

# **HIDROLOGÍA URBANA DE ZONAS SERRANAS**

## **EN MISIONES - CASOS DE ESTUDIO**

**Avances de tesis doctoral: “Estudio de dinámica de los excedentes hídricos superficiales en cuencas urbanas de alta pendiente y sus implicancias en los procesos erosivos. Caso de estudio región urbana de la ciudad de Oberá, Misiones”**

**Darío Tomás Rodríguez <sup>1,2</sup>**

**Director: Dr. Ing. Gerardo Adrián Riccardi <sup>2,3,4</sup>**

**Codirector: Mgter. Ing. Alejandro Ricardo Ruberto <sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Becario CONICET, Departamento de Ingeniería Civil, FI-UNaM, <sup>2</sup>Departamento de Hidráulica, Escuela de Ingeniería Civil, FCElyA-UNR <sup>3</sup>Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM), FCElyA-UNR, <sup>4</sup> Consejo de Investigaciones UNR. <sup>5</sup> Grupo de Investigación del Departamento de Hidráulica, FI-UNNE.

Correo-e: [tomas8448@hotmail.com](mailto:tomas8448@hotmail.com)

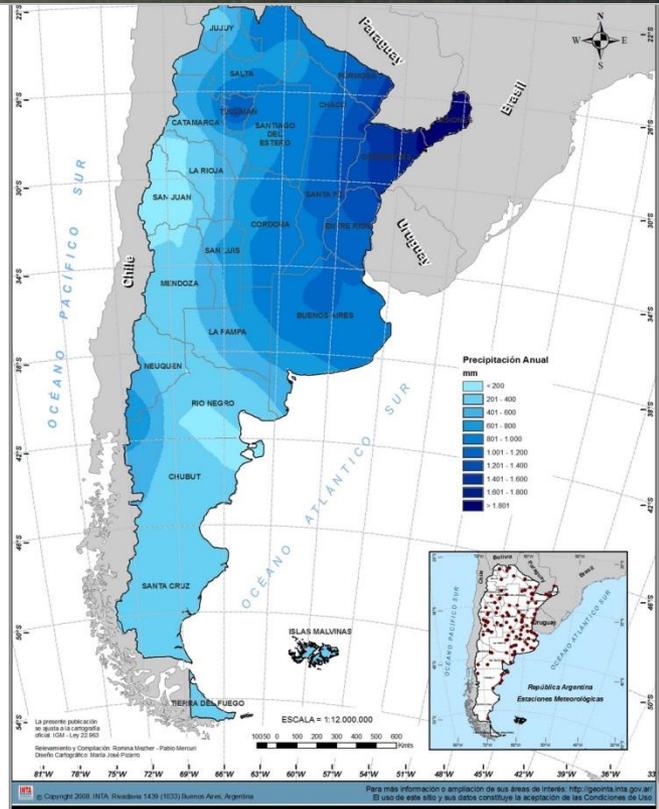
# ORGANIZACIÓN DE LA PRESENTACIÓN

- 1- INTODUCCIÓN
- 2- OBJETIVO DE LA TESIS
- 3- LA CUENCA EN ESTUDIO
- 4- CONSTITUCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO
- 5- EVALUACIÓN DE AMENAZA POR INUNDACIÓN EN CALLES
- 6- ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS POR EROSIÓN HÍDIRCA
- 7- ACTIVIDADES PROPUETAS PARA LA CULMINACIÓN DE LA TESIS

# 1-INTRODUCCIÓN

## La provincia de Misiones

- Región subtropical húmeda, sin estación seca.
- Precipitaciones convectivas intensas, generalmente por frentes fríos del Sudoeste.
- Suelos y cobertura vegetal autóctona capaces de reducir los excedentes hídricos superficiales.
- Topografía escarpada capaz de concentrar y evacuar velozmente el escurrimiento superficial.



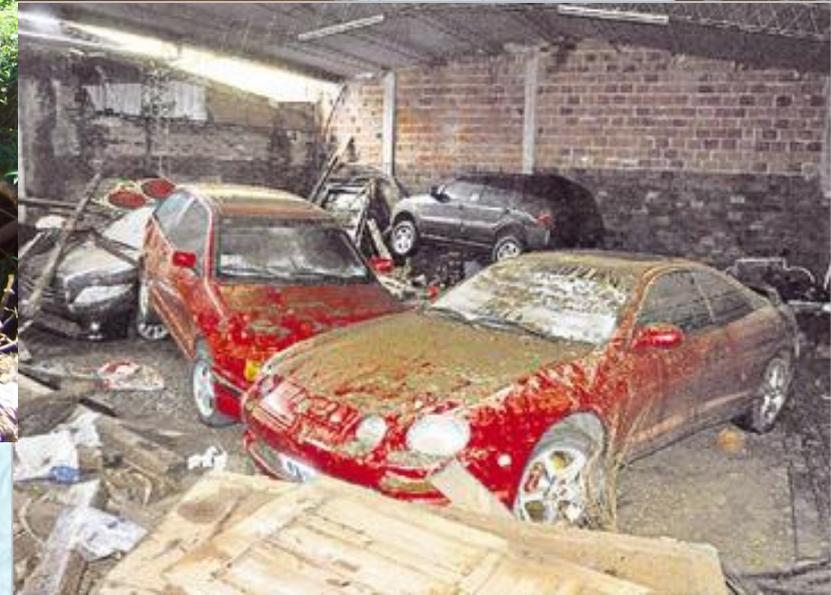
La expansión urbanística comienza a evidenciar aumento del riesgo de inundación; decrecimiento de la calidad del agua superficial y subterránea; e incremento los procesos de erosión y sedimentación.

Viviendas y calles anegadas



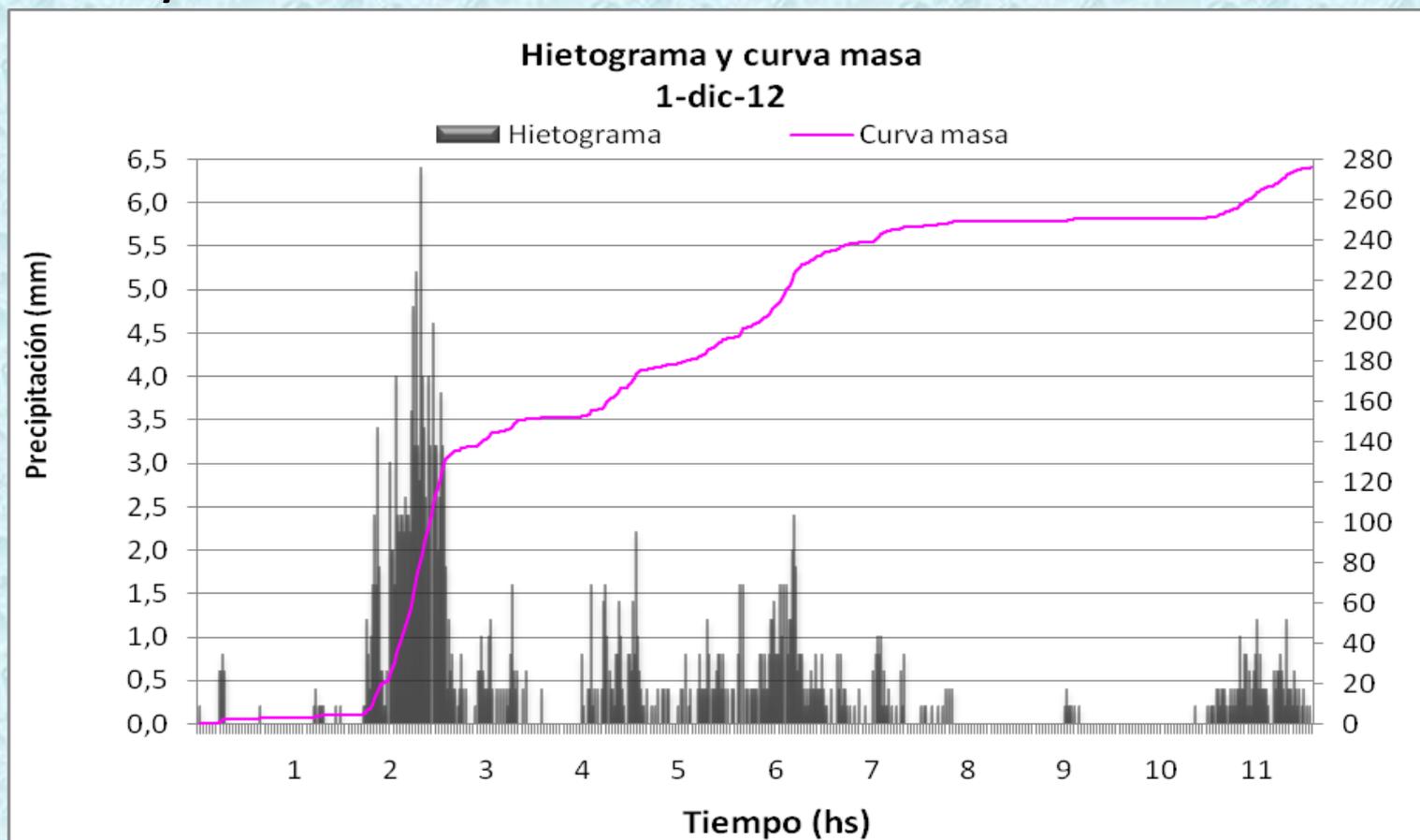
Marcados procesos de erosión

Vehículos arrastrados por la corriente



## Tormenta del 1-dic-12

Evento sin registros precedentes, donde precipitaron 276.6 mm en 11 hs y 36 min, con 6.4 mm en el minuto de máxima intensidad y 72 mm en 20 min.



El desborde de los arroyos Tuichá y Mbotaby provocaron 300 evacuados y 500 afectados, records para la ciudad y la región.

## Tormenta del 1-ene-2015

Fuertes tormenta en toda la provincia. 5 personas fallecidas por inundaciones a causa de desbordes de arroyos internos.

En Oberá, un hombre fue arrastrado más de 2000m por la corriente del arroyo Mbotaby.



### Según dato de la CELO

- 30 diciembre: 53mm.
- 31 de diciembre: 15mm
- 1 de enero: 202mm,  
con 150mm caídos en 5hs.



## La ciudad de Oberá

- Módulo pluviométrico 1925mm.
- Máximo registrado 2639 mm en 2002.
- En promedio 96 días de lluvias al año.
- Ubicada sobre la Sierra Central.
- Población del municipio 66112 hab, 96.7 % es urbana (censo 2010).
- Ciudad joven, fundada en 1927, conserva grandes áreas verdes.

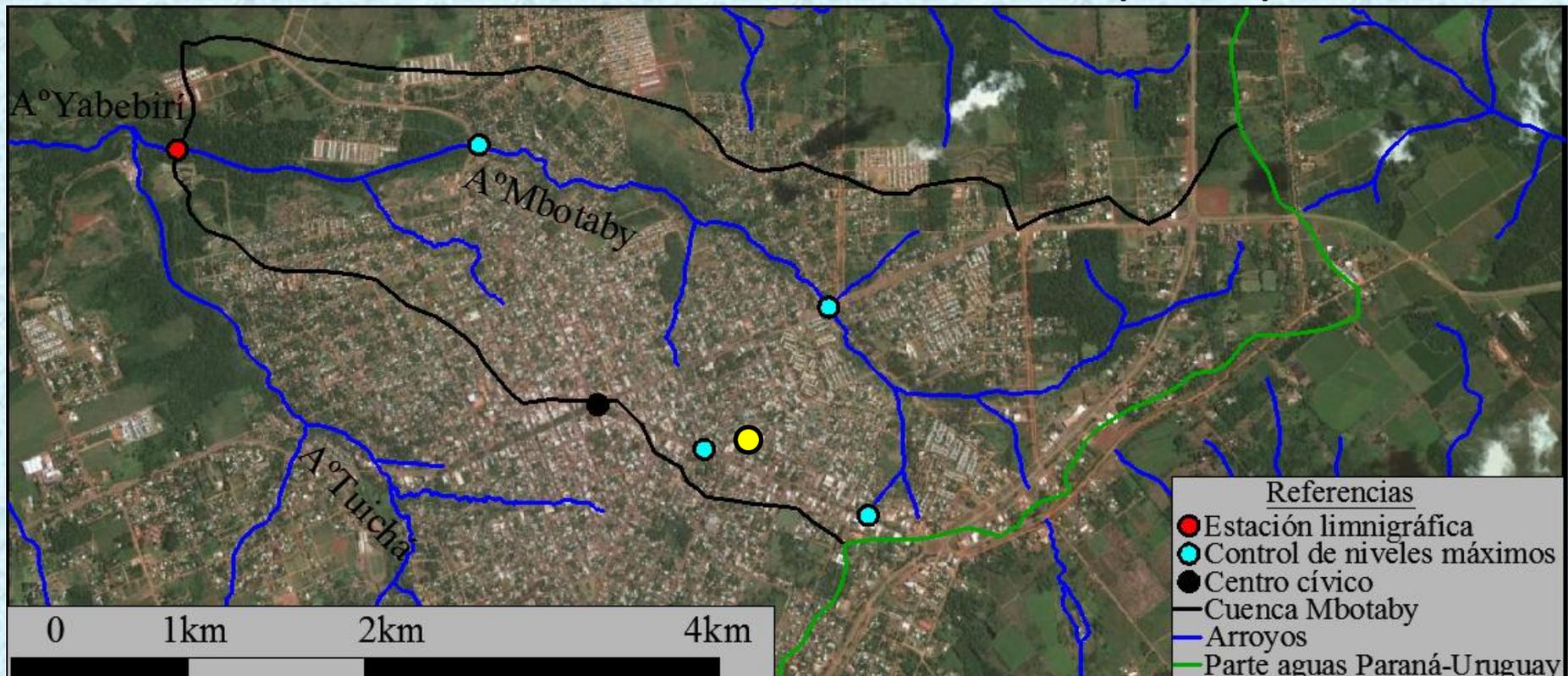


## 2-OBJETIVO DE LA TESIS

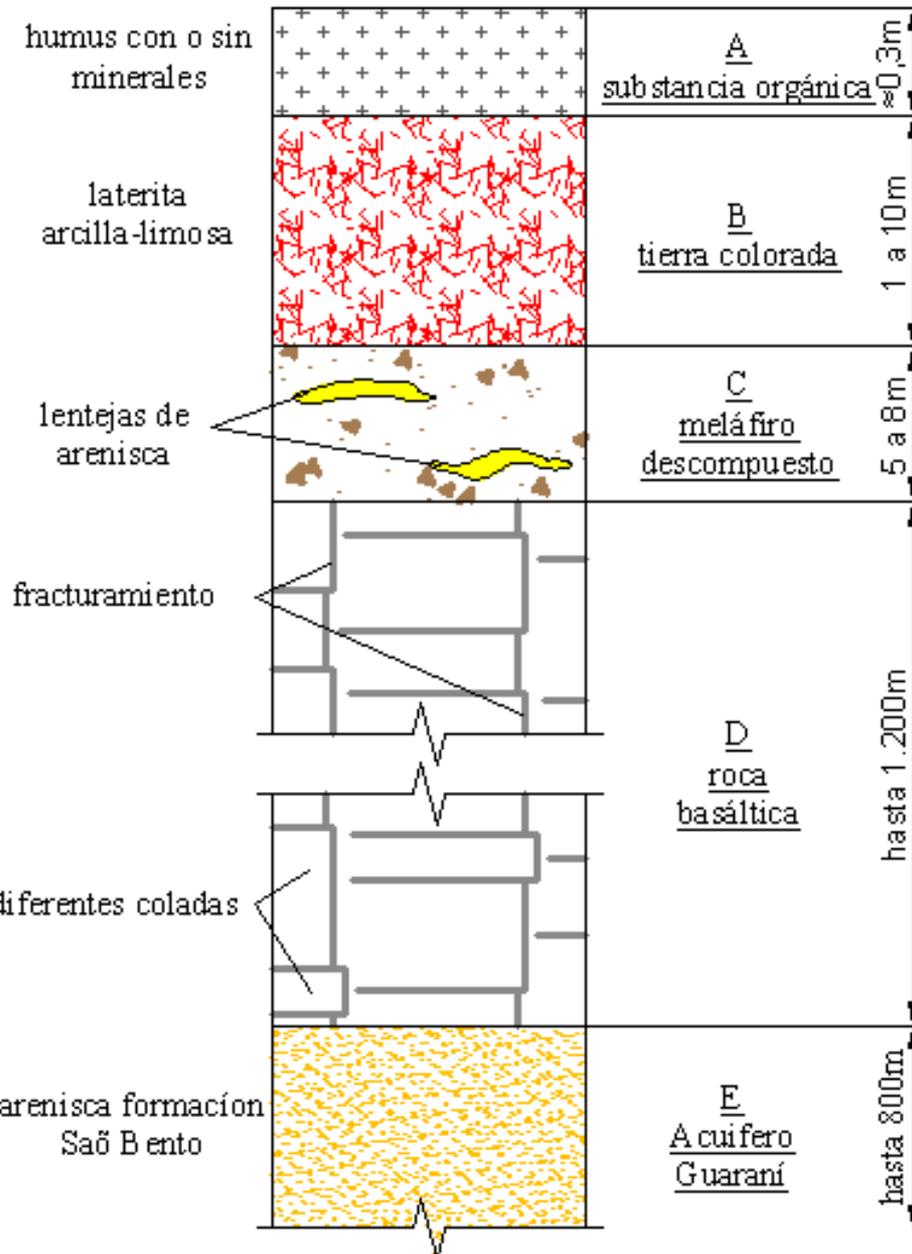
El objetivo general es la descripción de la dinámica de los excedentes hídricos superficiales y sus implicancias en la generación de procesos de erosión y sedimentación en el ambiente urbano de la región de Oberá (Misiones), caracterizado por abundantes lluvias (media anual  $> 1500$  mm), elevadas pendientes topográficas ( $> 1\%$ ) y suelos susceptibles de ser erosionados por la elevada velocidad que alcanza el escurrimiento superficial.

### 3- LA CUENCA EN ESTUDIO

- Cuenca del arroyo Mbotaby. 976.41 Ha de aporte, recoge el 40% de los desagües pluviales urbanos de la ciudad.
- Áreas impermeables 24%. Zonas residenciales hasta reservas
- Calles de pavimento y tierra, 60% con cordón cuneta de HºAº
- Pendiente media de la cuenca 5.5%, cauce principal 2%.



# Perfil estratigráfico



## Arcilla-limosa

### (tierra colorada)

- 9% de arenas
- 39% de limos
- 52% arcillas
- con 2% de materia orgánica



## Relevamiento de ocupación y usos del suelo

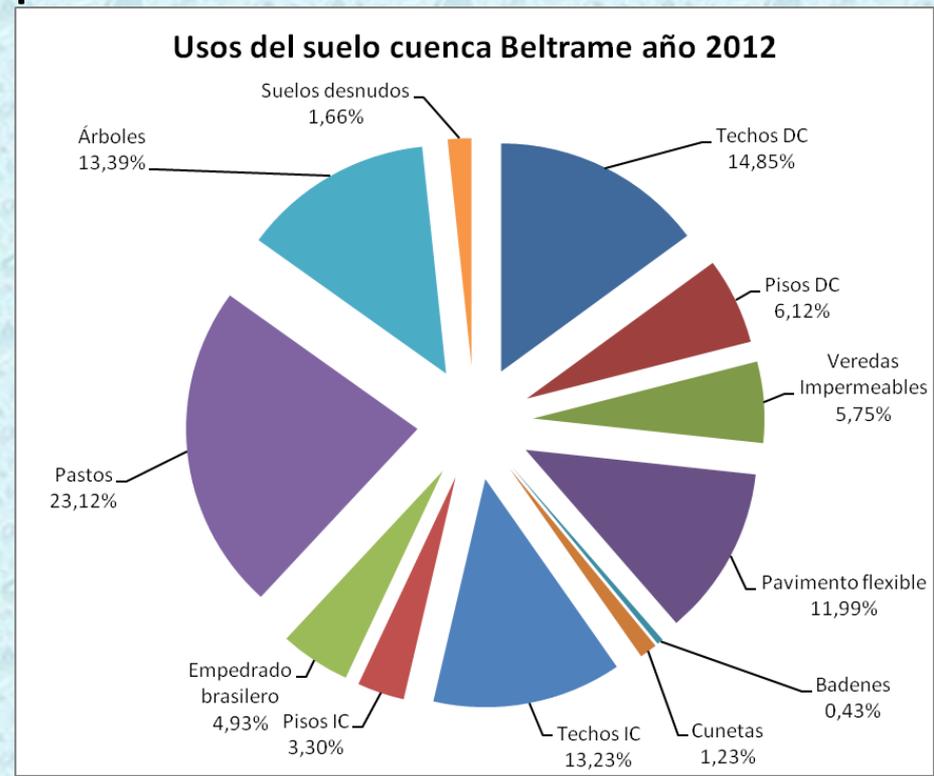
Para la discretización de los usos del suelo se utilizaron simultáneamente cuatro procedimientos:

- Revisión de la carta orgánica de la ciudad.
- Evaluación por imagen satelital.
- Comparación con investigaciones precedentes.
- Relevamiento in-situ de puntos particulares.

## Investigaciones precedentes:

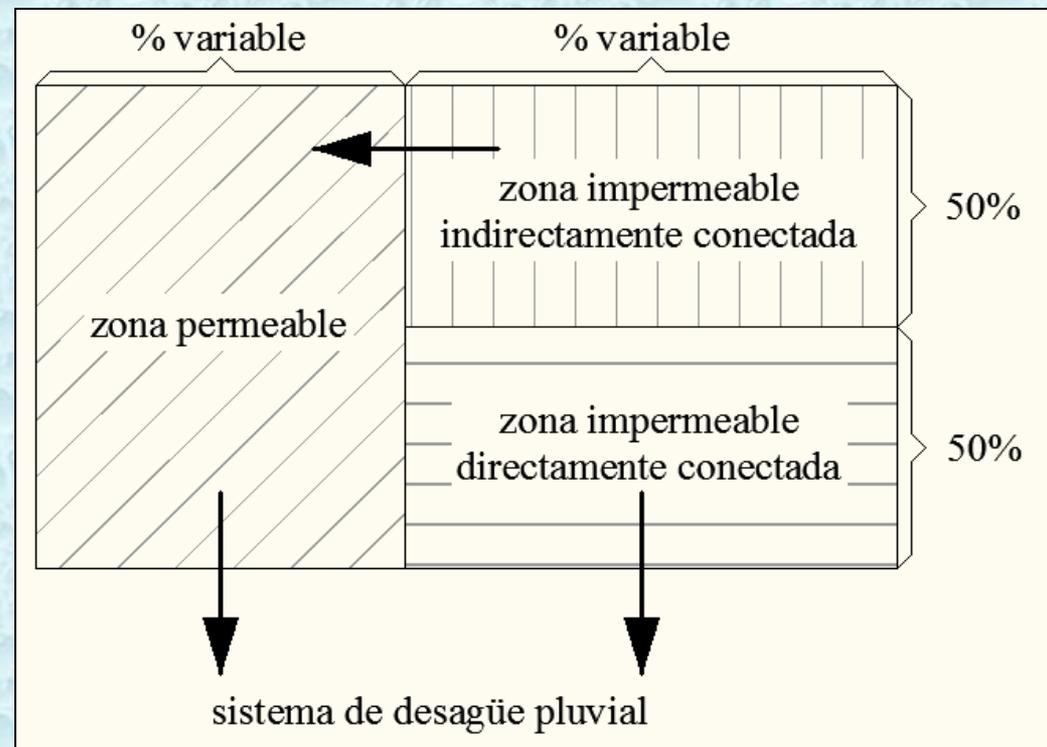
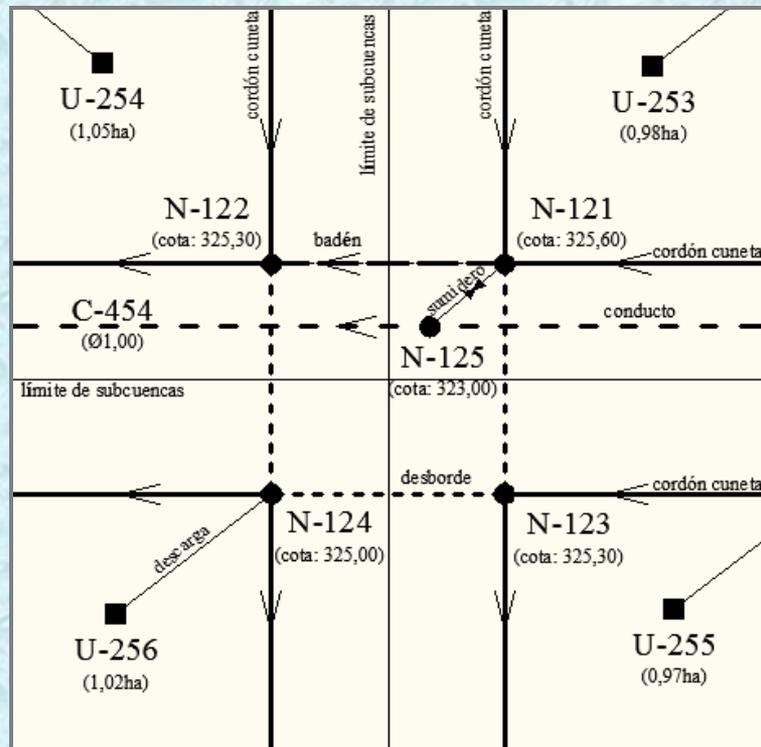
Relevamiento y calibración de la respuesta hidrológica de la cuenca Beltrame año 2012.

- Sup. imp.: 61,84%.
- Sup. imp. DC: 65,30%.
- Sup. imp. DC respecto del total: 40,38%.



# 4- CONSTITUCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO

- Se modela con el SWMM 5.0vE (GMMF, 2005).
- Al menos 4 nodos por boca calle y 2 conductos por calle.
- 1 subcuenca por cada manzana, incluyendo la mitad de calle.
- Áreas impermeables IC descargando a patios y zonas verdes.



Esquema del modelo en bocacalle

Ejemplo de interacción zonas permeables e impermeables

# Calibración del modelo

Registro de precipitación y niveles a la salida de la cuenca

Hietogramas: Pluviómetro digital FIO. Precisión: 0.2 mm y 1 min.

Limnigramas: Reglas y DataLogger. Precisión: 1cm y 5 min.



Nivel de desborde 1.80 m, base 0.5 m.

Máximos reg.: 2.46m, 1.69m/s, 69m<sup>3</sup>/s



La condición de borde utilizada para la calibración y explotación del modelo fue la curva h-Q en el punto de salida.

## Tormentas utilizadas para la calibración

Fecha	P. total	Duración	Diferencia vol. esc.	Diferencia nivel max.
[dd-mmm-aa]	[mm]	[d:hs:min]	[%]	[%]
06-ago-13	66.6	0:04:05	1.5	0.5
23, 24, 25 y 26-ago-13	258.6	3:18:00	0.2	0
21-sep-13	25.6	0:05:15	3.1	sin registro
21-oct-13	122.2	0:04:00	0.3	sin registro

## Evento del 6 de agosto de 2013

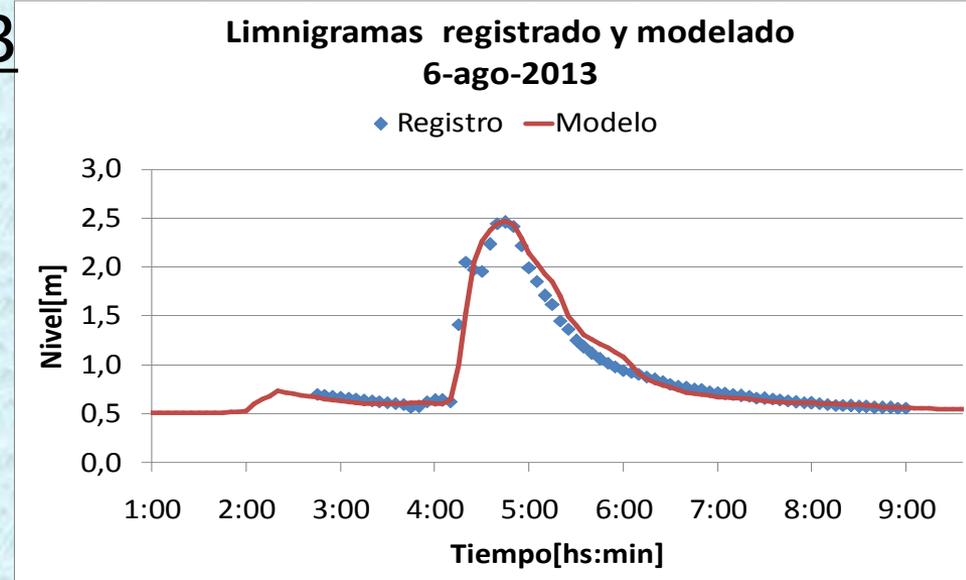
Nivel máx. observado: 2.46 m.

Nivel máx. modelo: 2.47 m.

Vol. esc. observado: 25153m<sup>3</sup>

Vol. esc. modelo: 25536m<sup>3</sup>

Además del punto de salida, niveles en 4 puntos internos de la cuenca fueron contrastados con errores menores al 15%.



## Zonificaciones utilizadas

Zonificación	% de superficie impermeables	% de superficie impermeable DC respecto de las sup. imp. total	CN II áreas permeables
Distrito central	85	90	74
Residencial de densidad alta	65	70	74
Residencial de densidad media	45	50	74
Residencial de densidad baja	25	30	74
Loteos nuevos e intrusión	5	10	70
Industrias	25	30	74
Parques y canchas	2,5	5	70
Reservas ecológicas	0	0	66
Rutas asfaltadas	45	50	74
Ruta de tierra	25	30	70

## Rugosidad utilizadas para las distintas superficies de escurrimiento

Coeficientes de Manning utilizados [adm]					
Subcuencas	Áreas permeable	0.100	Calles de tierra	Calzada	0.040
	Áreas impermeable	0.018		Cuneta	0.030
Calles de pavimento flexible	Calzada	0.020		Veredas	0.050
	Cuneta	0.018	Conductos de hormigón		0.015
	Veredas	0.025	Zanjas de tierra	Lecho	0.030
Calles de empedrado tipo brasilero	Calzada	0.025	tierra	Valle	0.100
	Cuneta	0.018	Arroyos	Lecho	0.035
	Veredas	0.025		Valle	0.075

# 5- EVALUACIÓN DE AMENAZA POR INUNDACIÓN EN CALLES

## OBJETIVO

Describir la dinámica del escurrimiento superficial en las calles de la cuenca del arroyo Mbotaby, ciudad de Oberá, con fines para la evaluación de amenazas por inundación

Para ello se procedió a la elaboración de mapas de niveles y velocidades máximas mediante modelación matemática.

## Tormenta de diseño

- I-D-R INTA Cerro Azul (serie 1966-1984), a 36 km de Oberá.
- Hietograma de 12 hs, con el método de los bloques alternos

<b>Recurrencia</b>	<b>[años]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>100</b>
Precipitación total	[mm]	99.9	125.8	201.2
Intensidad media	[mm/h]	8.3	10.5	16.8
Intensidad máxima (5 min)	[mm/h]	91.0	101.8	140.7
Nivel máximo salida	[m]	2.48	2,54	2,79
Caudal máximo salida	[m <sup>3</sup> /s]	69.06	75.59	103.57
Velocidad media máxima salida	[m/s]	1.70	1.75	1.95

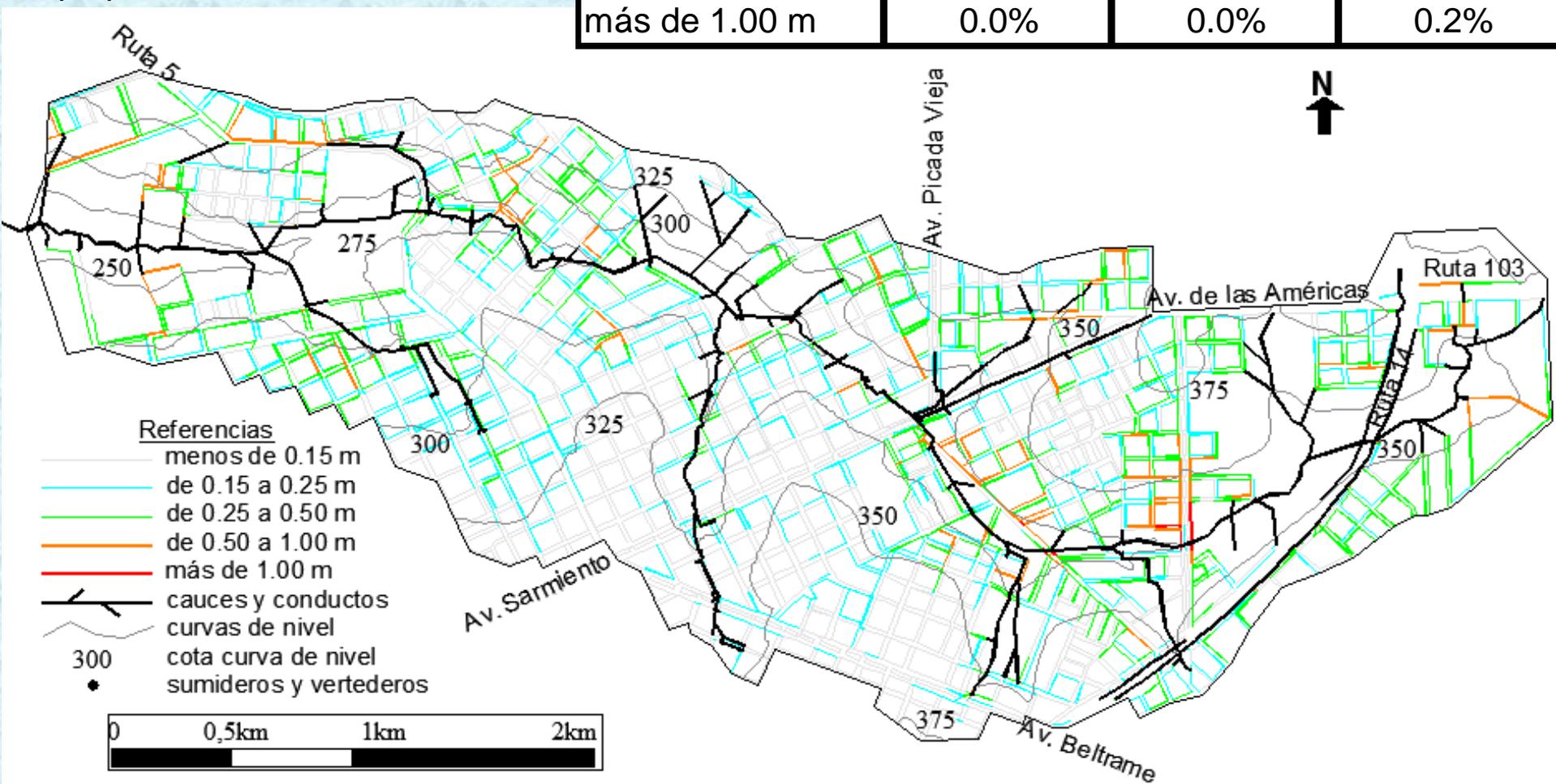
- Constitución de modelo: 972 subcuencas, 2967 nodos y 3742 elementos conductores.
- Variables hidráulicas obtenidas: tirantes y velocidades en todo el dominio espacial cada 1 minuto.
- Tiempo de cálculo: 26 min por corrida.
- Errores de continuidad menores a 1 %, para  $dt = 1$  segundo.

# Resultados obtenidos

Niveles máximos	Años de recurrencia		
	2	5	100
menos de 0.15 m	74.3%	66.7%	50.7%
de 0.15 a 0.25 m	17.8%	20.0%	24.6%
de 0.25a 0.50 m	7.0%	11.5%	18.7%
de 0.50 a 1.00 m	0.8%	1.8%	5.7%
más de 1.00 m	0.0%	0.0%	0.2%

## Niveles máximos

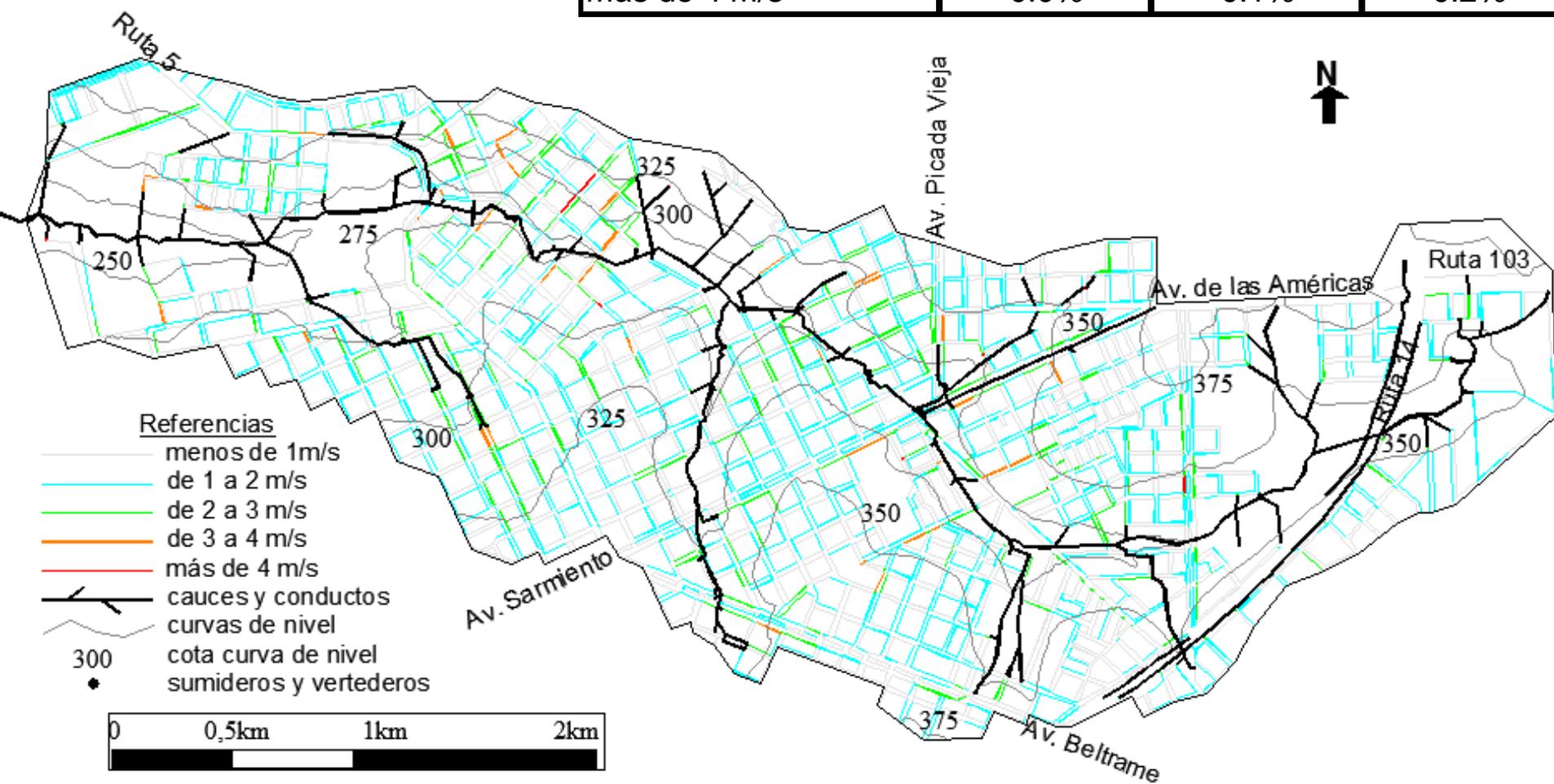
Mapa para 100 años de recurrencia



# Velocidades máximas

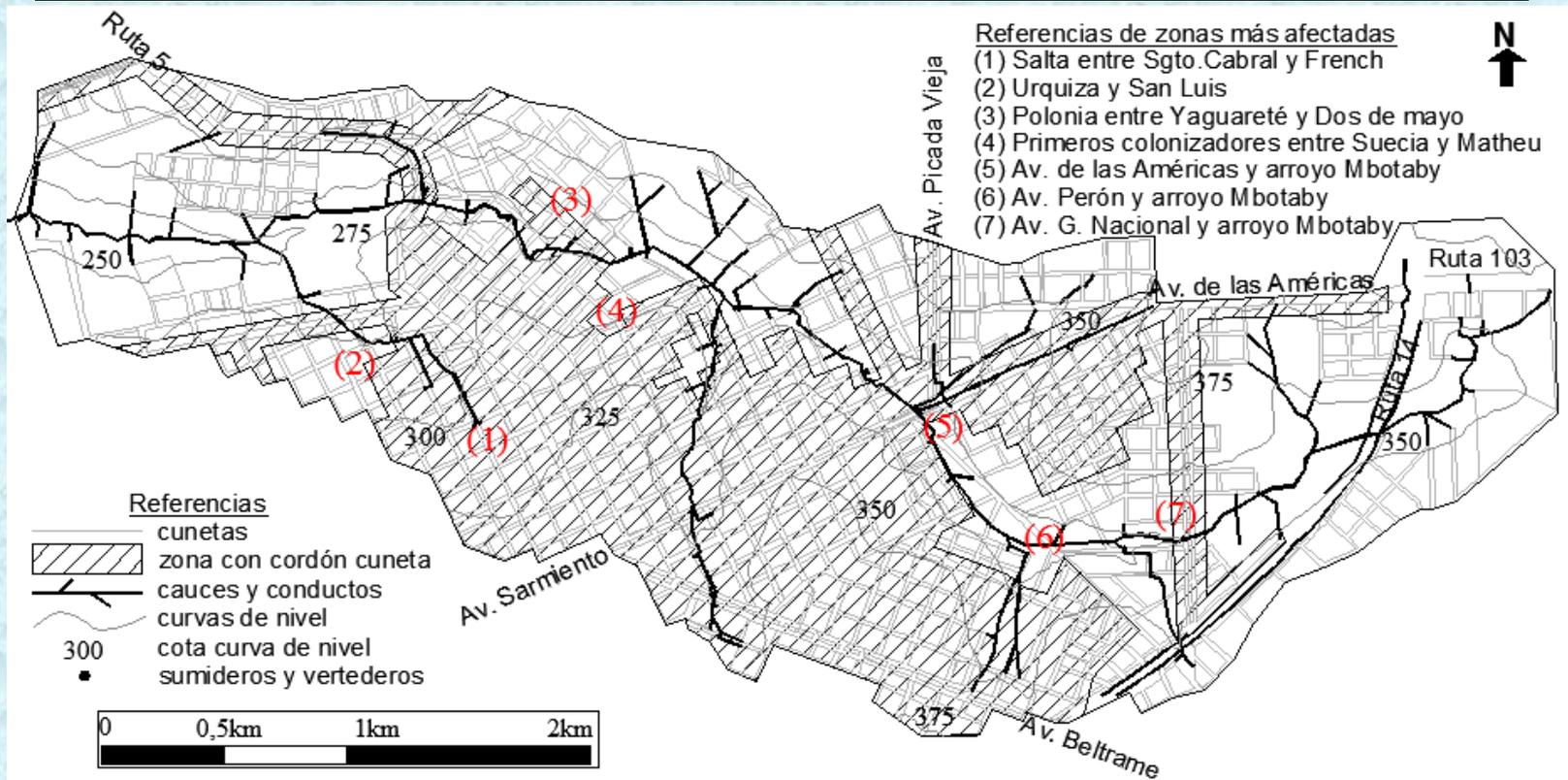
Mapa para 100 años de recurrencia

Velocidades máximas	Años de recurrencia		
	2	5	100
menos de 1 m/s	63.7%	59.4%	53.4%
de 1 a 2 m/s	31.5%	34.4%	35.7%
de 2 a 3 m/s	4.3%	5.5%	9.6%
de 3 a 4 m/s	0.5%	0.6%	1.2%
más de 4 m/s	0.0%	0.1%	0.2%



# Zonas más afectadas por combinación de niveles y velocidades

Zonas	Niveles máximos [m]			Velocidades máximas [m/s]		
	Años de recurrencia			Años de recurrencia		
	2	5	100	2	5	100
1	0.27	0.29	0.36	3.26	3.44	3.78
2	0.35	0.41	0.65	1.55	2.24	2.85
3	0.20	0.28	0.35	2.96	3.50	4.10
4	<b>0.62</b>	<b>0.68</b>	0.82	3.24	3.55	4.16
5	0.45	0.56	0.75	3.27	3.93	3.96
6	0.56	0.65	<b>1.24</b>	1.80	2.56	3.25
7	0.55	0.62	1.14	<b>3.55</b>	<b>4.05</b>	<b>4.27</b>



## CONCLUSIONES

- El SWMM 5.0vE ha mostrado un comportamiento satisfactorio para modelar este tipo de escenarios.
- Se comprueba que en cuencas como la de estudio, la evaluación por amenazas de inundación en calles se rige por la combinación de niveles y velocidades alcanzados simultáneamente, situación que facilita el arrastre de personas y animales, como la destrucción parcial de vehículos y construcciones.
- Para 2 años de recurrencia 25 % de las cunetas desbordan, para 5 años 43 % y para 100 años casi el 50 %.
- Para 2 años de recurrencia 36 % de cunetas con velocidades mayores a 1 m/s, para 5 años 40 % y para 100 años 47 %.
- 7 zonas de amenaza por inundación con una alta frecuencia.

## 6- ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS POR EROSIÓN HÍDRICA

Producción anual de sedimentos (USLE)

$$EH = 224,2 \cdot R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Donde:

EH: pérdida de suelo [T/(ha)], siendo T : toneladas métricas.

224,2: factor de conversión para llevar a unidades del sistema internacional SI.

R: factor de erosividad de la lluvia [(ton pie pulgada)/(acre h)].

K: factor de erosionabilidad del suelo [(ton acre h)/(acre ton pie pulgada)].

L: factor topográfico de longitud del terreno [adm].

S: factor topográfico de pendiente del terreno [adm].

C: factor de cobertura vegetal [adm].

P: factor de prácticas de conservación del suelo [adm].

- $R=705$  [(ton pie pulg)/(acre h)] de mapa del INTA para la ciudad de Cerro Azul 1950-2005.
- $K=0,31$  [(ton acre h)/(acre pie ton pulg)] según ecuación Wischeier y Smith (1978) para datos de LS-FI-UNaM:
- $L=(l/22,1)m$ , con  $l$  longitud de escurrimiento y  $m=0,5$ .
- $S= 0,00654s^2+0,0456s+0,065=0,51$ , para pendiente  $s=5,5\%$ .
- $C$  y  $P$  fueron adoptados para cada zonificación en función a la ocupación y usos del suelo.

# TABLA RESUMEN

Zonificación	Área		Sup. Imp.	EH Perm.	EH total		
	[ha]	[%]	[%]	[T/ha]	[T/ha]	[T]	[%]
Distrito central	34,4	3,5	85,0	4,4	0,7	22,6	0,3
Residencial alta	68,5	7,0	65,0	6,1	2,2	147,4	2,2
Residencial media	90,4	9,3	45,0	7,4	4,1	366,4	5,6
Residencial baja	221,6	22,7	25,0	8,2	6,2	1364,5	20,7
Lotes nuevos e intrusión	248,0	25,4	5,0	8,7	8,3	2051,0	31,1
Viviendas sociales	50,4	5,2	45,0	6,8	3,8	189,8	2,9
Industrias	41,6	4,3	25,0	9,6	7,2	377,1	5,7
Plazoletas	15,2	1,6	20,0	12,2	9,8	148,6	2,3
Parques y canchas	41,1	4,2	2,5	11,0	10,7	497,5	7,5
Reservas ecológicas	130,7	13,4	0,0	8,4	8,4	1263,1	19,2
Rutas asphaltadas	28,8	3,0	45,0	8,2	4,5	129,8	2,0
Ruta de tierra	6,1	0,6	25,0	8,2	6,1	37,5	0,6
<b>Superficie total</b>	<b>976,7</b>	<b>100,0</b>	<b>23,9</b>	<b>8,9</b>	<b>6,8</b>	<b>6595,3</b>	<b>100</b>

## Descarga específica

No todo el sedimento producido alcanza el punto de control. La EH se afecta por la relación de erogación de sedimentos RES.

$$\text{(Vanoni, 1975): } RES = 0,470A^{-0,125}$$

$$\text{(USDA-SCS, 1979): } RES = 0,566A^{-0,11}$$

$$\text{(Williams y Berndt, 1972): } RES = 0,627SLP^{0,403}$$

Donde: - A es el área de la cuenca: 976Ha

- SLP pendiente media del cauce principal: 2%

- (Vanoni, 1975): RES=0,353 → DE=2358T
- (USDA-SCS, 1979): RES=0,441 → DE=2909T
- (Williams y Berndt, 1972): RES=0,829 → DE=5468T

## Producción de sedimentos por evento (MUSLE)

$$DE = \alpha \left( V Q_p \right)^\beta \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Donde:

V: volumen de escurrimiento directo [m<sup>3</sup>].

Q<sub>p</sub>: caudal pico [m<sup>3</sup>/s].

α y β: coeficientes con valores 11,8 y 0,56 respectivamente.

DE, L, S, C y P: igual a la USLE.

Aquí V y Q<sub>p</sub> pueden ser determinados para cada subcuenca, mediante el modelo hidrológico-hidráulico

La producción de sedimentos estimada puede ser comparada con aforos por eventos.

## Tormenta del 19-nov-2014

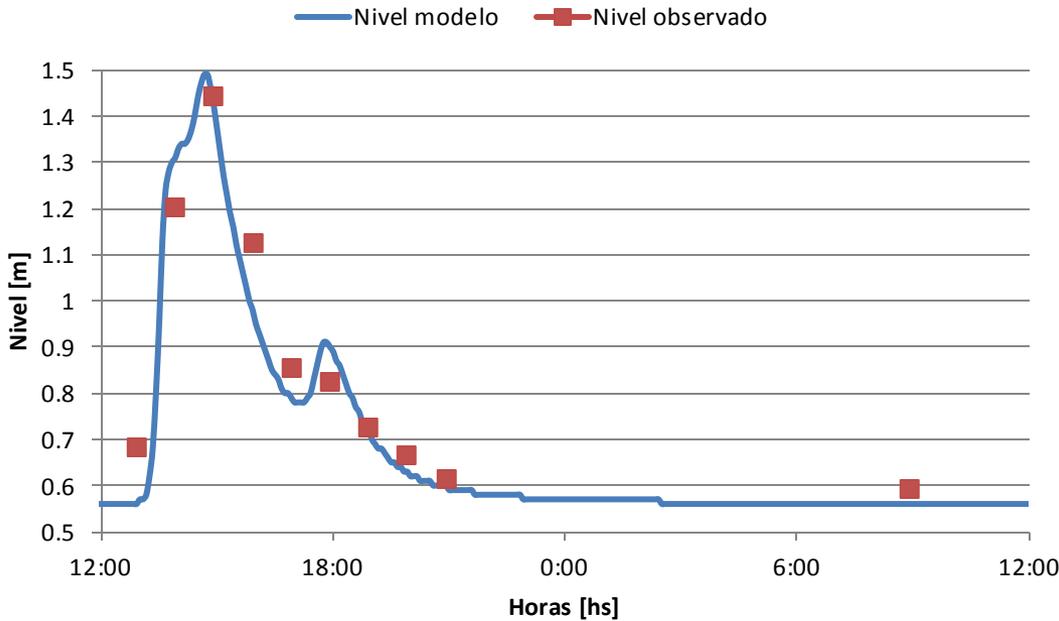
### Registros:

- Precipitación total: 44,4mm,
- Hietograma discretizado en 5min
- Duración: 6h.
- Humedad antecedente: tipo II
- Niveles el punto de control cada 1h.
- Polutograma de Total de Solidos Disueltos (TSD) cada 1 h.

### Modelación

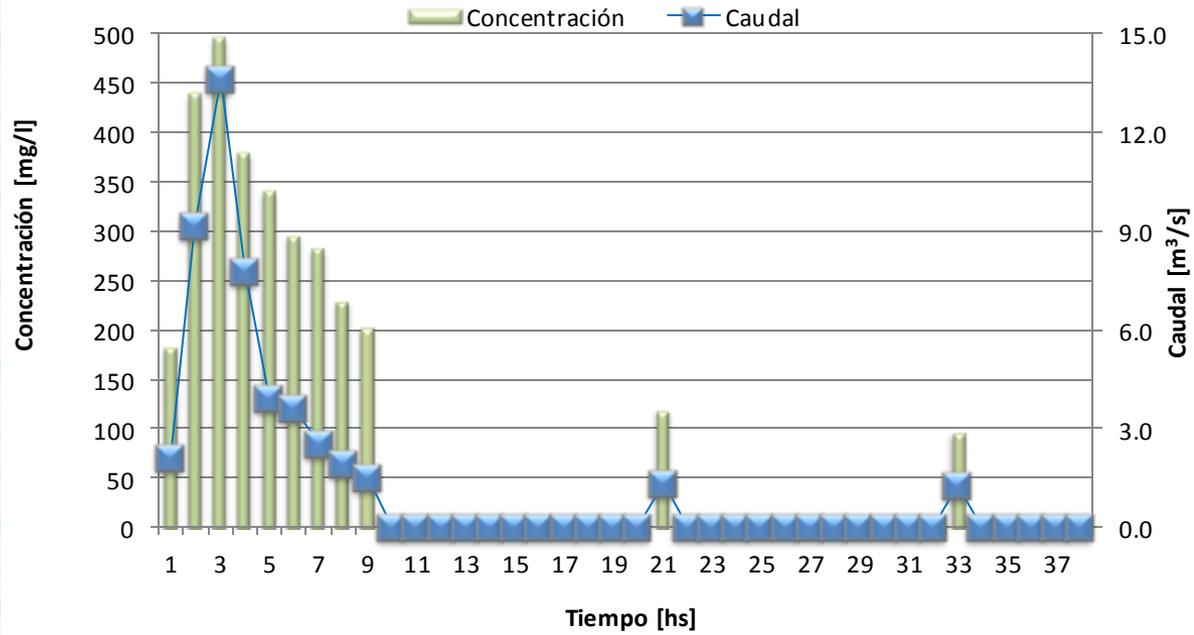
- Parámetros de flujo cada 5min
- Errores de balance hidrológico y continuidad hidráulica menores a 0,5%,
- $R^2$  igual a 0,88,
- Diferencia Vol. Esc. Directo registro y modelo 11%

# Limnigramas modelado y observado



Diferencia producción de sedimentos entre observación y modelo 12,4%.  
 $\alpha$  ajustado de 10,5.

# Hidrograma y sedimentograma observados



# Resumen de los 10 eventos analizados

Evento		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	min	media	max
Precipitación total	[mm]	44,4	31,6	77,4	41,4	38,6	58	53,8	41,8	127	160	31,6	64,1	160
Duración	[hs]	6	7	11	9	10	12	14	11	23	12	6	11	23
Humedad antecedente		II	II	II	I	II	II	II	III	I	III			
Infiltración	[mm]	27,4	21,5	41,9	31,7	25,5	37,4	33,9	22,2	77,9	29,1	21,5	34,3	77,9
Esc. superficial	[mm]	12,4	5,6	30,8	5,7	8,4	15,9	15,3	14,8	44,4	126,5	5,6	25,9	126,5
Alm. superficial	[mm]	4,7	4,6	4,8	4,0	4,8	4,8	4,8	4,8	4,9	4,9	4,0	4,6	4,9
Balance de escorrentía	[%]	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1
Continuidad hidráulica	[%]	0,1	0,0	0,3	0,0	0,0	0,2	0,2	0,1	0,3	0,4	0,0	0,2	0,4
Diferencia Vol. Esc.	[%]	-10,9	-6,4	-16,5	15,6	-11,7	-12,4	-18,8	-10,8	12,9	13,6	-18,8	-5,8	15,6
Diferencia Qmax	[%]	7,3	-11,4	11,0	14,2	3,4	-	-	-8,7	15,6	-6,7	-11,4	1,5	15,6
R <sup>2</sup>	[adm]	0,88	0,87	0,83	0,75	0,70	0,82	0,79	0,86	0,80	0,76	0,70	0,80	0,88
Diferencia Prod Sed.	[%]	12,4	13,4	-39,9	-10,8	9,2	64,9	18,4	32,1	-2,2	3,1	-39,9	5,5	64,9
Alfa ajustado	[adm]	10,5	10,4	19,6	13,2	10,8	7,2	10,0	8,9	12,1	11,4	7,2	11,0	19,6

## CONCLUSIONES

- El modelo utilizado ha demostrado un aceptable desempeño para la estimación de parámetros del flujo necesarios para la evaluación de erosión hídrica en cuencas urbanas.
- Si bien para algunos eventos, la discrepancia entre los volúmenes de erosión obtenidos por la MUSLE y el registrado representa una significativa diferencia, los valores ajustado de coeficiente  $\alpha$  resultan dentro de un rango esperable en relación a bibliografía antecedente.
- Los resultados obtenidos demuestran la necesidad de continuar y ampliar los estudios de los procesos de erosión en cuencas urbanas del centro de la provincia de Misiones.

## 7- ACTIVIDADES PROPUETAS PARA LA CULMINACIÓN DE LA TESIS

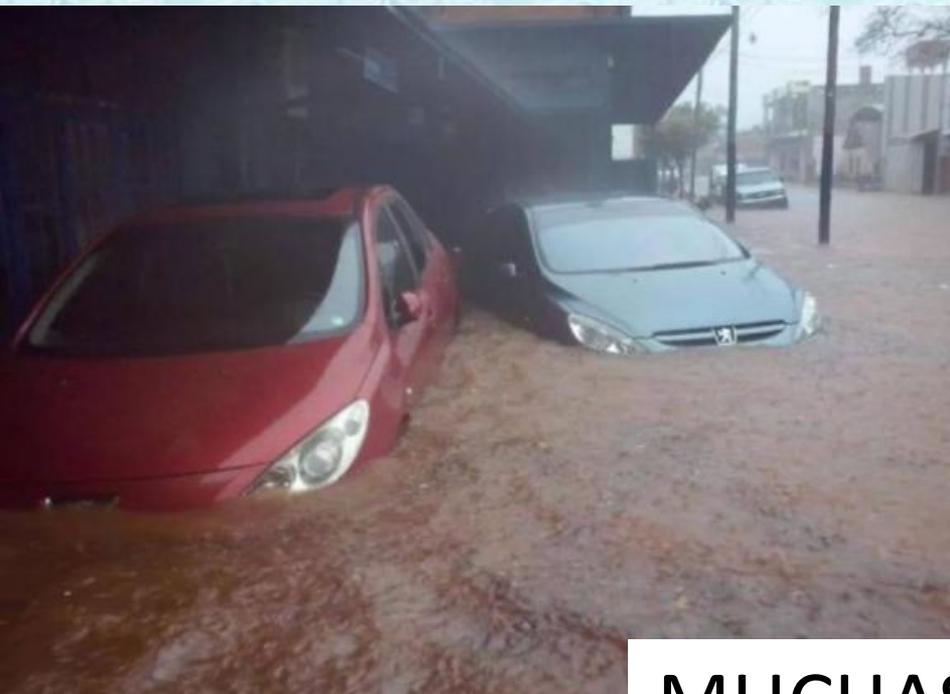
- Calibración del modelo hidrológico-hidráulico: Durante nuevos eventos, se prevé el registro de niveles en puntos internos de la cuenca para mejorar la calibración del modelo. Como así también, el registro de filmaciones, a fin de determinar las velocidades de flujo en los elementos del sistema de desagüe.
- Amenaza de inundación: similar a los mapas confeccionados para las calles, se prevé elaborar mapas de amenazas por inundación en cauces y canales, tanto para el escenario actual como para posibles escenarios futuros.

- MUSLE: se prevé tomar muestras de concentración en puntos internos de la cuenca a fin de mejorar la estimación de producción de sedimentos por zonificación.

También el análisis granulométrico de los suelos recuperados de las muestras de agua analizadas .

- Modelación de TSD: se prevé utilizar el SWMM para modelar la erosión en áreas permeables y el arrastre de contaminantes acumulados en áreas impermeables en cada subcuenca.

**Aportar a la planificación del control de los excedentes hídricos superficiales y los procesos de erosión- sedimentación.**



MUCHAS GRACIAS

