

## **DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD NO EROSIVA EN SUELOS COHESIVOS EN CURSOS DE LLANURA POR INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL**

*Nora E. Pouey*

Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.  
Riobamba 245 bis, (2000) Rosario, Argentina

### **Resumen**

Las investigaciones expuestas en el presente trabajo, han tenido como objeto de estudio la erosión hídrica en cursos de llanura sobre lechos cohesivos, para lo cual se definió un área de experimentación comprendida por tres cuencas de llanura del Sur de la Provincia de Santa Fe (Arroyo Saladillo, Arroyo Pavón y Arroyo Ludueña). Las cuestiones hegemónicas (hipótesis) fueron la determinación de la validez de la modelación experimental como el pronóstico más certero en la valorización de las erosiones y la posibilidad de regionalización de los parámetros involucrados en dicho proceso.

### **Abstract**

This paper deals with the erosion processes in lowland water streams characterized by cohesive riverbeds. The main goal of the study was to analyze the validity of the experimental modelling for assessing the erosion process. In order to achieve three basins located in the southern part of the Santa Fe province (Saladillo, Pavón, and Ludueña) were selected. Moreover, the possibility of parameters regionalization was also analyzed.

### **1. Punto de partida**

El trabajo de investigación emprendido en el CURIHAM (FCEIA-UNR) tiene índole teórica-experimental. El análisis teó-

rico, incidió sobre el dominio metodológico respecto a los procesos de erosión hídrica en cursos de llanura sobre lecho cohesivo: se procuró que el análisis teórico fuese lo más exhaustivo posible a fin de, por una parte, evitar trabajo experimental inútil y por otra, comparar y criticar las variadas hipótesis de base, siempre existentes en cada trabajo realizado.

*Acto realizado con motivo de la entrega del premio "José S. Gandolfo" en Ingeniería Hidráulica, el 21 de noviembre de 1997.*

Dicho estudio teórico permitió sistematizar los conocimientos sobre el fenómeno en estudio con la finalidad de posibilitar la definición de algunas cuestiones sobre la modelación experimental:

\* Es la investigación experimental camino válido para el estudio del fenómeno erosivo en suelos cohesivos ?

\* Cuáles son los ejes metodológicos para el diseño de un modelo experimental que resulte posible y eficiente ?

\* Cuáles son las ecuaciones y/o expresiones que mejor representan el pronóstico de erosión en suelos cohesivos ?

La investigación experimental ha sido realizada en el Laboratorio de Hidráulica «Ing. Jorge Mosconi» de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario.

La primera etapa consistió en una recopilación de datos para la caracterización taxonómica del área en estudio, con el objetivo de investigar la posibilidad de regionalización de los parámetros de erosión. La segunda etapa consistió en el estudio granulométrico del muestreo en dicha región, con el objeto de comprobar si la descomposición del gramo cohesivo tiene incidencia en los parámetros de velocidad no erosiva. La tercera etapa comprendió el estudio de muestras regionales inalteradas en un canal vidriado, con el objeto de desarrollar metodología experimental que pueda tener en cuenta los diferentes factores físicos, químicos, mecánicos y mineralógicos intervinientes en el proceso hídrico erosivo.

A continuación se detallan las conclusiones, que a juicio de la autora, encaminaron el trabajo experimental en sus aspectos metodológicos:

\* La evidencia experimental ha demostrado que tanto la erosión como la deposición de sedimentos cohesivos son controladas por la tensión de corte del suelo o velocidad no erosiva frente a la acción hidrodinámica del flujo. La posibilidad de un pronóstico erosivo basado en la determinación de una tensión de corte para la cual se inicia la erosión, o la tensión que ocasionaría un particular índice de erosión, y la tensión de la cual podría esperarse que cau-

sara un máximo estimado de la profundidad de erosión, presentan una gran disparidad en los resultados obtenidos en las investigaciones en función de los diferentes métodos utilizados para tal fin. Es difícil establecer comparaciones consistentes entre resultados de trabajos de investigación utilizando la resistencia al corte medida con veleta manual y el índice de plasticidad como parámetros para evaluar la erosión.

\* En general, el trabajo en el campo de la erosión se ha concentrado en la correlación de alguna «velocidad crítica» o «tensión de corte crítica» con las propiedades fundamentales de la arcilla. Algunas de estas correlaciones fueron determinadas en base a ensayos de erosión de pequeña escala. Las definiciones de la tensión de corte crítica y del estado de falla del lecho son arbitrarias y se basaron exclusivamente en la observación visual y en el criterio del observador. Es difícil, por lo tanto, utilizar tal información para predecir la estabilidad de canales sujetos a valores altos del caudal durante cortos períodos de tiempo, o para predecir la profundidad de erosión de canales con caudal constante durante su vida útil.

\* De las primeras investigaciones resultó evidente que las propiedades del suelo que controlan la erosión son demasiado complicadas para ser descritas mediante una simple clasificación en tipos o según la densidad en masa.

\* La investigación básica de laboratorio se ha concentrado en dos clases de suelo cohesivo: 1) Arcillas consolidadas de media a alta resistencia; 2) Suelos blandos cohesivos que van desde lodos recién depositados a depósitos más antiguos de poca resistencia. A pesar de que las leyes básicas que gobiernan la erosión debieran ser lógicamente las mismas para ambos tipos de suelo, la filosofía y el tratamiento que tuvieron fueron diversos. Como se ve en las experiencias de Rahman (1967 .ref37), un amplio rango de tensiones de corte pueden provocar distintos grados de erosión.

\* Las fuerzas de atracción interparticular, no son realmente constantes sino que varían dentro de un entorno. Existe

una posibilidad de que, debido a las heterogeneidades en el sistema de esfuerzos internos del suelo, algunas porciones del lecho son más resistentes a la erosión que otras porciones.

\* Se ha ido mostrando en las conceptualizaciones teóricas que la resistencia al corte del suelo no es la única propiedad del suelo determinante en la erosión. Para arcilla de baja resistencia no se ha encontrado una correlación definida entre resistencia y erosión. Para arcillas de mediana a alta resistencia, la resistencia a la erosión parece incrementarse con el aumento de la resistencia, a pesar de que no se ha desarrollado una relación empírica definida.

\* Algunos de los índices de erosión no transmiten con exactitud el estado del suelo en la superficie. El contenido de humedad superficial, la densidad, el hinchamiento potencial y la orientación de las partículas, medida con rayos X o microscopio electrónico, deberían resultar mejores índices.

\* Un ensayo de erosión confiable parece ser un ensayo en un canal abierto en el cual la arcilla no constituye la totalidad del lecho, sino una parte significativa del mismo a través de muestras. Si fuera a canal completo, el lecho del canal debería ser depositado en un estado que representara de la mejor manera posible remodelar una muestra en el canal, pero los efectos del remodelado no se conocen completamente; pero se sabe que los enlaces interparticulares aumentan con el tiempo después del remodelado.

\* La obtención de la velocidad no erosiva para suelos cohesivos deberá realizarse por medio de ensayos experimentales en laboratorio de hidráulica y para cada caso en particular.

\* La obtención de la velocidad no erosiva por medio de alguna ecuación empírica ofrece en mayor o menor medida un grado de incerteza no recomendable para su utilización definitiva en proyectos de ingeniería. Puede ser una herramienta de primera aproximación.

\* El proceso de erosión hídrica es temporal y espacial. El proceso de erosión

no se produce de manera aislada, es parte del conjunto de transformación erosión-sedimentación. Desde el punto de vista temporal es posible valorizar la actividad erosiva en tiempos geológicos, tiempos anuales, tiempos de eventos. Desde el punto de vista espacial, el proceso erosivo puede ser a nivel de región, de cuenca, de cauce o bien seccional.

\* De acuerdo al objetivo del estudio el investigador o proyectista deberá seleccionar o definir el escenario espacio-tiempo y los niveles de escala correspondientes.

\* La descripción completa de la estructura de un suelo cohesivo requiere de un conocimiento de las fuerzas interparticulares y del arreglo geométrico o textura de las partículas. Es casi imposible medir los campos de fuerzas que rodean directamente partículas de arcilla; en consecuencia, la textura es el principal foco en los estudios de suelos cohesivos. De dichos estudios, las fuerzas entre partículas parecen originarse de tres tipos diferentes de cargas eléctricas: enlaces iónicos (debidos a una deficiencia de electrones en las capas exteriores de átomos que componen las unidades básicas del suelo), enlaces de Van der Waals (debidos a alteraciones en el número de electrones en cualquier instante a un lado del núcleo atómico); y otros (incluye enlaces de hidrógeno y la atracción gravitacional entre dos cuerpos).

\* La microestructura es importante desde el punto de vista básico fundamental que desde el punto de vista de la ingeniería, pero es útil como ayuda para comprender el comportamiento del suelo. El abordaje a través de la conceptualización de la microestructura resulta de particular importancia en los estudios de permeabilidad.

\* La macroestructura, incluyendo la estatigrafía, de los depósitos de suelos cohesivos tiene una importante influencia en el comportamiento del suelo en la ingeniería práctica.

\* Si los terrones son quebrados y reducidos a partículas elementales, el material se comporta como un medio particulado sin cohesión. Cuando se vuelve a agre-

gar agua, el material llega a plastificarse y a poseer una resistencia intermedia en relación con la resistencia del terrón seco. Si de nuevo se seca, la arcilla humedecida forma terrones resistentes y duros. El papel del agua en este fenómeno no ha sido completamente comprendido.

\* La disminución de los esfuerzos efectivos, como quiera que se produzca, es el factor que más conlleva a provocar expansión, siempre que exista la posibilidad de que el suelo tome agua y transcurra el tiempo necesario para que el fenómeno se desarrolle; existen, sin embargo otros factores que influyen en la expansividad de las arcillas, aún cuando no varíen las cargas superficiales o aún que aumenten.

\* Las arcillas dispersivas difieren de las arcillas ordinarias por su resistencia a la erosión, dado que contienen un volumen relativo de sodio disuelto en el agua de poro más alto. Las arcillas ordinarias tiene preponderancia de calcio y sodio en el agua de poros.

\* El equilibrio de las fuerzas electroquímicas en arcillas ordinarias explica su conducta no erosiva. Sin embargo, en las arcillas dispersivas predominan los cationes de sodio en el agua de poros. Como el catión de sodio tiene una única carga positiva, si se compara con las cargas por calcio e iones de magnesio, ocurre un desequilibrio en las fuerzas electroquímicas. Dicho desequilibrio causa una repulsión entre partículas. Por consiguiente, las partículas de arcillas dispersivas reaccionan como grano y no como un agregado de masa de partículas. Como las partículas de la arcilla son muy pequeñas y tienen una baja masa, se desagregan fácilmente y son transportadas por el agua. Esto explica la sumamente baja resistencia a la erosión de estas arcillas.

\* Las arcillas dispersivas son más fácilmente erosionadas por agua de baja concentración iónica como el agua de lluvia.

\* Los estudios o pruebas mecánicas, tales como la curva granulométrica o los límites de Atterberg, no distinguen las arcillas ordinarias de las dispersivas. Se necesita la identificación de las arcillas dispersivas a través de pruebas específicas.

\* La ruptura de partículas o pedazos de suelo, acontece bajo la acción de cargas dinámicas, las que provocan la destrucción por fatiga de las adherencias. El límite de resistencia a la fatiga es significativamente menor al límite de resistencia a la carga estática, por lo cual, para las estructuras en grupos, la resistencia a la fatiga es menor que para las unidas o ligadas. El paso de la cohesión normativa  $C$  hacia la fatiga para este tipo de suelos, se puede realizar con el coeficiente  $K_v$ .

\* La heterogeneidad del suelo crea erosiones diferentes en algunos sectores, lo cual crea una no uniformidad complementaria, que incrementa las pulsaciones de velocidad en el fondo. Como consecuencia, la resistencia del suelo a la erosión disminuye.

\* El suelo que permanece permanentemente bajo agua, es más estable a la erosión, que aquel que está sujeto a variaciones de la humedad, en tanto y en cuanto la variación de la saturación conlleva a la alteración de la estructura vincular y disminución de la cohesión. Por esta razón suelos iguales en zonas inundables se erosionan más durante una creciente, que los suelos en el lecho ( para igualdad de profundidades y velocidades).

\* La capacidad de intercambio crece con el grado de acidez de los cristales, es decir es mayor si el pH del suelo es menor; la actividad catiónica se hace notable, en general, para valores del pH menores que 7. La capacidad de intercambio también crece con la velocidad y concentración de la solución que circule por la masa de suelo (Raudkivi,1984,ref.38).

\* La investigación por altas temperaturas (balance térmico) es dudosa, sobre todo en arcillas formadas por mezclas mineralógicas; sus resultados se hacen entonces de muy penosa e insegura interpretación, dado que las propiedades del conjunto difieren grandemente de las partes.

\* Un problema que se presenta, en especial al investigador de campo, es el de encontrar un método para correlacionar los datos de ensayos con muestras de lugares geográficamente restringidos y extender los

resultados a una gran longitud de canal con requerimiento de ser mejorado. Las mediciones de campo de naturaleza cuantitativa, están limitadas en su exactitud por condiciones naturales altamente variables y por el entrenamiento y experiencia del observador. Por lo tanto los cálculos de los esfuerzos a los cuales están sometidos los suelos ensayados son, de ser necesario, hechos más con el propósito de reflejar en términos simbólicos el aumento o la disminución aproximada del esfuerzo de corte, que de intentar calcular, literalmente, los esfuerzos hidráulicos de corte reales. Se cree que de este modo es posible tomar parte en la solución de problemas prácticos de campo hasta que se disponga de métodos más precisos.

\* Las velocidades críticas, tanto para erosión como para deposición, calculadas para una profundidad particular, pueden transformarse para otras profundidades distintas. Además, se sugiere que para pequeñas variaciones de la profundidad, el mismo valor de la velocidad crítica podría ser utilizado con suficiente exactitud.

\* Ha sido demostrado que la resistencia al corte del suelo, determinada por los ensayos convencionales, no puede ser utilizada como parámetro único para definir la resistencia a la erosión. La resistencia a la erosión del suelo debe ser controlada por factores no considerados por las propiedades mecánicas generales.

## 2. Modelación experimental

Los modelos experimentales que se presentan en este trabajo, han sido desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica «Ing. Jorge Mosconi» de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario, Argentina en el año 1992. Dichos modelos fueron aplicados en investigaciones para un área en estudio del Sur de la Provincia de Santa Fe, comprendiendo las cuencas del Arroyo Saladillo, del Arroyo Ludueña y del Arroyo Pavón. Los objetivos principales de dichas investigaciones fueron:

\* Aplicación y adaptación del modelo experimental utilizado en el año 1980 para muestras del Río Paraná, para el pronóstico de erosión en suelos cohesivos en cursos en zona de llanura correspondiente al área en estudio

\* Elaboración de un nuevo modelo experimental

\* Posibilidad de regionalización de la velocidad erosiva

### 2.1. Algunos aspectos sobre la región en estudio

La región en estudio corresponde al área jurisdiccional del Comité de Cuencas Hídricas del Area Gran Rosario. Tiene como límites aproximados norte y sur los paralelos  $32^{\circ} 40'$  y  $33^{\circ} 32'$  de latitud sur respectivamente. Se encuentra enmarcada entre las cuencas interprovinciales, las del río Carcarañá al norte y el Arroyo del Medio, al sur. La Pampa Ondulada corresponde a una franja que se extiende paralela al curso del río Paraná, que ha sufrido un movimiento epirogénico positivo, es decir de levantamiento, posterior al depósito de los sedimentos que componen la formación pampeana, no habiéndose producido el mismo en forma uniforme, sino diferencial o sectorialmente. Está comprendida además entre la falla del río Paraná al este y al oeste de Tostado-Selva-Melincué, con un ancho aproximado en la parte norte de 200 km y 100 km en el sur, y una extensión de unos 700 km, existiendo otras fallas transversales y perpendiculares a aquellas, dos de las cuales son el río Carcarañá y el Riachuelo, los límites norte y sur del sector. Esos movimientos diferenciales, que se asimilaron a un teclado de piano, han influido en el avenamiento general del área, presentando además una serie de colinas de dirección oeste-este, llamadas lomas, y que son consecuencia de la erosión producida por las aguas de los cursos superficiales en los sedimentos pampeanos, originando amplios valles fluviales aterrizados, en los cuales entallaron sus cauces las serie de ríos y arroyos que surcan la subregión de oeste

a este, para desaguar en el río Paraná. Otros rasgos son la marcada horizontalidad (0,06 a 0,07 %), la barranca viva que se desarrolla desde el norte del Puerto San Martín hasta el Riachuelo. Su clima es templado, con temperatura media anual de 16°,5 y amplitud térmica entre promedios anuales de verano e invierno de 13°. Las precipitaciones están comprendidas entre los 800 y 1000 mm, con períodos de mayor concentración entre octubre y abril, y de mínima durante los tres meses invernales, siendo característico el mes de marzo, al registrarse los mayores valores. El balance hídrico no arroja déficit, sino por el contrario en algunos meses exceso, destacándose el mes de marzo en ese sentido.

## 2.2. Caracterización taxonómica, granulométrica y dispersiva de las muestras regionales

De acuerdo a la caracterización taxonómica de la región en estudio y aplicando el Test de Sherard, se presentan los resultados en el cuadro al pie de la página.

El problema fundamental de los métodos de análisis granulométricos basados en la ley de Stokes es lograr una suspensión de suelo en el que las partículas están totalmente dispersas, es decir, separadas unas de otras. Los errores que pueden originar la falta de esta condición superan por mucho a las diferencias que se obtienen entre los resultados de los diversos métodos que se emplean. La dispersión total solamente puede obtenerse por medio de una agitación prolongada de la suspensión de suelo en agua, al cual se añaden determinados productos químicos (por ejemplo: hexametáfosfato sódico, o bien el producto denominado comercialmente Calgon). La falta de una dispersión completa produce errores de consideración, ya que las partículas agrupadas caen a una velocidad que corresponde, no al diámetro propio, sino al del grumo. Parte importante de la arcilla puede quedar así clasificada como limo e

Cuencas del área en estudio

C U E N C A	A R E A (km <sup>2</sup> )
Arroyo San Lorenzo	712
Arroyo Ludueña	700
Arroyo Saladillo	2744
Arroyo Frías	157
Arroyo Seco	180
Arroyo Pavón	3224
Laguna Melincué	983
T O T A L	8700

Curso en Estudio	Unidad Taxonómica Nro.	Caracterización de Sodio (%)	Tipología Dispersiva
Arroyo Pavón	3	47,5	Transición
	4	4,5	No dispersiva
	6	2,6	No dispersiva
	7	30,1	Transición
Arroyo Ludueña	4	4,5	No dispersiva
	5	20	No dispersiva
Arroyo Saladillo	1	2,8	No dispersiva
	2	3,9	No dispersiva
	3	47,5	Transición
	4	4,5	No dispersiva
	5	20	No dispersiva
	6	2,6	No dispersiva
	7	30,1	Transición

incluso como arena. Hoy se considera ya como indispensable la dispersión enérgica que individualice las partículas..

El método del hidrómetro es un método para obtener aproximadamente la distribución granulométrica de suelos en los cuales existe una cantidad apreciable de partículas inferiores al tamiz N° 200. El principal objetivo del análisis de hidrómetro es obtener el porcentaje de arcilla (porcentaje más fino que 0.002 mm) ya que la curva de distribución granulométrica cuando más del 12 % del material pasa a través del tamiz N° 200 no es utilizada como criterio dentro de ningún sistema de clasificación de suelos y no existe ningún tipo de conducta particular del material que dependa intrínsecamente de la forma de dicha curva.

Se realizaron en el Laboratorio de Hidráulica «Ing. Jorge Mosconi» del Departamento de Hidráulica de la F.C.E.I.A., 48 ensayos granulométricos en 12 muestras de diferentes cursos, profundidad y ubicación. Se utilizó el Método A, con concentraciones de dispersante al 4%, 8% y 12 %. Se realizaron pruebas en muestras de los tres cursos en estudio: Saladillo, Pavón y Ludueña. Se presentan los resultados obtenidos en relación a los ensayos anteriores.

Las pruebas de desagregación arrojaron la siguiente tipología:

MUESTRA	TIPOLOGIA s/ensayo
A.Saladillo - Tramo I - Aguas Arriba - Cascada	2
A.Saladillo - Tramo I - Aguas Abajo - Cascada	1
A.Pavón - Subcuenca Baja	2
A. Pavón - Subcuenca Alta	3
A. Ludueña - Emisario	3
A.Ludueña - Ruta. Nac.9	2

Ref: (1)no dispersiva (2)regularmente dispersiva (3)dispersiva

Como conclusiones de estos estudios es posible establecer:

- El análisis granulométrico de desagregación permite determinar un mejor ajuste del diámetro de partícula a incorporar en el cálculo teórico de la dispersión

- La posibilidad de regionalización del parámetro de velocidad erosiva en función de las unidades taxonómicas resulta imposible, lo cual queda comprobado por el comportamiento diferente de suelos correspondientes a la misma unidad taxonómica.

Series de Ensayos Nro.	% de arcilla (0.005 mm) sin dispersante	% de arcilla (0.005 mm) con 12% de dispersante	% dispersión	Tipología
1. AS.POL.L	26.5	32	89	Dispersiva
2. AS.POL.MD	12	34	35	Dispersiva *
3. AS.POL.MI	15	34	44	Dispersiva *
4. AS.C.AA	2	25.5	9	No Dispersiva
5. AS.C.AAr.MI	19	34	56	Dispersiva *
6. AS.C.AAr.MD	16	27.5	47	Dispersiva *
7. AS.C.AAr.MI 50 m	1	32	3	No Dispersiva
8.AS.C.AAr.MI 100m	1	40	2.5	No Dispersiva
9. AP.CB.L	13	25.5	51	Dispersiva *
10. AP.Sub.CAL.L	15	39	38.5	Dispersiva *
11. AL.E.MD	29	40	72.5	Dispersiva
12. AL.Rta. n°9. L	27.5	42	65.5	Dispersiva

### 2.3. Ensayos en canal experimental con estructura monolítica de muestreo

Esta tipología experimental ha sido desarrollada por investigadores rusos, y utilizada por primera vez en nuestro país en los estudios de erosión de arcilla para el Proyecto Paraná Medio - Cierre Sur Chapetón a cargo de la Empresa Agua y Energía Eléctrica (1980).

En esta etapa del plan de investigación experimental se ha aplicado el Modelo Experimental Monolítico a las muestras de los arroyos Pavón, Ludueña y Saladillo de la Pcia. de Santa Fe. Dicho modelo ha sido adaptado a las características del canal vidriado del Laboratorio de Hidráulica «Ing. Jorge Mosconi» de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario, y también en función del tamaño de muestreo con que se cuenta. Metodológicamente se han desarrollado las pautas que a continuación se detallarán y se han introducido algunas modificaciones provenientes de la experiencia adquirida durante el año 1980. Al respecto, en términos generales, se ha logrado transformar una metodología aplicada en ese entonces de forma mecanicista en una metodología experimental capaz de abarcar diferentes características físico-química de los suelos cohesivos. En síntesis es pasar de un estudio de arcillas confinadas (Proyecto Paraná Medio) a suelos cohesivos de cursos naturales (correspondientes a la zona de estudio elegida).

#### 2.3.1. Metodología

La metodología experimental utilizada en el año 1980 ha sido desarrollada en base a la ejecución de las experiencias y siguiendo las recomendaciones de la normativa rusa, presente principalmente en la bibliografía:

1) Manual de Metodología para Ingeniería Geológica en el estudio de rocas. Tomo II. Universidad de Moscú.

2) «Depósitos fluviales». Rossinsky; Dbolsky; Editorial Ciencia; 1980.

Como pautas generales de ensayo, se ha de tener en cuenta:

- Las muestras deben ser inalteradas. Una vez extraídas, se deben cubrir con parafina, envolver en polietileno, transportar al laboratorio sin demora y guardar en condiciones que no admitan vibraciones, sollicitaciones mecánicas así como acciones de temperatura y humedad.

- Antes de iniciar los ensayos se cubren las muestras con parafina excepto en la capa superior de las mismas, dónde se va a experimentar la erosión y se las somete a un período de sumergencia no inferior a 24 horas.

- Las muestras se ensayan en un canal vidriado.

- Las muestras se sujetan al fondo del canal mediante un monolito y sobresalen por encima del mismo en 2 a 4 mm.

- Simultáneamente en el canal deben encontrarse dos o tres muestras iguales para obtener resultados dobles y evitar errores accidentales relacionados con la heterogeneidad de muestras, variaciones en el tratamiento de las mismas, etc.

- El período de ensayo no debe ser inferior a seis horas.

- Las velocidades del flujo deben variar desde el valor para el cual no se produce la deformación de la superficie de las muestras, hasta el valor con el cuál se produce la erosión de la misma.

- Finalizado el ensayo si el valor medio erosionado es menor que 0,2 - 0,5 mm, se considera que no existe erosión y se incrementa la velocidad para volver a ensayar.

- En el intervalo entre ensayos las muestras permanecerán con diagrama uniforme de velocidades por encima de las muestras.

- En canal debe tener un tramo de acceso a las muestras de longitud 1,5 a 2,5 m.

- Para mantener constante el tirante por encima de las muestras se hace variar la velocidad cambiando la pendiente del canal.

- El caudal es aforado mediante un vertedero triangular ubicado en el desagüe del canal.

- Las velocidades se determinan con el aforo de caudales o midiendo con micromolinetes.

- Para la determinación del perfil erosionado se establece un sistema de coordenadas sobre la superficie de la muestra. Se mide en una serie de puntos antes y después del ensayo mediante un asentímetro. Por diferencia se obtiene el valor medio erosionado.

- Para observar las características de la erosión se efectúa un registro fotográfico antes y después de cada ensayo.

- En el canal vidriado se fijará sobre las muestras un tirante de 10-15 cm y se medirá la velocidad promedio del flujo, la cual se considerará válida para la profundidad media. A continuación, utilizando este valor se calculará la velocidad media admisible para el tirante de un metro.

- El cálculo se hará según las fórmulas que aparecen en bibliografía mencionada anteriormente y que están basadas en datos experimentales y naturales para el diagrama normal de distribución de velocidades del flujo en profundidad. Las relaciones a utilizar son las siguientes:

Fórmula de Goncharov

$$\frac{V}{V_m} = \frac{\lg 16,7 \left( \frac{y}{\Delta} + 1 \right)}{\lg 6,15 \frac{H}{\Delta}} \quad (1)$$

donde :

V = velocidad a una distancia (y) desde el fondo

$V_m$  = velocidad para un tirante de agua H

y = distancia desde el fondo

H = tirante de agua

DD = rugosidad de fondo

Fórmula de Numer

$$\frac{V}{V_m} = \left( 1 - m \right) \left( \frac{y + \Delta}{H} \right)^m \quad (2)$$

donde :

$m = DD^{1/2} = 2.8 (g)^{1/2} / c$

g = aceleración de la gravedad

c =  $(R)^{1/6} / n$

n = coeficiente de rugosidad de Manning

#### 2.4. Experiencias y análisis de los resultados en la zona de estudio

En las figuras 1 a 4 se pueden observar los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el Laboratorio de Hidráulica (Pouey, 1992 -1994) para los cursos en estudio: Pavón, Ludueña y Saladillo; y los resultados obtenidos en los ensayos realizados por Agua y Energía eléctrica para el Proyecto Paraná Medio - Cierre Sur Chapetón (Onipchenko, García, 1980). Como puede observarse no se registran prácticamente procesos erosivos en las muestras del área en estudio para el rango de velocidades que son posibles desarrollar en un canal vidriado. Por lo cual resulta necesario recurrir a otra forma de experimentación hidráulica de muestras de material cohesivo en el presente caso. Por comparativa de estudios, es evidente que los suelos cohesivos de la región superan el valor admisible de velocidad erosiva de 1,3 m/s para 1 m de profundidad, obtenido para las arcillas mioceánicas de Paraná Medio. Dicha situación comenzó a ser previsible del inicio de los ensayos sobre muestras en la región de estudio, dado que la situación de confinamiento en un caso (PPM) y las características mineralógicas (entre otras) de las muestras de la región en estudio, resultan totalmente diferentes. La apreciación anterior conlleva a la imposibilidad de regionalizar y normalizar parámetros erosivos para los suelos cohesivos.

Se plotearon los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos para el A. Pavón y el A. Saladillo, calculando la velocidad no erosiva de fondo a través de la expresión de Mirstsjulava, versus valores medidos para la crecida del 86. Se pudo observar que los valores de velocidad ajustan en diámetros pequeños. Para diámetros obtenidos in situ como producto de la erosión en la zona aguas abajo de la cascada en el Arroyo Saladillo, que oscilan entre los 15 a 20 cm; el cálculo teórico se aleja considerablemente de lo que muestra la propia naturaleza. Cabe destacar que el interrogante resulta sobre si dicha deposición de material(  $D_{medio} = 15cm$ ) corresponde o no a

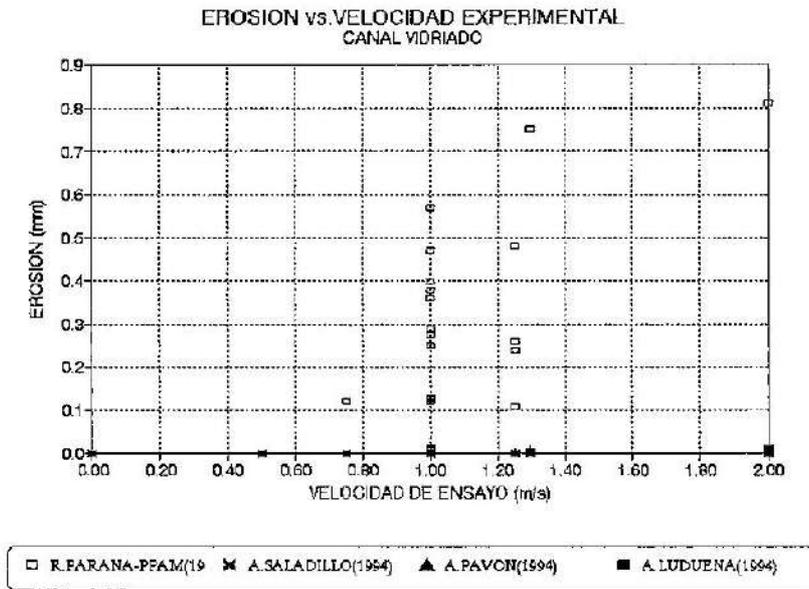


Figura 1. Modelo Experimental Canal Vidriado: Velocidad de ensayo vs. erosión

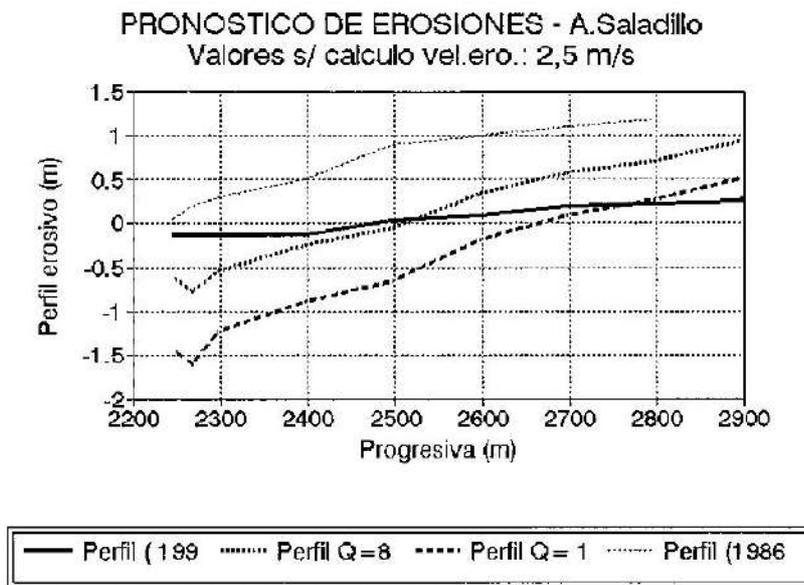


Figura 2. Pronóstico Erosivo utilizando el Modelo Experimental de Alta velocidad

la zona de chorro vertical de la cascada. De corresponder, la fórmula teórica de Mirstjulava, resulta una excelente herramienta de cálculo, dado que allí se desarrollan velocidades del orden de los 8 a 10 m/s.

Como conclusiones de esta parte del estudio experimental en canal vidriado con

estructura monolítica de muestreo, es posible establecer nuevas pautas metodológicas:

- El Modelo Experimental (MECVEM) es válido para suelos cohesivos confinados sometidos a descompactación y preferentemente con características dispersivas, dado que

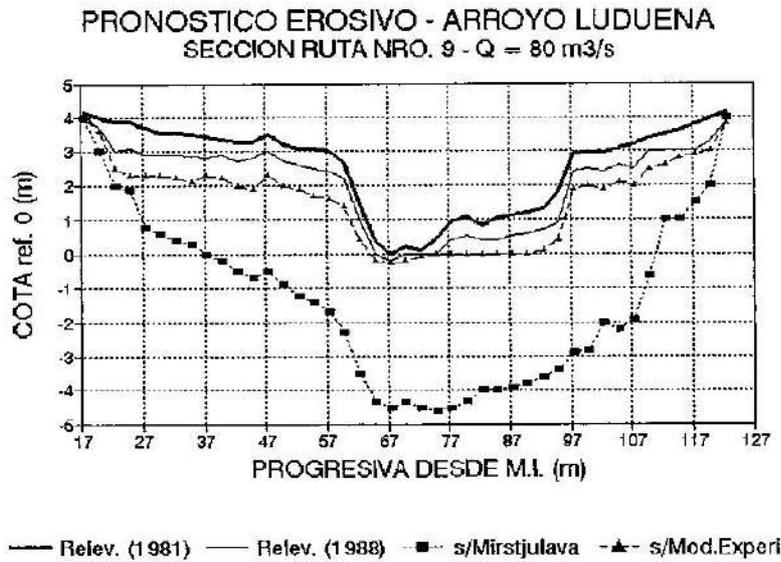


Figura 3. Pronóstico Erosivo utilizando el Modelo Experimental de Alta Velocidad

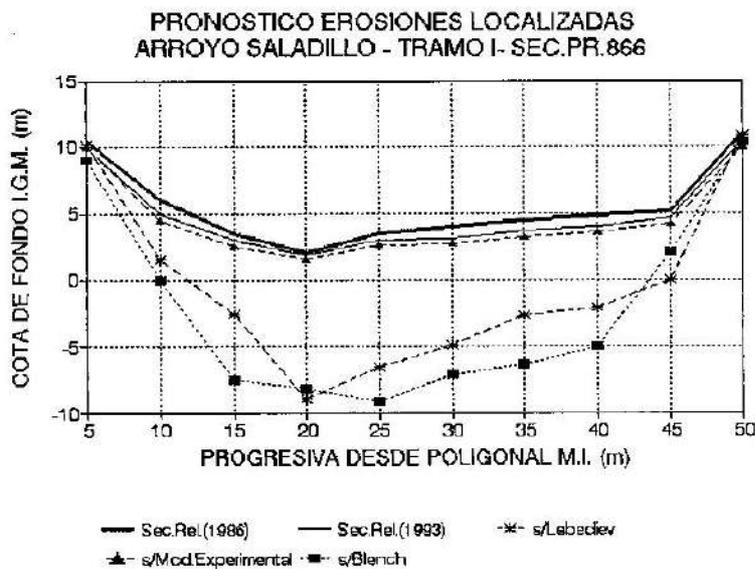


Figura 4. Pronóstico Erosivo utilizando el Modelo Experimental de Alta Velocidad

es posible su erosión a bajas velocidades del flujo en el canal.

- Cuando se aplican fórmulas empíricas de alta complejidad, por ejemplo Mirstsjulava u otra, (es decir que tienen en cuenta factores de ajuste, diámetro de partículas, etc) los resultados obtenidos en la determinación de la velocidad admisible de

erosión se alejan substancialmente de la velocidad erosiva real.

- En cuanto a la relación entre los valores obtenidos de erosión vs. el tiempo de sumergencia, se puede observar la imposibilidad de ajustar una ley funcional

- Resulta necesario el diseño de un nuevo Modelo Experimental para altas ve-

locidades, que permita evaluar la velocidad admisible de erosión para el muestreo de la zona de estudio.

### 2.5. Modelo experimental para altas velocidades

El presente ítem significa un avance en la investigación experimental en suelos cohesivos dado que permite realizar ensayos en muestras que por sus características físico-químicas, entre otras, no pueden ser erosionadas en un canal convencional de ensayo con estructura monolítica de muestras. Agradezco el trabajo conjunto con el Dr. G. Onipchenko durante el mes de mayo del año 1994, en el Laboratorio de Hidráulica «Ing. Jorge Mosconi» de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario, que permitió lograr el diseño y las pautas de operación del nuevo dispositivo de ensayos para suelos característicos de nuestra región.

#### 2.5.1. Diseño

Para el diseño fue necesario recopilar y estudiar las características mecánicas de los suelos cohesivos de la zona en estudio, como así también los datos disponibles de aforos y relevamientos topográficos.

Estos aspectos permitieron acotar rango de velocidades de ensayo, tipo de registro experimental a utilizar, factibilidad de realización en un laboratorio de hidráulica manteniendo algunas pautas metodológicas anteriormente descriptas, válidas para todo estudio experimental sobre suelo cohesivo. A modo de ejemplificar la no alteración del suelo a ensayar. Por otra parte se realizaron numerosos cálculos hidráulicos correspondientes a fin de ajustar las dimensiones definitivas del modelo, de tal manera que no se produzcan alteraciones en la configuración hidráulica (remolinos) que distorsionen la distribución del flujo.

El MEAV (Modelo Experimental de Alta Velocidad) consiste en:

- Un dispositivo experimental se compone de una cañería que permite lograr

altas velocidades por medio de una alimentación que asegura una carga de presión hidrostática de 10 a 20 m.

- Dicha cañería de sección circular se transforma en rectangular en la zona de experimentación (donde se coloca la muestra de suelo cohesivo), terminando en un dispositivo aforador de caudales.

- Desde el punto de vista hidráulico, se tiene en cuenta la fórmula de Schlijting:

$$\frac{V}{V_m} = \left( 1 - \left( \frac{y}{h/2} \right)^{3/2} \right)^2 \quad (3)$$

donde:

$V_m$  : velocidad media (m/s)

$y$  : altura descontando la rugosidad (m)

$h$  : altura total (m)

- Aplicando dicha formulación en las condiciones del modelo experimental:

$V_m$  : 5 m/s                       $h$  : 5 cm

altura de rugosidad: 4 mm

$y$  : 2,1 cm

reemplazando en 3, resulta por ejemplo para  $V_m = 5$  m/s una  $V = 0,26$  m/s (a nivel de la rugosidad)

- Estudiados los efectos hidráulicos en el modelo experimental se recomiendan las siguientes relaciones (ver Fig.5):

$l_1 = (D - h) \cdot 5$

$l_2 = 5 \cdot d$

$l_3 = (2 \text{ a } 3) \cdot d$

$h = 4 \text{ a } 5 \text{ cm}$

$c = 1,5 \cdot d$

$l = (1,5 \text{ a } 2) \cdot d$

$a = (0,6 \text{ a } 1) \cdot d$

donde:

$d$ : diámetro de la muestra

#### 2.5.2. Metodología

\* Las pautas metodológicas para las muestras a ensayar son las mismas que las consideradas en el ítem anterior, cuando se trabaja en canal vidriado con monolito de muestreo.

\* Cabe agregar, en el aspecto de medición, que en esta estructura se visualiza el arrastre de material cohesivo, con lo cual se da a ese valor de velocidad como la admisible erosiva.

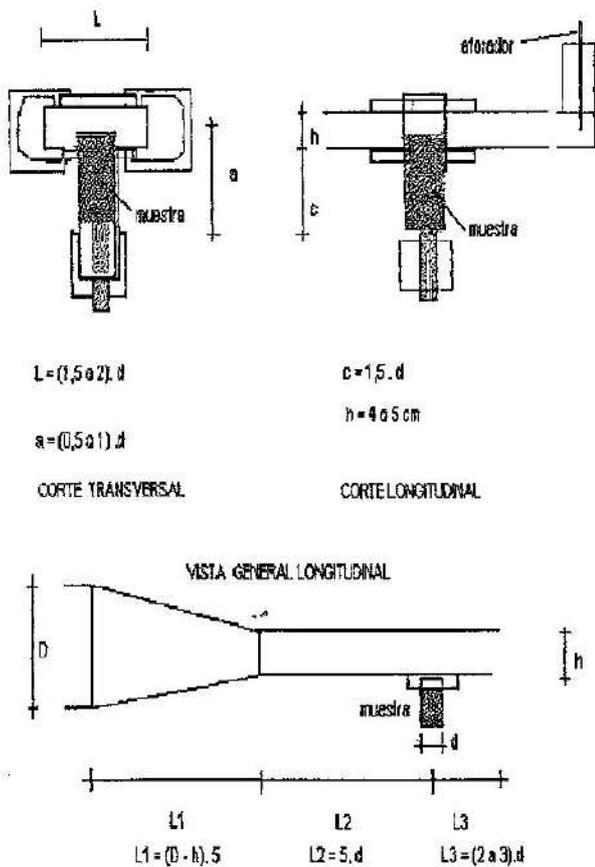


Figura 5. Esquema del Modelo Experimental de Alta velocidad ( Pouey, Onipchenko,1994)

\* De los datos disponibles correspondientes a los cursos de la zona de estudio, se seleccionaron perfiles transversales y de fondo en los cuales se contaba con mediciones realizadas antes y después de una crecida, y además en relación al muestreo de suelos.

\* Esto permite una vinculación entre tipos de lecho - caudales - erosiones. La misma es sencillamente lo que permite el pronóstico erosivo, objeto de la presente tesis.

\* Para el Arroyo Saladillo se analizaron los perfiles del Tramo I (Puente Molino Blanco - Cascada) y las secciones transversales a progresivas 889 y 1989. En el arroyo Pavón el perfil de autopista P08 y para el Arroyo Ludueña el perfil puente de la Ruta Nac. nro 9 L12.

\* Para contrastar resultados se utilizaron las fórmulas empíricas de Mirstsju-

lava, Lebediev, Blench y Rosinsky (ver capítulo anteriores).

\* La primera de alta complejidad como se ha demostrado anteriormente, y la segunda, dado que fue el punto de partida metodológico.

\* En los gráficos siguientes es posible observar los resultados de los pronósticos erosivos utilizando diferentes metodologías.

\* Evidentemente se desprende la confirmación de la hipótesis establecida que: la determinación de la velocidad no erosiva en suelos cohesivos a través de la modelación experimental produce el pronóstico más certero.

## 2.6. Conclusiones y recomendaciones

\* Para el estudio de erosiones en cursos de llanura sobre lechos cohesivos, el modo principal de abordar el problema, es similar al correspondiente a los suelos rocosos, es decir, determinación de las velocidades no erosivas, y con su ayuda, determinar la profundidad límite de erosión.

\* La obtención de la velocidad no erosiva para suelos cohesivos deberá realizarse por medio de ensayos experimentales en laboratorio de hidráulica y para cada caso en particular.

\* Dentro de un contexto de complejidad, ya sea por los aspectos fisiográficos, geológicos y geomorfológicos que presentan los cursos de llanura sobre lecho cohesivo, el pronóstico erosivo constituye un desafío para los proyectistas e investigadores. Existen numerosas formulaciones empíricas para la cuantificación de dicho proceso, pero que difieren en sus resultados, dado que han sido producto de análisis en zonas específicas que a veces no corresponden a las características en las cuales son aplicadas.

\* Teniendo en cuenta, lo antecedente, el estudio de investigaciones teóricas y experimentales más recientes, analizando su carácter determinístico o esatocástico, las metodologías empleadas, las expresiones propuestas para la evaluación de la erosión, permitió seleccionar especialmente, entre otros aspectos, el camino experimental y a

su vez determinar qué parámetros se evaluarían. Se seleccionó la formulación de Rosinsky, donde la erosión es función de la velocidad admisible correspondiente a un tirante de un metro, en contraposición de las formulaciones de Lebediev, Mirstsjulava, Blench, etc. , donde la erosión es función del diámetro de la partícula del suelo cohesivo. Esto contribuyó al cumplimiento de uno de los objetivos establecidos que es la justificación para la selección metodológica.

\* La obtención de la velocidad no erosiva por medio de alguna ecuación empírica ofrece en mayor o menor medida un grado de incerteza no recomendable para su utilización definitiva en proyectos de ingeniería. Puede ser una herramienta de primera aproximación. Sin embargo, para los cursos de la zona en estudio se ha verificado que la sustitución del diámetro de partícula por el diámetro medio correspondiente a los trozos de suelo cohesivo de los depósitos de erosión observados in situ, ofrecen un excelente pronóstico erosivo.

\* Se realizaron ensayos ( en 48 muestras) granulométricos de desagregación y de dispersión de las muestras correspondientes a los cursos en estudio, lo que permitió determinar el diámetro de partícula a incorporar en las fórmulas. La contrastación de los resultados con valores medidos de erosión presentó una disparidad excepcional. Se comprobó que incorporando a dichas fórmulas el diámetro de las partículas observado en los depósitos del material erosionado insitu ( aproximadamente  $d = 20$  cm), los resultados prácticamente coinciden con los valores de velocidad aforados . Por lo cual los ensayos granulométricos de desagregación contribuyeron a reafirmar la premisa del rol en la caracterización del tamaño del suelo en la determinación de la velocidad vs. diámetro.

\* Las unidades taxonómicas no brindan una buena base para los estudios químicos, de desagregación y de dispersión; obteniéndose una clasificación no correcta de arcillas dispersivas. Esto ha quedado demostrado por las investigaciones experi-

mentales realizadas en nuestro Laboratorio. Se realizaron ensayos de dispersión a través del Test de Sherad, como así también Test de desagregación, en las muestras en estudio. Los resultados obtenidos mostraron que no respondían a las características establecidas por las unidades taxonómicas, lo cual contribuyó a la imposibilidad de regionalización de los parámetros erosivos, segunda hipótesis establecida en las investigaciones expuestas en el presente trabajo de investigación. Por lo cual se recomienda realizar estudios específicos para cada situación en concreto e incorporar este aspecto como pauta metodológica en la modelación experimental.

\* El empleo del Modelo Experimental utilizado en el año 1980 en el Proyecto Paraná Medio, fue adaptado a las condiciones del canal vidriado del Laboratorio de Hidráulica «Ing. Jorge Mosconi» de la FCEIA de la UNR y al tamaño de las muestras disponibles del área en estudio. De los estudios realizados se establecen las siguientes conclusiones:

- la resistencia a la acción del flujo de las muestras disminuye cuando aumenta la profundidad de dónde han sido extraídas las mismas. Las muestras más profundas se han desintegrado durante el período de sumergencia.

- se puede pensar que la descompactación que sufren las muestras al ser extraídas produce una alteración estructural que trae como consecuencia la disminución de la resistencia al flujo con el aumento de la profundidad de las muestras y la disgregación de las mismas durante el período de sumergencia. Cabe recordar, que para la comprobación de este supuesto, las muestras (PPM) fueron consolidadas bajo una carga de  $4,5 \text{ kg/cm}^2$  equivalente al que soportaban en la realidad, obteniéndose en los ensayos iguales resultados que para las muestras no consolidadas. Por otra parte, las muestras de la zona de estudio, que se caracterizan por ser no confinadas, disminuyen su resistencia a la erosión en función del tiempo de sumergencia . Por lo tanto se deduce que la tendencia que se registra con

el aumento de la profundidad obedece a características estructurales y mineralógicas de las propias arcillas.

- se plotearon los valores de erosión vs. tiempo de sumergencia, correspondientes a muestras PPM (PC-25 y PC-24) y muestras regionales (L02 -P08 - SP869). No se puede establecer una ley funcional entre los valores obtenidos.

- para velocidad límites de ensayo en canal vidriado con estructura monolítica de muestreo de hasta 2 m/s, los valores de erosión registrados se pueden considerar despreciables en el caso de las muestras regionales.

\* Dado que un gran número de factores físico-químicos controlan la erosión, debiera prestarse atención en duplicar de la mejor manera posible en el modelo las condiciones naturales. Para los cursos en estudio los valores de pH oscilan entre 7 y 7,5, por lo cual no resulta necesario modificar la calidad del agua de ensayo.

\* Un ítem, respecto del cual se dispone de pocos datos, es el referente al efecto de la duración del flujo ( características del hidrograma) sobre la estabilidad de los suelos cohesivos. Este punto ha sido analizado específicamente, constituyendo un soporte para la justificación teórica en relación a la pauta metodológica de la duración o tiempo de ensayo. Para los cursos de llanura estudiados, resulta válido un tiempo de duración de ensayo de seis horas, si se analiza en función de sus hidrogramas.

\* Las conclusiones anteriores, llevaron a la necesidad de diseñar un Modelo Experimental de Altas Velocidades (MEAV), dado que las arcillas confinadas mioceánicas del Río Paraná presentan características diferentes a las de los cursos en estudio, hecho que permitió ir mejorando la visión mecanicista con la cual se había empleado el Modelo Experimental en Canal Vidriado con estructura monolítica de muestreo (MECAVEM) convirtiendo las pautas normativas en pautas metodológicas con justificación teórica.

\* La aplicación del MECAVEM para los cursos del área en estudio fueron contrastados con valores observados y formu-

laciones empíricas, arrojando resultados preliminares satisfactorio.

\* Los suelos que permanecen permanentemente bajo agua ( muestras regionales en lecho), resultan más estable a la erosión, que aquellos que están sujetos a variaciones de la humedad (muestras regionales de márgenes), en tanto y en cuanto la variación de la saturación conlleva a la alteración de la estructura vincular y disminución de la cohesión. Por esta razón suelos iguales en zonas inundables se erosionan más durante una creciente, que los suelos en el lecho ( para igualdad de profundidades y velocidades). Esto fue comprobado al analizar los resultados de erosión en las muestras regionales. Específicamente en el A.Saladillo, cabe destacar que los resultados obtenidos experimentalmente fueron contrastados con el pronóstico realizado por el estudio geológico y geotécnico, realizado por el Dr.M.Iriondo y Ing. M. Ramonell, para el Estudio del Tramo I, en el cual me desempeñé como Directora de Proyecto (CFIPT1AS, Volumen 2, 1993).

\* Dicho modelo podrá ser mejorado con investigaciones futuras, en sus pautas metodológicas, como así también con la incorporación de alta tecnología de medición en laboratorio.

## **Bibliografía**

1. ACKERS, P. and WHITE, W., «Sediment transport: New approach and Analysis», Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 99 N° HY11, Proc. Paper 10167, November 1973, pp 2041-1060
2. ACKERS, P. and WHITE, W., Closure: «Sediment transport: New Approach and Analysis» by Ackers, P., and White, W.,(Proc. Paper 10167), Journal of the Hydraulics Division,ASCE, N° HY5,May 1975, pp 621-625
3. ALTOCHAEFFL A.G.: Discusión sobre «Erosión of Cohesive Soil», (Erosión de Suelos Cohesivos por Emmanuel Parthenaides, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 81, Nro. HY5, Proc. Paper 4454, Setiembre, 1965, p. 201
4. AMIN, M.I. and MURPHY, P.J., «Two Bed-Load Formulas: An Evaluation», Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol

- 107, N° HY8, Proc. Paper 16448, August 1981, pp 961-972.
5. ANDERSON, A.G., «Distribution of suspended sediment in a natural stream», Transactions of American Geophysical Union, Vol 33, Pte. 2m 1942, 678-683
  6. ANDREW, E.D., «Measurement and Computation of Bed Material Discharge in a Shallow Sand-Bed Stream, Muddy Creek, Wyoming», Water Resources Research, Vol 17, N° 1, February 1981, pp 131-141
  7. ANTSYFEROV, S.M. y KOSYAN, R.D., «Sediments suspended in stream flow», Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol 106, N° HY2, EUA, February 1980, 313-331
  8. ARIATHUARAI R. y ARULANANFAM K.: «Erosion Rates of cohesive Soils»; Technical Notes; ASCE; Nro. HY2; February 1978
  9. ASERSOSN A.C.: «Sediment Transportation Mechanics: Erosion of Sediment», (Mecánica del Transporte de Sedimentos), Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 88, Nro. HY4, Proc. Paper 3195, pp. 109-127
  10. BEASLEY R. y SMERDON T.: «Critical Tractive Forces in Cohesive Soils» (Fuerza de tracción en suelos cohesivos). Agricultural Engineering, St. Joseph, Mich., pp. 26-29, 1961
  11. BAGNOLD, R.A., «An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics», U.S. Geol. Survey, Proc. Paper 422-I, USA, 1966
  12. BARFIELD, B.J., «Prediction of sediment profiles in open channel flow by turbulent diffusion theory», Water Resources Research, Vol 5, N° 1, 1969, 291-299
  13. BISHOP, A.A., Simons, D.B. and RICHARDSON, E.V., «Total Bed-Material Transport», Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol 91, N° HY2, May 1965, pp 175-191
  14. BOGARDI, J.L., «European Concepts of Sediment Transportation», Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol 91, N° HY1, Proc. Paper 4195, January 1965, pp 29-54
  15. BOGARDI J.L., «Sediment Transport in Alluvial Streams», Akadémiai, Kiadó, Budapest, 1978
  16. BOWLES E.: «Propiedades geofísicas de los suelos». Ed. Mc. Graw Hill, 1979.
  17. DUNN, I.S.: «Tractive Resistance of Cohesive Channels» Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE Nro. SM3, pp. 1-24, 1959
  18. FLAXMAN E.M.: «Channel Stability in Undisturbed Cohesive Soils». Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 89, Nro. HY2, 1963
  19. FUENTES R, AGUIRRE PE J. y MONCADÁ A.: «Distribuciones de velocidad en flujo cargado de sedimentos». XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Chile. 1994
  20. GARCÍA M., ONIPCHENKO G., «Erosión en arcillas Proyecto Paraná Medio Cierre Sur Chapetón», Informe AyEE. 1981
  21. GONCHAROV V.: «Dynamics of channel flow»; Leningrad 19 2; Israel Program for Scientific translations, Jerusalem 1964
  22. GRISSINGER E. y ASMUSSEN L.: «Channel Stability in Undisturbed Cohesive Soil» (Estabilidad de canales de suelos cohesivos no perturbados); Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 89, Nro. HY5, Paper 3708, Noviembre, 1953, pp. 259-254
  23. GRISSINGER E.H.: «Resistance of Selected Clay System to Erosions by Water». Water Resources Research, Vol. 2; Nro. 1, pp. 131-138, 1966
  24. HENESAL P.: «Le risque d'érosion hydrique des sols». Rapp. rech LPC, Ref. 3175. Spt-oct. France, 1987
  25. KAMPIUS J.W. y HALL K.R.: «Cohesive material Erosion by Unidirectional Current»; Journal of Hydraulics Division; Vol. 109; Nro. 1, January 1983.
  26. KUTI E. Y YEN C.L.: «L'affouillement des sols cohésifs»; Journal de Recherches Hydrauliques 14 (1976) Nro. 3
  27. KISELIEV A.: «Manual de Hidráulica», 1976
  28. METHA A.J. y PARCHURE T.: «Erosion of soft Cohesive Sediment Deposits»; Journal of Hydraulics Division; ASCE; Vol. III; Nro. 10; October 1985
  29. METHA A.J. y PARTHENAIDES E.: «Kaolinite Resuspension Properties»; Technical Notes; ASCE; HY4; April 1979
  30. MORRE W. y MASCH F.: «Experiments on the Scour Resistance of Cohesive Sediments», (Experimentos sobre la Resistencia a la erosión de Sedimentos Cohesivos), Jr., Journal of Geophysical Research, Vol. 57, Nro. 4, Washington D.C., Abril 1962, pp. 1437, 1949
  31. NIKURADSE J.: «Strommgsgesetze in Rauhem Rohrem. Forschg. Geb. d. Ing. Weswns»; Heft 361. 1933

32. PARTHENAIDES E.: «Erosion of cohesive soils» (Erosión de Suelos Cohesivos), Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 91, Nro. HY1, Proc. Paper 4204, Enero, 1965, pp. 105-139
33. PARTHENAIDES E.: «The Present State of Knowledge and needs for future research on cohesive sediment dynamics»; Third International Symposium on River Sedimentation; The University of Mississippi; March, 1986
34. PARTHENAIDES E. y PAASWELL R.: «Erodibility of channels with cohesive Boundary»; Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Nro. HY3, March, 1970
35. POUHEY N.E.: «Algunos aspectos sobre la erosión hídrica. Estudio del caso para escurrimientos difusos en suelos cohesivos»; Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, UNR, Rep. Nro. 1, Argentina, 1992.
36. POUHEY N. y PORTAPILA M.: «Methodological Aspects for an Environment Impact Evaluation of the Hidric Resources in Plain Zones. The Ludueña Stream Basin. Santa Fe. Argentina». International Conference on Integrated River Basin Development. Wallingford. Enland. Ed. Willey. Pag.229.,1994.
37. RAHMANN N.M.: « The Effect of Flowing Water on Cohesive Beds» , Contribution Nro. 55, , Zurich, Suiza, 1964, pp. 1-114
38. RAUDKIVI A.J.: «Erosion of cohesive soils»; University of Auckland, N.Z.; Hydraulic Research; Vol. 22; 1984; Nro. 4
39. ROSSINSKY K.I.: «Internal Currents in Rivers», Gidrologicheskie osnovy renoi gidrotekhniki, Moskua. Academii Nauk SSSR. 1950.
40. TEREENTIEV, L.I.: «Cálculo de las deformaciones del lecho por la constricción del mismo por ataguías», Trabajos de Hydroproyectos, Moscú, 1967
41. TORRENCE R.M.: Discusión sobre «Experiments on the Scour Resistance of Cohesive Sediment» (Experimentos sobre la Resistencia a la Erosión de Sedimentos Cohesivos) por Walter L. Moore y Frank D. Masch, Jr., Journal Geophysical Research, Vol. 57, Nro. 4, Waschington, D.C., Abril, 1962, pp. 1447-1449

*Manuscrito recibido en febrero de 1999.*