIDAS CONOCIDAS



$$Ab = [Ar + E_c - S_c - C_{ar} \cdot Ar + D] / (1 - C_{ab})$$

- **Modelo Dinámico.** Se plantea la ecuación de balance hidrológico para calcular Ab y se resuelve el sistema simultáneo (dos ecuaciones, dos incógnitas):

$$V_{pg} = C_{ar} \cdot Ar + C_{ab} \cdot Ab + D$$

$$Ab = Ar + E_c - S_c + V_{pg}$$

ENTRADAS CONOCIDAS

SALIDAS CONOCIDAS



$$Ab = [Ar + E_c - S_c + C_{ar} \cdot Ar + D] / (1 - C_{ab})$$

CONCLUSIONES

- Con base en la información bibliográfica, se puede observar que la propuesta No Dinámica no emplea la ecuación de pérdidas y ganancias conforme al planteamiento matemático y la metodología de aplicación, la cual fue aceptada en el seno del GEM en septiembre de 2010 (Acuerdo 2010.VIII.001).
- No existe documentación que avalen el uso del término constante $C_{ab} \cdot Ab$ o justifique un fundamento teórico sólido para su implementación.

