

MOVIMIENTO DE LOS SEDIMENTOS EN LAS SUBCUENCAS: CASO DEL ARROYO HORÁCIO, BRASIL

Geraldo Wilson Júnior

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Programas de Engenharias Oceânica e Civil
E-mails: gwj@peno.coppe.ufrj.br e gwj@predialnet.com.br

RESUMEN

En este trabajo son presentados los estudios hidráulicos y sedimentológicos realizados en un tramo representativo del Arroyo Horácio, afluente por la margen derecha del Río Ivai, localizado al Noroeste del Estado del Paraná, Brasil, a través de la utilización simultánea de los métodos clásicos y del uso de trazadores radioactivos. El arroyo tiene 8,5 km de extensión y una cuenca hidrográfica de 42 km² de área, y que debido a la ocupación desordenada, asociadas a sus características topográficas y geológicas, provocó un intenso proceso de erosión en el suelo. La formación geológica predominante es de arenito, con un predominio de la agricultura en su cuenca hidrográfica. El objetivo de estos estudios fue medir la descarga sólida anual a través de una sección transversal del escurrimiento. Durante los trabajos con los trazadores se realizaron, continuamente, registros longitudinales de las formas del fondo, Lagrangeanos, y registros temporales en secciones transversales fijadas, Eulerianos. Cuatro métodos fueron utilizados para el cálculo de la descarga sólida por arrastre: (i) Método del Balance de las Tasas de Contage, (ii) La Equación de las Dunas, (iii) Generalización del método de Vukmirovic' y Vukotic', y (iv) La teoría de los Procesos Aleatórios. Los resultados fueron convergentes.

ABSTRACT

This paper presents the hydraulic and sedimentological studies with the simultaneous use of classical methods and radioactive tracer technique performed in a representative stretch of the Horácio creek, a right margin affluent of the Ivai River, in the Northeast region of Paraná State, Brazil. The Horácio creek is 8.5 km long; its watershed area is of 42 km² and its disordered occupation, associated with its topographic and geographic characteristics, created an intensive erosive process of the soil. The predominant geological formation is arenite and the main occupation in the watershed is agriculture. The goal of this research is to measure the annual solid discharge through a transversal section of the flow. During the tracer measurements, longitudinal bed configurations, Lagrangean, were recorded, and temporal records of the fixed transversal sections, Eulerians, were made. Four methods were used for the calculation of the bedload transport: (i) The Total Count-Rate Balance Method, (ii) The Dunes Equation, (iii) The generalization of the Vukmirovic' and Vukotic' Method, and (iv) The use of the Stochastic Processes Theory. The results obtained were convergent.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo del Estado del Paraná, con una superficie de 199.000 km² (**Figura 1**) fue considerable, sobretudo en la segunda mitad del siglo pasado, debido a su desarrollo agrícola

y pecuario (Wilson-Jr, Rodrigues y Santos, 1980). En la década de los setentas, se concentraba el 92% de las industrias brasileñas así como el 89% de los establecimientos comerciales.



Figura 1.- Localización del Estado del Paraná y de la Cuenca del Río Ivai

Desde 1950 hasta el 1975, las grandes extensiones de florestas que cubrían el Noroeste del Paraná fueron desbastadas. En su lugar se establecieron la ganadería y la agricultura. En un inicio, el cultivo del café, fue el factor fundamental para la ocupación del suelo. En este período la población aumento dos veces más que la media del país.

La devastación de la vegetación responsable por la fijación del suelo, así como la rápida concentración demográfica, y debido a que estos estaban localizados sobre una base geológica formada de basalto e arenito Caiuá, produjeron un desequilibrio ecológico caracterizado por un violento proceso de erosión, en las regiones urbanas y rurales.

La Cuenca Hidrográfica del Río Ivai y la Subcuenca del Arroyo Horácio

El área de drenaje de la cuenca hidrográfica del Río Ivai (**Figura 2**) es de 36.673 km², perteneciendo el 70% al Noroeste del Estado del Paraná. Por otro lado, 40% del área del Noroeste son drenadas por el Río Ivai, principal fuente de agua de la región. De esta forma, era lógico esperar que las cantidades y los tipos de materiales sólidos a ser transportados por el Río Paraná tuviesen relación con los procesos erosivos presentes en la región.

Objetivos de los Estudios

Con base en esta idea, se desarrolló en la región una serie de estudios hidráulicos y sedimentológicos, cuyos objetivos fueron:

- Estimar la cantidad total de sedimentos transportados por el Río Ivai hasta el Paraná, durante un ciclo hidrológico, y,
- Estimar, anualmente, las cantidades totales de los sedimentos transportados en cuatro de sus subcuencas, que caracterizarían los diferentes tipos y condiciones de explotación del suelo.

Entre las cuatro subcuencas seleccionadas, la del Arroyo Horácio es la que caracteriza un suelo del tipo arenito Caiuá, con textura gruesa, baja cimentación y poca compacidad, que es la utilizada básicamente en la agricultura.

El Arroyo Horácio es un afluente que entra por la margen derecha del Río Ivai, con un flujo en la dirección Norte-Sul, como aparece indicado en la **Figura 3**. Su extensión es de 8,5 km y la área de drenaje es de 42 km². El encuentro del Arroyo Horácio con el Río Ivai está localizado cerca el punto de coordenadas: 23°12' de Latitud Sur y 53°12' de Longitud Oeste.



Figura 2.- Cuenca del Río Ivai



Figura 3.- Subcuenca del Arroyo Horácio

METODOLOGÍA

Para la descripción del movimiento de los sedimentos en cursos de agua son necesarias tres etapas básicas (Wilson-Jr, 1999) conforme está presentado en la **Figura 4**:

- Conocimiento de su cuenca hidrográfica,
- Mediciones del movimiento sólido en un tramo que represente el flujo, y,
- Determinación de las características hidrometeorológicas, hidráulicas y sedimentológicas en que estas mediciones fueron realizadas.

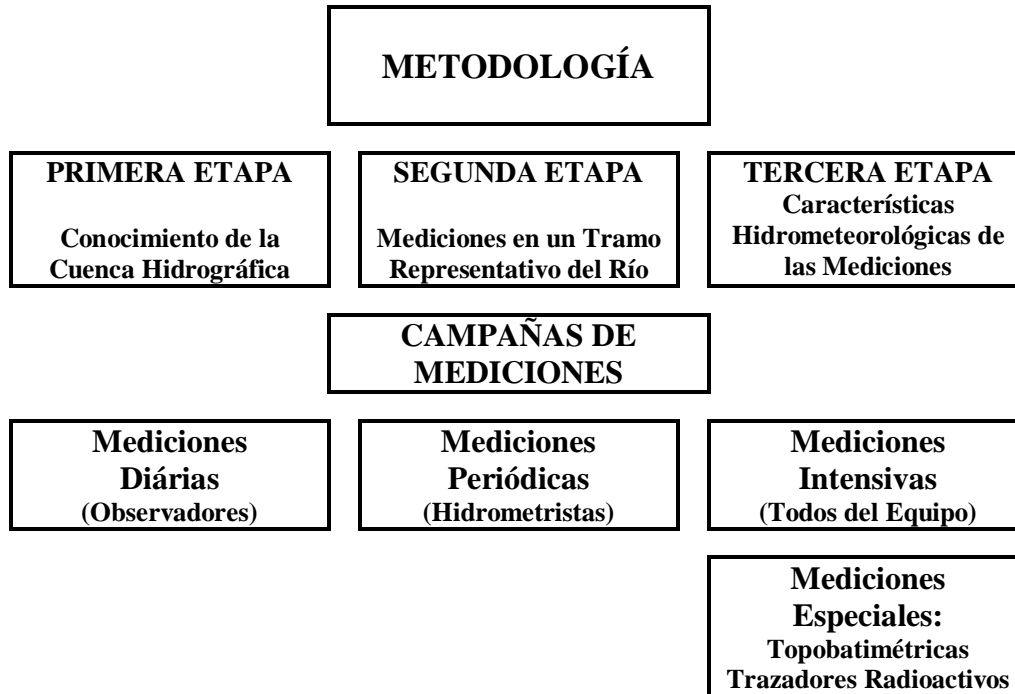


Figura 4.- Estudios del Movimiento de los Sedimentos en Cursos de Agua

De esta forma, los resultados obtenidos de las mediciones podrán ser integrados a través del tiempo para el cálculo del movimiento sólido anual o estacional. Eventualmente, estos podrán ser extrapolados para otras partes de la cuenca, o para otras cuencas con características semejantes.

Para el conocimiento de una cuenca hidrográfica son necesarios estudios que envuelvan las características hidrometeorológicas, geográficas, geológicas, sedimentológicas, socioeconómicas y históricas, entre otras, que abarquen trabajos de gabinete, de campo, así como la interacción con especialistas de temas específicos.

Sería recomendable que las mediciones hidráulicas y sedimentológicas de un curso de agua sean realizadas en un tramo donde el flujo sea prácticamente uniforme y que sus características hidrodinámicas y morfológicas sean las más representativas dentro de una gran extensión del flujo.

El tramo representativo seleccionado para los estudios en el Arroyo Horacio está localizado en su parte central, a 5 km de distancia del Río Ivai, denominado Barraco de Zinco. La longitud total del tramo fue de 143 m, siendo su parte recta igual a 37 m.

Los tres tipos de campañas de mediciones presentados en la **Figura 4** fueron realizados en este tramo, durante un ciclo hidrológico completo (Nery, 2002): Mediciones Diarias, Periódicas y Intensivas.

Los resultados de las campañas de mediciones periódicas, realizadas por los hidrómetros, permiten que sean deducidas las relaciones analíticas entre los parámetros hidráulicos y sedimentológicos. Los resultados de las campañas diarias permiten que estas relaciones sean aplicadas para los ciclos hidrológicos estudiados, mientras que las mediciones intensivas,

realizadas durante el período de lluvia, permiten verificar y calibrar las expresiones y los modelos obtenidos.

Las mediciones especiales de la campaña intensiva de medidas fueron realizadas en el tramo recto de 37 m, preparado para la realización simultánea de las mediciones clásicas y a través del uso de trazadores radioactivos (**Figura 5**).

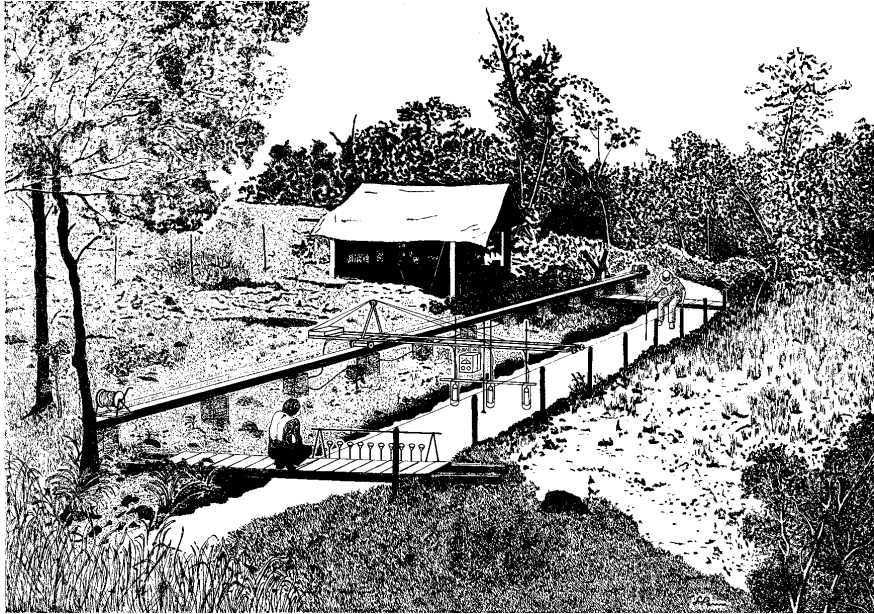


Figura 5.- Tramo de Mediciones del Arroyo Horácio

Las principales mediciones clásicas realizadas en el tramo representativo del Arroyo Horácio agrupan, entre otras medidas: las lecturas del nivel del agua, mediciones del campo de velocidad, determinación del caudal líquido, muestras de sedimentos del fondo, así como de los movimientos por arrastre y en suspensión.

El uso de trazadores radioactivos permitió detallar las características cinemáticas y dinámicas de los sedimentos, dando resultados seguros sobre las cantidades transportadas y dispersas en el tramo de medidas, a través del tiempo.

USO DE LOS TRAZADORES RADIOACTIVOS

Fueron realizados tres experimentos con trazadores radioactivos en el Arroyo Horácio. En los dos primeros fueron utilizadas muestras de arena representando el material del lecho o fondo, marcadas con oro radioactivo, Au^{198} . En el tercero fue utilizado vidrio molido conteniendo Ir^{192} , con la misma granulometría y densidad específica del material del fondo del río. El principal motivo para el uso del Iridio fue estudiar la distribución de los sedimentos profundos, para el cálculo del ancho de la capa móvil del lecho. De esta forma, después del tercer experimento, fueron recolectadas muestras indeformables de aproximadamente 15 cm de largo del sedimento de la capa móvil. Rápidamente, las muestras fueron cortadas en porciones de 1 cm, permitiendo determinar las leyes de repartición de los sedimentos radioactivos en profundidad.

Equipamientos y Procedimientos Experimentales

El dispositivo experimental utilizado en el tramo del Arroyo Horácio permite analizar los datos obtenidos por los trazadores sobre el movimiento por arrastre, de dos modos diferentes:

- a través de la aplicación del Método de Balance de las Tasas de Contages, y
- a través de la utilización de la Teoría de los Procesos Aleatorios.

Equipo de Inmersión del Trazador Radioactivo

El equipo de inmersión ilustrado en las **Figuras 6 e 7** fue especialmente concebido para los trabajos en arroyos. El permite realizar una inyección en función de cualquier ley de distribución transversal, a través de una sección del escurrimiento.

En los tres experimentos realizados en el Arroyo Horácio, los sedimentos marcados o simulados con trazadores radioactivos fueron depositados en el fondo de modo uniforme, a través de la sección transversal de inyección. Para hacer esto, la masa total del trazador fue dividida en 10 partes iguales. Cada una de las partes fue cuidadosamente introducida en un de los recipientes cilíndricos del equipo de inmersión, a través de los embudos de boca ancha mostrados en las figuras. Rápidamente, y con el equipo dentro del agua, se pasó a completar los recipientes con una solución diluída con colorantes. Este procedimiento no solo permitió lavar la parte interna de la boca del embudo, sino también permitió visualizar y verificar el buen funcionamiento del sistema de abertura del inyector.

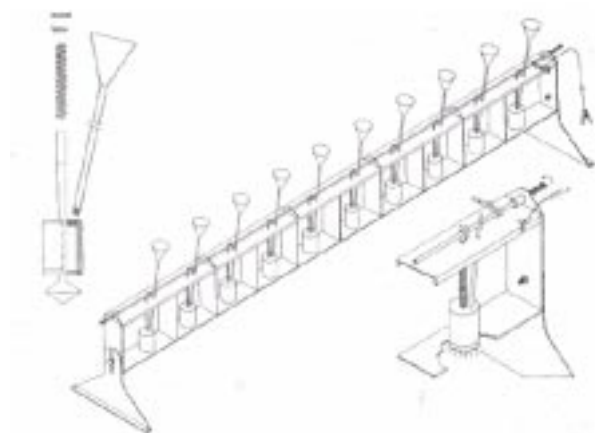


Figura 6.- Equipo de Inmersión de los Sedimentos Radioactivos (Wilson-Jr, 1987, 2002)



Figura 7.- Inyección de los Sedimentos Radioactivos en el Arroyo Horácio (Wilson-Jr, 2002)

Sistema de Detecciones de los Trazadores Radioactivos

Las posiciones horizontales de los granos de sedimentos radioactivos en el fondo del escurrimiento fueron determinados con ayuda de tres detectores de cintilación, dispuestos de forma tal que pudiesen cubrir, para cada instante, una faja del fondo de alrededor de 5 cm de longitud por 1 m de ancho, como representado en la **Figura 8**. Ellos fueron fijados a un soporte metálico que se desplazaba longitudinalmente a través del arroyo, apoyado sobre railes de madera, con una velocidad constante igual a 2,40 m/min (**Figuras 5 y 9**). En sentido del flujo, al final del tramo de medidas, fue instalado un motor al que se acoplo un reductor de velocidades, destinado a traccionar automáticamente el sistema de detección de aguas arriba para aguas abajo. En la extremidad superior, o sea, aguas arriba del tramo, fue instalada una manivela con un cubo para recoger manualmente el carro de detección al punto de origen. De esta forma, las sondas se desplazaban en sentido del escurrimiento, con ayuda del motor y con

una velocidad constante, registrándose las tasas de radioactividad del fondo del canal, y de la misma forma retornaban, manualmente, para que se pudiese iniciar una nueva detección.

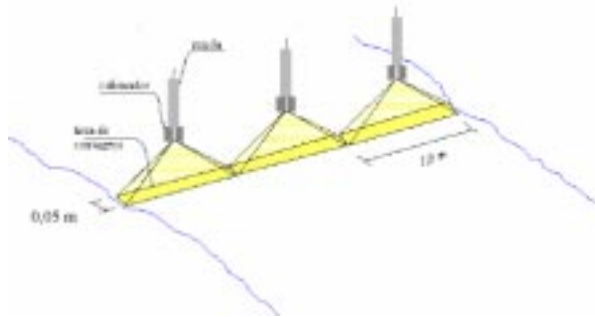


Figura 8.- Áreas de Contage Cubiertas por los Detectores de Radiación (Nery,2002)



Figura 9.- Sistema de Detección Utilizado en el Arroyo Horácio (Wilson-Jr, 1987, 2002)

Muestreo de los Sedimentos Radioactivos de la Capa Activa del Fondo

Las detecciones longitudinales fueron realizadas hasta el instante en que un tercio de la masa de los granos radioactivos tuviese dejado el tramo de medidas del Arroyo Horácio. Después del tercer experimento, fueron recolectadas muestras indeformadas del sedimento de la capa móvil, por medio de un aparato de forma cilíndrica, de 3,8 cm de diámetro y 20 cm de longitud, como ilustrado en las Figuras 10 e 11, a seguir.

Fueron recolectadas muestras de sedimentos hasta una profundidad média de 20 cm dentro de la capa móvil, a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ del ancho de las secciones transversales, con un espaciamento de 1m entre ellas, exactamente estarian bajo las posiciones cubiertas por los detectores de radiación, a través de todo el tramo de mediciones, para un total de 31 secciones y 93 muestras. A seguir, las muestras cilíndricas fueron cortadas en subcapas de 1 cm de ancho, utilizándose el aparato representado en la Figura 12.

Esas muestras fueron recolectadas para realizar el estudio de la repartición de los sedimentos radioactivos en profundidad, o sea, para el estudio de la distribución vertical de los sedimentos en el interior de la capa móvil del fondo (Wilson-Jr, 1987; Nery, 2002).

El valor de la tasa de emisión de radiación o de actividad radioactiva de cada faja, es proporcional a la masa de sedimento radioactivo contenida en esa capa. De esa manera, la concentración de los sedimentos radioactivos por unidad de masa del material sólido de la capa móvil podría ser estudiado en función de su profundidad, a través de las mediciones de la tasa de emisión radioactiva por unidad de masa para cada una de las subcapas de las muestras recolectadas, expresadas en contages por minuto por gramos de material del fondo (cpm/g). La profundidad média en que se encontraba el trazador, o espesor médio E_m , en centímetros, de cada muestra, fue calculada a través de la siguiente expresión:

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n c_i z_i \Delta z}{\sum_{i=1}^n c_i \Delta z} \quad (1)$$

donde: c_i es la concentración de sedimentos radioactivos en cpm/g, de la i-ésima subcapa;

z_i = la profundidad média de la i -ésima subcapa;
 n = número de subcapas de una muestra.

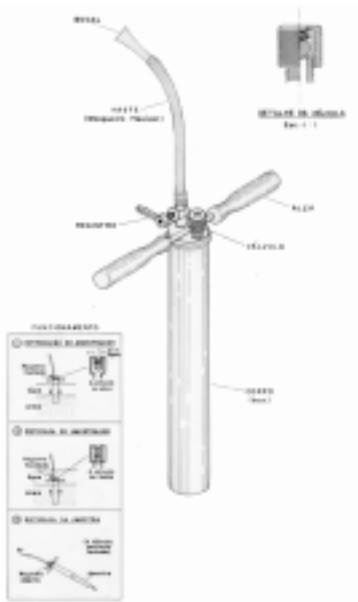


Figura 10.- Colector de Muestras Indefor­madas de la Capa Móvil. (Wilson-Jr, 1987, 2002)



Figura 11.- Funcionamiento del Colector de Muestras (Wilson-Jr, 1987, 2002)

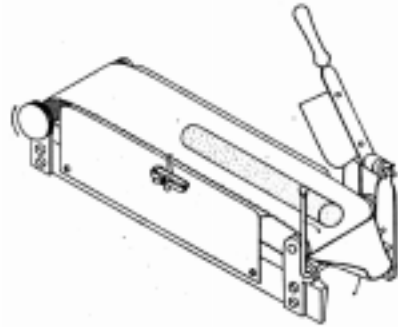


Figura 12.- Aparato para el Corte en Subcapas, de las Muestras de Sedimentos (Wilson-Jr, 1987, 2002)

Para cada posición transversal ($1/4$, $1/2$ e $3/4$) se calculó la curva média de repartición del sedimento radioactivo en función de la profundidad dentro de la capa activa. El valor médio correspondiente para una determinada profundidad y posición transversal, fue calculado como siendo la média de las 31 concentraciones de las subcapas relativas a esa profundidad en posición transversal. Las curvas médias obtenidas están representadas en las **Figuras 13**, a seguir.

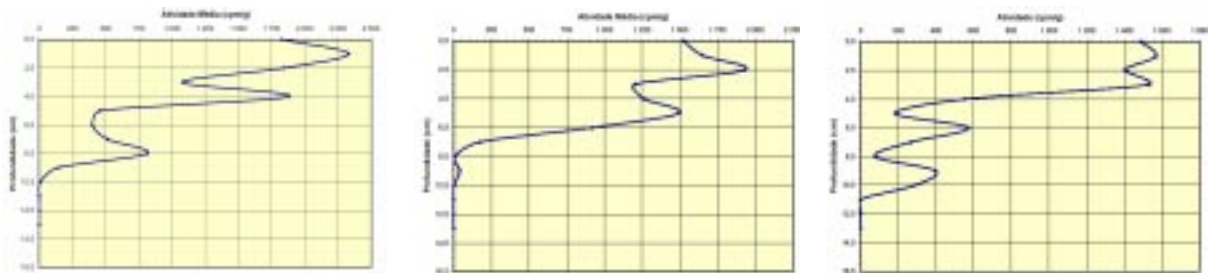


Figura 13.- Curvas Médias del Trazador en Función de la Profundidad en la Margen Izquierda, Centro y Margen Derecha del Arroyo Horácio (Wilson-Jr, 1987; Nery, 2002)

A partir de esas curvas, se determinaron los espesores mínimo, médio y máximo, que serán utilizados en el cálculo de las descargas sólidas por arrastre del Arroyo Horácio. Los valores mínimo, médio y máximo de los espesores del transporte fueron iguales a 0,78; 2,98 y 7,37 cm, respectivamente.

Método del Balance de las Tasas de Contage

El Método del Balance de las Tasas de Contage fue desarrollado en el Centro de Estudios Nucleares de Saclay del Comisariado de Energía Atómica de Francia – CNES/CEA, por los investigadores Guy Sauzay y Guy Courtois (Wilson-Jr, Rodrigues y Santos, 1980). Desde 1966 este método ha sido utilizado en varias partes del mundo, para el estudio del movimiento de los sedimentos en escurrimientos con superficie libre en ambientes fluvial, estuarino y marino. Este método tiene la finalidad de obtener datos cualitativos y cuantitativos del movimiento por arrastre de los sedimentos, por medio del uso de trazadores.

El método consiste de la inmersión de una cantidad de material radioactivo, con propiedades semejantes a las del material de la capa móvil del fondo, así como del levantamiento o detección del transporte y de la dispersión de ese material. La descarga sólida del material del fondo es calculada por la ecuación:

$$Q_b = \rho'_s L V_s E \quad (2)$$

donde: Q_b = la descarga sólida de arrastre en (t/d),

ρ'_s = masa específica del sedimento submergido en (t/m^3),

L = ancho del transporte en (m),

V_s = velocidad média de desplazamiento de la nube radioactiva, en (m/d),

E = espesor de la capa móvil o capa activa del movimiento por arrastre, en (m).

El ancho del transporte, L , puede ser obtenido directamente de las curvas de la misma actividad (isoactividad o de isocontage), que son trazadas a partir de la unión de los puntos de igual contage de una detección. La velocidad média V_s es calculada a partir del desplazamiento del centro de gravedad de la nube radioactiva, entre dos detecciones consecutivas. Por último es necesario conocer el espesor del transporte E , que se determina por el próprio método de balance de las tasas de contage, o a través del muestreo de material radioactivo de la capa activa del fondo.

La **Figura 14** (Wilson-Jr, Rodrigues y Santos, 1980) es una representación tridimensional de la dispersión del material de los sedimentos radioactivos. Los métodos de cálculo del “Volumen del Sólido”, que corresponde al valor N del número total de contages de la nube radioactiva, expresado en ($cpm.m^2$), también está esquematizado en esta figura. Las secuencias **b**, **c** y **d** de la figura representan los procesos de la integración utilizados durante la determinación de ese volumen.

Las curvas de isocontages (**b**) brindan una mejor interpretación cualitativa do fenomeno. A partir de esas curvas son obtenidas: el ancho L del transporte, las direcciones y sentidos preferenciales de los movimientos sólidos, así como las regiones de erosión y deposición de los sedimentos.

Los diagramas de transporte (**d**) representan las proyecciones de los volúmenes sólidos sobre una dirección en particular. Para el caso de los escurrimientos fluviales y estuarinos, esta dirección coincide con el eje del escurrimiento.

La **Figura 14** (**c**) ilustra la obtención de los diversos valores de n_i , en (cps.m) permitiendo de este modo el trazado del diagrama de transporte, o sea, el gráfico de n_i en función de la

distancia en relación a un origen, por lo general la sección de la inyección. Con la integración gráfica del diagrama de transporte podremos ofrecer el valor procurado de N . La proyección X_G del centro de gravedad G_D del diagrama, es la proyección del centro de gravedad G de la nube radioactiva, que se encuentra sobre el eje del transporte.

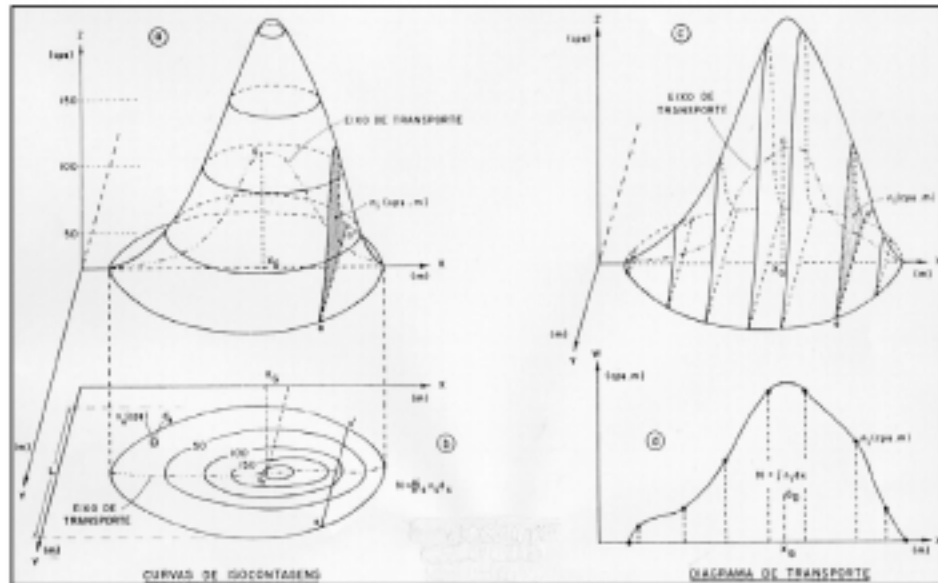


Figura 14.- Método de la Determinación de las Tasas de Contage
(Wilson-Jr, Rodrigues y Santos, 1980)

En cada una de las tres inyecciones realizadas en el Arroyo Horácio, fueron plotadas las curvas de isocontages y determinados los diagramas de transporte correspondientes a cada pasaje de las sondas de detección. La **Figura 15** muestra las curvas de isocontages, sendo estas la 1^a, 10^a, 20^a y 30^a detecciones realizadas durante la primera experiencia con Au^{198} (Nery, 2002).

La **Figura 16** constituye un ejemplo del Diagrama de Transporte de una de las detecciones realizadas durante el primer experimento con oro radioactivo. La posición média de los granos de sedimentos de una detección corresponderia a las coordenadas X_{CG} y Y_{CG} del centro de gravedad de esa detección. Las **Figuras 17** y **18** corresponden a los gráficos de las evoluciones temporales de las posiciones longitudinales del centro de gravedad (média), de la moda y de la varianza de los tres experimentos realizados con trazadores radioactivos en el Arroyo Horácio.

En la **Tabla 1**, a continuación, están presentados los valores obtenidos para los cuatros factores básicos de la **Ecuación 2**. Cabe destacar que el espesor E de la capa móvil del fondo fue representada por la média de los valores máximo, médio y mínimo, como resultado del estudio de la repartición de los sedimentos radioactivos en profundidad.

E_{min} , $E_{médio}$ e $E_{mán}$ representan los espesores mínimo, medio y máximo, de las configuraciones del fondo registrados durante las campañas de mediciones.

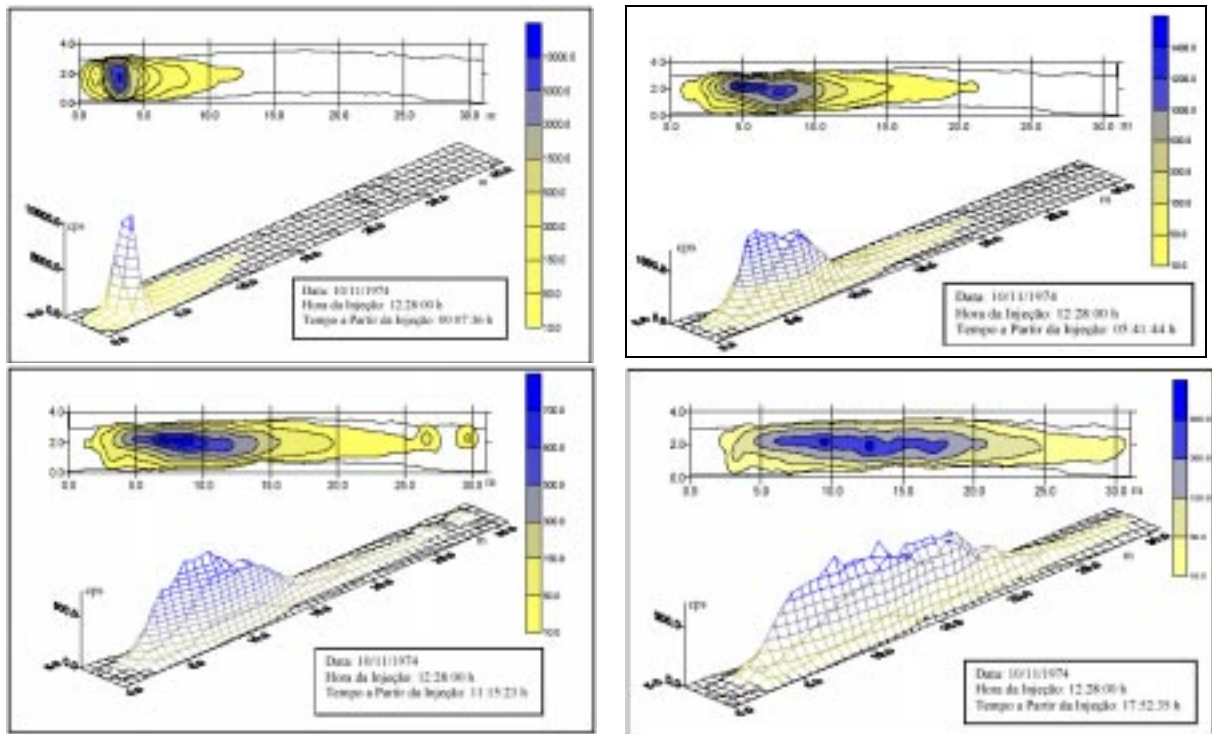


Figura 15.- Curvas de Isocontages y Representaciones Tridimensionales en Función del Tiempo, del Primer Experimento Realizado con Oro Radioactivo-Au¹⁹⁸, en el Arroyo Horácio (Nery, 2002)

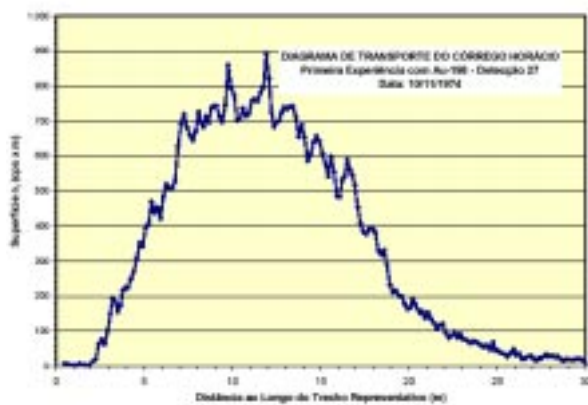


Figura 16.- Ejemplo del Diagrama de Transporte del Arroyo Horácio (Nery, 2002)

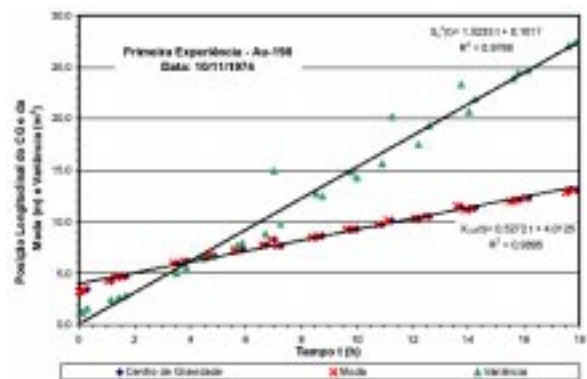


Figura 17.- Evolución de las Coordenadas Longitudinales del Centro de Gravedad, de la Moda y Varianza en Función del Tiempo. Primer Experimento con Au¹⁹⁸ (Nery, 2002)

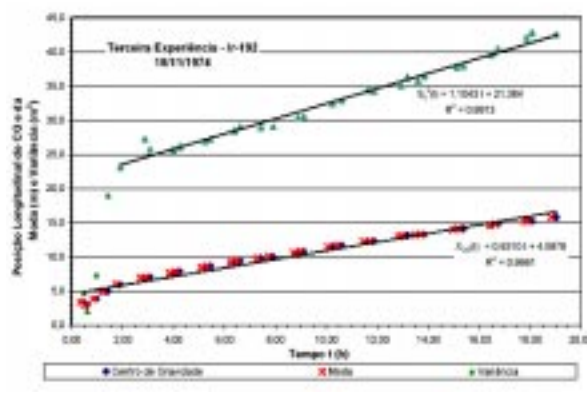
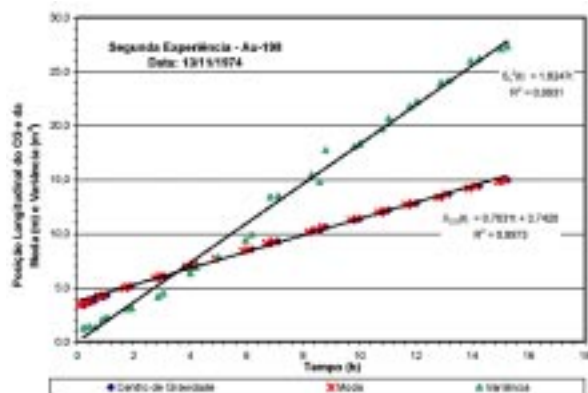


Figura 18.- Evoluciones de las Coordenadas Longitudinales del Centro de Gravedad, de la Moda y la Varianza en Función del Tiempo. Segundo Experimento con Au¹⁹⁸ y Tercero con Ir¹⁹². (Nery, 2002)

Tabla 1.- Descargas Sólidas por Arrastre del Arroyo Horácio con el Uso de Trazadores Radioactivos (Nery, 2002)

Factores de la Ecuación 2		1º Experimento	2º Experimento	3º Experimento
ρ'_s	t/m ³	1,65	1,65	1,65
L	m	3,05	3,05	3,05
V	m/día	12,66	18,32	15,15
E_{\min}	m	0,01	0,01	0,01
$E_{\text{méd}}$	m	0,03	0,03	0,03
E_{\max}	m	0,07	0,07	0,07
Descargas Sólidas				
$Q_{b\min}$	t/día/m	0,16	0,24	0,19
$Q_{b\text{méd}}$	t/día/m	0,62	0,90	0,75
$Q_{b\max}$	t/día/m	1,54	2,23	1,84
Q_{\min}	t/día	0,50	0,72	0,59
$Q_{\text{méd}}$	t/día	1,90	2,75	2,27
Q_{\max}	t/día	4,70	6,80	5,62

APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE LAS DUNAS Y RIZAS

Registro de las Configuraciones del Fondo

Durante los trabajos con los trazadores se realizaron, continuamente, registros longitudinales de las configuraciones del fondo - Lagrangeanos, y registros temporales en secciones transversales fijadas - Eulerianos, con un equipo conocido por C-Meter, ilustrado en las **Figuras 19 y 20**, a seguir (Wilson-Jr, 2002; Wilson-Jr y Paiva, 2003).

El C-Meter es un equipo de ultra-sonografía, originalmente concebido para medir espesores de acero y cuerpos metálicos, y que fue adaptado para medir espesores de agua, a través de calibraciones realizadas en laboratorio y en el tramo de medidas del Arroyo Horácio. La precisión de esos registros permite realizar un análisis estadística profunda de las formas del fondo. A medida que el emisor-receptor ultra-sonográfico del C-Meter se desplaza a lo largo del Arroyo Horácio, las formas del fondo estaban siendo registradas de la misma

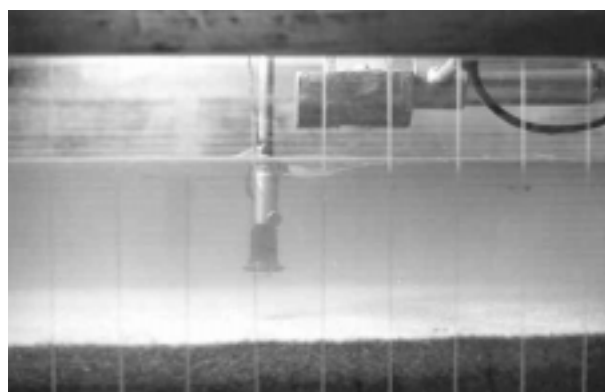


Figura 19.- Equipamiento Ultra-Sonográfico – C-Meter – Adaptado para Medir el Espesor de Agua entre el Emisor-Receptor y el Fondo del Esguerrimiento (Wilson-Jr, 2002; Wilson-Jr y Paiva, 2003)

manera que las tasas de contages emitidas por los trazadores radioactivos, obteniéndose, simultáneamente, los registros Lagrangeanos de las formas del fondo y de los sedimentos radioactivos.

Durante el intervalo de tiempo entre las detecciones longitudinales, el carro de transporte automático de los detectores permanecía parado en una determinada sección transversal, pero con los aparatos encendidos, registrando el pasaje de los sedimentos radioactivos y las variaciones temporales de las formas del fondo. Las **Figuras 21** y **22** son ejemplos de registros longitudinales y temporales realizados en el Arroyo Horácio, los cuales constituyen la base de datos para realizar los análisis estadísticos de las formas de fondo, así como de las estimativas de la descarga sólida por medio del uso de la **Ecuación de las Dunas**.

En la **Figura 21**, la curva de la parte superior se refiere a las formas del fondo y la inferior a la de los trazadores radioactivos, situación esta contraria a la de la **Figura 22**, donde la curva de la parte inferior retrata las formas del fondo y la curva superior las tasas de contage del trazador radioactivo.



Figura 20.- Registrador del Espesor de Agua, al Centro, en el Carro de Detección Longitudinal del Arroyo Horácio. (Wilson-Jr y Paiva, 2003)

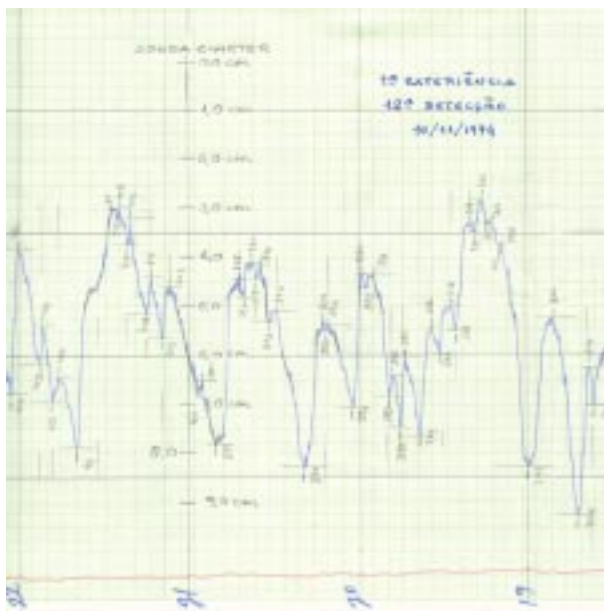


Figura 21.- Ejemplo de Registro Lagrangeano Realizado en el Arroyo Horácio (Wilson-Jr, 2002; Wilson-Jr y Paiva, 2003)

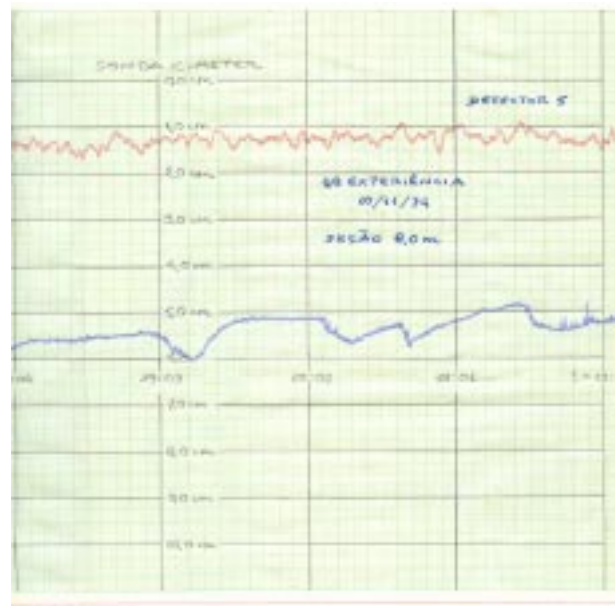


Figura 22.- Ejemplo de Registro Temporal Realizado en el Arroyo Horácio (Wilson-Jr, 2002; Wilson-Jr y Paiva, 2003)

La serie de registros longitudinales y temporales fue digitalizada y almacenada en planillas EXCEL, permitiendo el estudio estadístico de las formas del fondo, la determinación del espesor del transporte, de la velocidad de desplazamiento de la capa activa del fondo y de la descarga sólida por arrastre de los sedimentos del fondo. En las **Figuras 23** y **24** son presentados algunos ejemplos de los registros digitalizados, longitudinales y temporales de las formas del fondo, respectivamente.

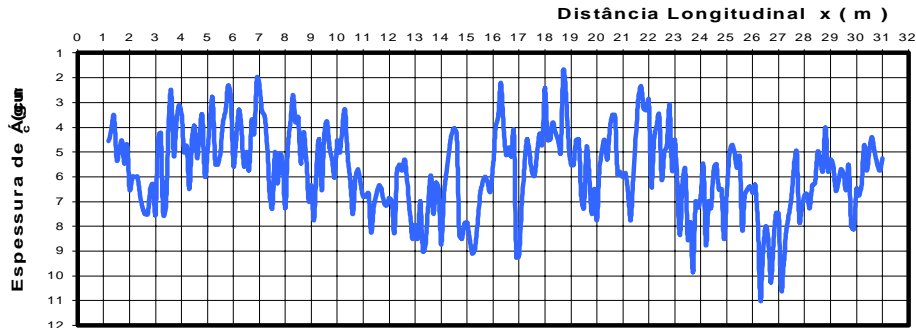


Figura 23.- Ejemplo de Registro Longitudinal Digitalizado.
Formas del Fondo del Arroyo Horácio. (Wilson-Jr y Paiva, 2003)

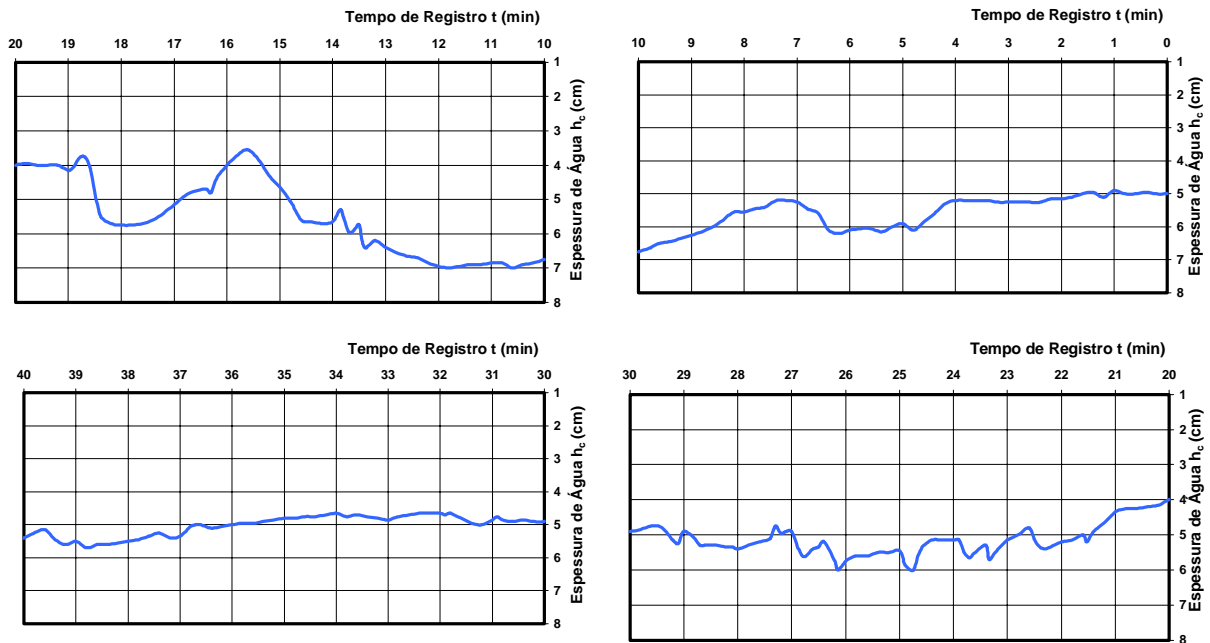


Figura 24.- Ejemplos de Registros Temporales Digitalizados de las Formas del Fondo del Arroyo Horácio
(Wilson-Jr y Paiva, 2003)

A partir de los registros Lagrangeanos y Eulerianos mostrados en las Figuras 21 y 22, fueron obtenidos los valores médios de las longitudes, de las alturas y de los tiempos de pasaje de las dunas por una sección fija del tramo representativo, respectivamente, los cuales están representados en las Tablas 2 y 3, a seguir.

Tabla 2.- Valores Estadísticos de las Configuraciones del Fondo Obtenidos de los Registros Lagrangeanos
(Wilson-Jr y Paiva, 2003)

Características Estadísticas	Longitudes de las Dunas			Alturas de las Dunas		
	Símbolos	Valores	Unidades	Símbolos	Valores	Unidades
Media	\bar{L}_x	10,46	cm	\bar{H}_x	1,11	cm
Varianza	S_x^2	29,22	cm ²	S_{hx}^2	0,7153	cm ²
Desvio-Padrón	Std_x	5,41	cm	Std_h	0,85	cm
Valor Mínimo Registrado	$L_{mín}$	1,75	cm	$H_{mín}$	0,05	cm
Valor Máximo Registrado	$L_{máx}$	52,63	cm	$H_{máx}$	7,55	cm
Número de Observaciones	N_L	13.963		N_H	13.978	

Tabla 3.- Valores Estadísticos de las Configuraciones del Fondo Obtenidos de los Registros Eulerianos (Wilson-Jr y Paiva, 2003)

Características Estadísticas	Tiempo de Pasaje de las Dunas			Alturas de las Dunas		
	Símbolos	Valores	Unidades	Símbolos	Valores	Unidades
Media	\bar{L}_t	1,58	min	\bar{H}_t	0,61	cm
Varianza	S_t^2	1,66	min ²	S_{ht}^2	0,1819	cm ²
Desvio-Padrón	Std_t	1,29	min	Std_{ht}	0,43	cm
Valor Mínimo Registrado	$L_{t_{\min}}$	0,10	min	$H_{t_{\min}}$	0,05	cm
Valor Máximo Registrado	$L_{t_{\max}}$	12,76	min	$H_{t_{\max}}$	4,60	cm
Número de Observaciones	N_t	681		N_{Ht}	693	

Ecuación de las Dunas y Rizas

Para el cálculo de la descarga sólida lineal por arrastre, fue utilizada la **Ecuación 3**, conocida como Ecuación de las Dunas e Rizas, presentada por Simons, Richardson y Nordin (1965) (Wilson-Jr y Paiva, 2003):

$$q_b = (1 - \lambda) V_s \frac{h}{2} \quad (3)$$

donde: λ = la porosidad de la capa activa del fondo,

V_s = velocidad media de desplazamiento de las formas del fondo,

h = la amplitud media de las configuraciones del fondo.

La velocidad media de desplazamiento V_s y la amplitud media de las dunas h fueron calculadas pelas **Ecuaciones 4 y 5**, presentadas a seguir. Referente a la porosidad λ , se adoptó el valor de **0,35** para el material del fondo.

$$V_s = \frac{\bar{L}_x}{\bar{L}_t} \quad (4)$$

$$h = \bar{H}_x + Std_h \quad (5)$$

Considerándose esas ecuaciones y los valores de las **Tablas 1 y 2**, se obtiene:

$$V_s = 6,62 \text{ cm/min}$$

$$h = 1,96 \text{ cm}$$

$$q_b = 7,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}.$$

GENERALIZACIÓN DEL MÉTODO DE VUKMIROVIC' Y VUKOTIC'

Vukmirovic' e Vukotic' (1981) realizaron varios estudios hidráulicos y sedimentológicos, a través de los métodos clásicos y por medio del uso de trazadores radioactivos, en los Ríos Sava y Savinja, en Yugoslavia, con el objetivo de medir la descarga sólida por unidad de ancho del material del fondo. Con los datos obtenidos, se calcularon los valores de las

funciones adimensionales de las intensidades de corriente Ψ , y del transporte, Φ , de la **Ecuación 6** de Einstein (1950):

$$\Phi = 2,151 e^{-0,391\Psi} \quad (6)$$

No obstante, en lugar de esa relación analítica, la expresión que mejor se ajustó a los datos de los ríos estudiados fue del tipo:

$$\Phi = a(\theta - \theta_0)^3 \quad (7)$$

donde θ_0 es la tensión tangencial crítica normalizada que caracteriza el movimiento incipiente por arrastre del grano de sedimento, y θ es la tensión tangencial normalizada del escurrimiento utilizada por Shields (1933) e Engelund (1966) (Wilson-Jr, Rodrigues y Santos, 1980), a través de la **Ecuación 8**, a seguir.

$$\theta = \sqrt{\frac{\gamma RS}{(\gamma_s - \gamma)D}} = \frac{1}{\Psi^{1/2}} \quad (8)$$

donde: γ = peso específico del agua,
 γ_s = peso específico del sedimento,
 R = radio hidráulico de la sección transversal de medidas,
 S = pendiente longitudinal de la línea del agua,
 D = diámetro característico del sedimento del fondo. En este caso es el diámetro mediano.

Los coeficientes a y θ_0 fueron determinados para la sección de medidas denominada Letus' del Río Savinja, obteniéndose la **Ecuación 9** utilizada por Vukmirovic' y Vukotic' (1981):

$$\Phi = 40(\theta - 0,146)^3 \quad (9)$$

Aplicación de la Ecuación de Vukmirovic' y Vukotic'

Para la aplicación de la **Ecuación 9**, fueron considerados los valores del radio hidráulico, R ; del caudal líquido, Q ; de la descarga sólida por unidad de ancho obtenida con los trazadores radioactivos, q_b ; y de las pendientes mínima, media y máxima, registradas durante la campaña de mediciones continuas (Nery, 2002). Los valores de esas variables fueron combinados entre sí para obtener los Escenarios Hidráulico-Sedimentológicos del Arroyo Horacio vigentes durante la realización de los ensayos con los trazadores radioactivos. Esos valores están presentados en la **Tabla 4**, a continuación.

Como esas grandezas no varían de forma repentina, aunque varían continuamente en la naturaleza, cada un de los escenarios ciertamente ocurrió durante el período de las mediciones especiales. Con el ajuste de la **Ecuación 7** de Vukmirovic' y Vukotic' (1981) a los datos de esta tabla, se obtuvo la **Ecuación 10**:

$$\Phi = 0,6303(\theta + 0,207)^3 \quad (10)$$

con un coeficiente de determinación $r^2 = 0,9561$, asegurando así la calidad del ajuste.

Tabla 4.- Escenarios de las Características Hidráulico-Sedimentológicas del Arroyo Horácio durante la Campaña de Mediciones Continuas (Nery, 2002)

Escenario	R (m)	S (cm/km)	D (mm)	q_b (N/m/s)	θ	Φ
Primer Experimento con Trazador Radioactivo: Au¹⁹⁸						
I	0,149	98,2	0,310	0,175	0,532	0,302
II	0,149	52,7	0,310	0,070	0,389	0,122
III	0,149	3,7	0,310	0,018	0,103	0,031
IV	0,145	98,2	0,310	0,175	0,524	0,302
V	0,145	52,7	0,310	0,070	0,384	0,122
VI	0,145	3,7	0,310	0,018	0,102	0,031
Segundo Experimento con Trazador Radioactivo: Au¹⁹⁸						
VII	0,148	149,5	0,304	0,253	0,660	0,451
VIII	0,148	77,3	0,304	0,102	0,475	0,182
IX	0,148	23,5	0,304	0,027	0,262	0,048
X	0,164	149,5	0,304	0,253	0,695	0,451
XI	0,164	77,3	0,304	0,102	0,500	0,182
XII	0,164	23,5	0,304	0,027	0,275	0,048
Tercer Experimento con Trazador Radioactivo: Ir¹⁹²						
XIII	0,132	143,0	0,305	0,209	0,609	0,370
XIV	0,132	80,8	0,305	0,085	0,458	0,147
XV	0,132	14,5	0,305	0,022	0,194	0,037
XVI	0,135	143,0	0,305	0,209	0,616	0,361
XVII	0,135	80,8	0,305	0,085	0,463	0,147
XVIII	0,135	14,5	0,305	0,022	0,196	0,037

No obstante, la **Ecuación 10** no describe ni física, ni adecuadamente el movimiento de los sedimentos, pues de acuerdo con esa expresión, aunque las velocidades del escurrimiento sean nulas, o sea, cuando el valor de la tensión tangencial normalizada θ sea igual a zero, el valor de intensidad del transporte Φ será positivo. En otras palabras, la descarga sólida por arrastre del material del fondo existiría, mismo para valores nulos de velocidad del escurrimiento, lo que contradice la dinámica del comportamiento de los sedimentos en escurrimientos con superficie libre.

Esa constatación experimental para el caso del Arroyo Horácio mostró que el exponente **3** presentado por Vukmirovic' y Vukotic' en la **Ecuación 7**, no es universal, debiendo ser ajustado para cada caso en particular.

Modelo Analítico para el Cálculo de la Descarga Sólida del Arroyo Horácio

La **Ecuación 7** puede también ser escrita de la siguiente forma:

$$\Phi^{1/b} = A (\theta - \theta_o) \quad (11)$$

siendo:

$$A = a^{1/b} \quad (12)$$

Para el cálculo de los valores de **a**, θ_o y del exponente **b** que tuvieron mejor ajuste en relación a los datos experimentales del Arroyo Horácio obtenidos con trazadores radioactivos, fueron trazadas las curvas de $\Phi^{1/b}$ en función de θ , para valores de **b** que variaron de **1** a **3**. En la

Figura 25 están ejemplificadas las curvas de $\Phi^{1/b}$ para valores de **b** iguales a **1, 3/2, 2 y 3**. La expresión que mejor se ajustó a los datos experimentales del Arroyo Horácio fue la siguiente:

$$\Phi = 1,296 (\theta - 0,080)^2 \quad (13)$$

En la **Figura 26** se muestran los valores experimentales obtenidos por medio de los trazadores radioactivos, junto con la curva descrita por la **Ecuación 13**. Esta ecuación fue la recomendada para estimar la descarga sólida del movimiento por arrastre del Arroyo Horácio durante el ciclo hidrológico de los estudios. Ella fue denominada de “Modelo Analítico para el Cálculo de la Descarga Sólida por Arrastre del Arroyo Horácio”.

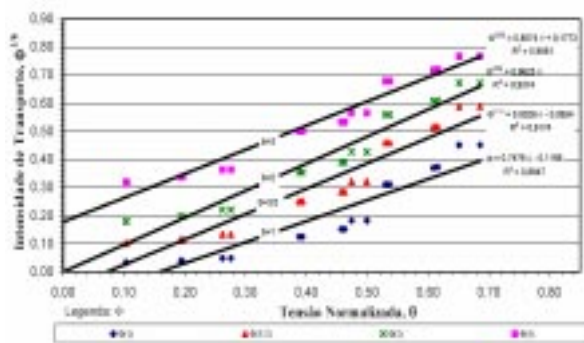


Figura 25.- Curvas de $\Phi^{1/b}$ en Función de θ , para el Arroyo Horácio (Nery, 2002)

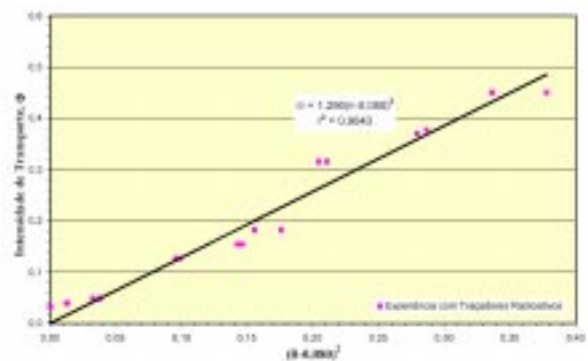


Figura 26.- Modelo de la Descarga Sólida por Arrastre. (Nery, 2002)

TEORÍA DE LOS PROCESOS ALEATORIOS

El movimiento de los sedimentos por arrastre o en suspensión en los escurrimientos con superficie libre caracterizan procesos aleatorios, cuyos eventos elementares son las trayectorias de las partículas individuales envueltas. Para el estudio del movimiento de un grupo de partículas son adoptados dos tipos de descripción: la Descripción Lagrangeana o Espacial, para el Transporte por Arrastre, a través del análisis del Proceso Aleatorio $\mathbf{X}_t(\mathbf{t}, \omega)$ que caracteriza la evolución en el tiempo de la posición media de un grupo de partículas; y la Descripción Euleriana o Temporal, para el transporte en suspensión, debido al análisis del Proceso Aleatorio $\mathbf{T}_x(\mathbf{x}, \omega)$ que va a caracterizar el tiempo medio de pasaje de un grupo de partículas a través de las secciones del escurrimiento.

Los Procesos Aleatorios $\mathbf{X}_t(\mathbf{t}, \omega)$ y $\mathbf{T}_x(\mathbf{x}, \omega)$ pertenecen a un mismo Espacio de Probabilidad, definido por el sistema: $\{\Omega, \mathbf{A}, \mathbf{P}\}$, donde: $\Omega = \{\omega\}$ es el Espacio de Definición de los eventos elementares ω que corresponden a las trayectorias individuales de los granos o de las partículas de contaminantes; \mathbf{A} es un σ -Algebra cuyos elementos son los subconjuntos del espacio Ω ; y \mathbf{P} es la Probabilidad de Ocorrencia de los subconjuntos de la familia \mathbf{A} .

Los procesos \mathbf{X}_t y \mathbf{T}_x son definidos por las Distribuciones de Probabilidad (Wilson-Jr, 1987):

$$F_t(x) = P\{X(t) \leq x\}; \quad x \geq 0 \quad (14)$$

$$Q_x(t) = P\{T(x) \leq t\}; \quad t \geq 0 \quad (15)$$

que se relacionan a través de la **Ecuación 16**, desarrollada por Todorovic', Simons y Li (1976):

$$F_t(x) = 1 - Q_x(t) \quad (16)$$

Todorovic' *et al.* (1966) mostraron que esas Funciones de Repartición $F_t(x)$ y $Q_x(t)$, pueden ser estimadas por Funciones Aproximativas, $F_{t1}(x)$ y $F_{t2}(x)$, y, $Q_{x1}(t)$ y $Q_{x2}(t)$, tales que:

$$0 \leq F_{t1}(x) \leq F_t(x) \leq F_{t2}(x) \leq 1 \quad (17)$$

$$0 \leq Q_{x2}(t) \leq Q_x(t) \leq Q_{x1}(t) \leq 1 \quad (18)$$

Durante el estudio de esas ecuaciones, aparecen dos funciones λ_1 e λ_2 denominadas Funciones de Intensidad de Movilidad de los Granos (Todorovic' *et al.*, 1966; Wilson-Jr, 1987; Mendes, 1995; Buckmann 1996). Diferentes modelos pueden ser obtenidos de acuerdo con las expresiones matemáticas dadas por esas funciones.

Los Modelos Poissonianos Homogéneos son obtenidos cuando los valores de la intensidad de movilidad son constantes en el tiempo y en el espacio. Para ese caso, el movimiento de la partícula es denominado sin memoria. La trayectoria de la partícula, esto es, su historia, no influye en su comportamiento actual. Tales modelos son abordados por el Programa PAICON, a través del Análisis Temporal y Espacial, lo que posibilita el estudio del movimiento de las partículas inyectadas instantánea o continuamente en los escurrimientos con superficie libre.

Producto a que las inmersiones de los trazadores radioactivos en el Arroyo Horácio fueron instantáneas, sólomente será abordado, en este trabajo, los casos relacionados a las Inyecciones Instantáneas. Para los casos de Inyecciones Continuas pueden ser consultados los trabajos de Todorovic' (1975); Hanno (1979); y, Monteiro y Wilson-Jr (2001 y 2002).

Análisis Espacial: Inmersión Instantánea

El Análisis Espacial describe la distancia longitudinal media recorrida por las partículas en función del tiempo. La inmersión de una substancia será considerada instantánea cuando la duración de la inmersión sea despreciable en relación al tiempo medio del desplazamiento de esa substancia, a lo largo del tramo estudiado del escurrimiento. Esto refierese al caso de los estudios efectuados con trazadores radioactivos en el Arroyo Horácio.

Funciones de Distribución de Probabilidad

Las ecuaciones de las funciones de distribución teóricas aproximadas inferior y superior, $F_{t1}(x)$ y $F_{t2}(x)$, para un determinado tiempo y para una distancia del punto de inyección, son dadas por las Ecuaciones 19 y 20, a continuación:

$$F_{t1}(x) = e^{-\lambda_1 t - \lambda_2 x} \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{k=v+1}^{\infty} \frac{(\lambda_1 t)^v}{v!} \frac{(\lambda_2 x)^k}{k!} \quad (19)$$

$$F_{t2}(x) = e^{-\lambda_1 t - \lambda_2 x} \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{k=v}^{\infty} \frac{(\lambda_1 t)^v}{v!} \frac{(\lambda_2 x)^k}{k!} \quad (20)$$

Funciones de Densidad de Probabilidad

Las ecuaciones de las funciones de densidad de probabilidad $f_{t1}(x)$ y $f_{t2}(x)$ son mostradas a seguir y representan la probabilidad de que la distancia media recorrida por un grupo de partículas durante un tiempo t , esté comprendida dentro del intervalo $(x, x+\Delta x)$.

$$f_{t1}(x) = \frac{\partial F_{t1}(x)}{\partial x} = \lambda_2 e^{-\lambda_1 t - \lambda_2 x} \sum_{v=0}^{\infty} \frac{(\lambda_1 t)^v}{v!} \frac{(\lambda_2 x)^v}{v!} \quad (21)$$

$$f_{t2}(x) = \frac{\partial F_{t2}(x)}{\partial x} = \lambda_2 e^{-\lambda_1 t - \lambda_2 x} \sum_{v=0}^{\infty} \frac{(\lambda_1 t)^{v+1}}{(v+1)!} \frac{(\lambda_2 x)^v}{v!} \quad (22)$$

Moda

La moda corresponde a la abcisa espacial para el cual la función de densidad de probabilidad asumiría su valor máximo. Esa abcisa corresponde a las distancias x_{m1} y x_{m2} , definidas por las **Ecuaciones 23** y **24**, a seguir. El software calcula las funciones de densidad de probabilidad aproximadas superior e inferior, al mismo tiempo que verifica si $x_{m1} = x_{m2}$.

$$f_{t1}(x_{m1}) = \text{Máx} \{f_{t1}(x)\} \quad (23)$$

$$f_{t2}(x_{m2}) = \text{Máx} \{f_{t2}(x)\} \quad (24)$$

Balance de Masa

La masa total de sedimentos para un determinado tiempo es calculada a partir de las funciones de densidad de probabilidad superior e inferior, a través de las **Ecuaciones 25** y **26**.

$$M_{t1} = \sum_{x=1}^{\infty} f_{t1}(x) \Delta x = 1 \quad (25)$$

$$M_{t2} = \sum_{x=1}^{\infty} f_{t2}(x) \Delta x = 1 - e^{-\lambda_1 t} \quad (26)$$

Momentos

En este tópico son presentadas las ecuaciones de los momentos desde la 1ª hasta la 3ª orden, varianzas y coeficientes de asimetría de la distancia recorrida por las partículas en tiempo fijo (Wilson-Jr, 1987; Mendes, 1995; Buckmann, 1996).

Momentos de 1ª Orden

$$E\{F_{t1}(x)\} = \frac{1}{\lambda_2} (\lambda_1 t + 1) \quad (27)$$

$$E\{F_{t2}(x)\} = \frac{1}{\lambda_2} (\lambda_1 t) \quad (28)$$

Momentos de 2ª Orden

$$E\{F_{t1}^2(x)\} = \frac{1}{\lambda_2^2} [(\lambda_1 t)^2 + 4\lambda_1 t + 2] \quad (29)$$

$$E\{F_{t2}^2(x)\} = \frac{1}{\lambda_2^2} [(\lambda_1 t)^2 + 2\lambda_1 t] \quad (30)$$

Momentos de 3ª Orden

$$E\{F_{t1}^3(x)\} = \frac{1}{\lambda_2^3} [(\lambda_1 t)^3 + 9(\lambda_1 t)^2 + 18(\lambda_1 t) + 6] \quad (31)$$

$$E\{F_{t2}^3(x)\} = \frac{1}{\lambda_2^3} [(\lambda_1 t)^3 + 6(\lambda_1 t)^2 + 6(\lambda_1 t)] \quad (32)$$

Varianzas

$$D_{t1} = \frac{1}{\lambda_2^2} (2\lambda_1 t + 1) \quad (33)$$

$$D_{t2} = \frac{1}{\lambda_2^2} (2\lambda_1 t) \quad (34)$$

Coefficientes de Asimetría

$$C_{st1} = \frac{1}{\lambda_2^3} (6\lambda_1 t + 2) \quad (35)$$

$$C_{st2} = \frac{1}{\lambda_2^3} (6\lambda_1 t) \quad (36)$$

Decaimiento de los máximos

El comportamiento de los valores máximos de las funciones de densidad de probabilidad de la distancia recorrida por las partículas, para tiempos elevados, o sea, para $\lambda_1 t \gg 1$, es descrito, analíticamente, por la **Ecuación 37** (Wilson-Jr, 1987; Mendes, 1995; Buckmann, 1996), determinada a partir de las **Ecuaciones 21 y 22**.

$$f_{t1}(x_m) = f_{t2}(x_m) \cong \frac{\lambda_2}{2\sqrt{\pi\lambda_1 t}}; \text{ para } \lambda_1 t \gg 1 \quad (37)$$

Análisis Temporal – Inmersión Instantánea

El Análisis Temporal describe los tiempos de pasaje de las partículas a través de secciones fijas. Pantallas semejantes a las utilizadas durante el Análisis Espacial fueron utilizadas para el Análisis Temporal, con la debida adaptación de las leyendas. Esas expresiones Eulerianas pueden ser encontradas en Wilson-Jr (1987) o Mendes (1995).

Programa PAICON

O **Software PAICON**: Procesos Aleatorios con Inmersiones Instantáneas y CONTINUAS, desarrollado en Lenguaje Delphi posibilita los análisis Euleriana, y Lagrangeana de los movimientos de los sedimentos y contaminantes, en suspensión y arrastre, así como, para los casos en que se consideren inmersiones instantánea y continua, **Figura 27**. El programa presenta innovaciones ofrecidas por el sistema Windows, tales como una interfase de adquisición de datos flexible y una visualización gráfica de los resultados. Las **Figuras 27 y 28** ilustran las dos formas de analizar los datos, cada una de ellas abordando las Inyecciones Instantánea y Continua, además de facilitar los procesos

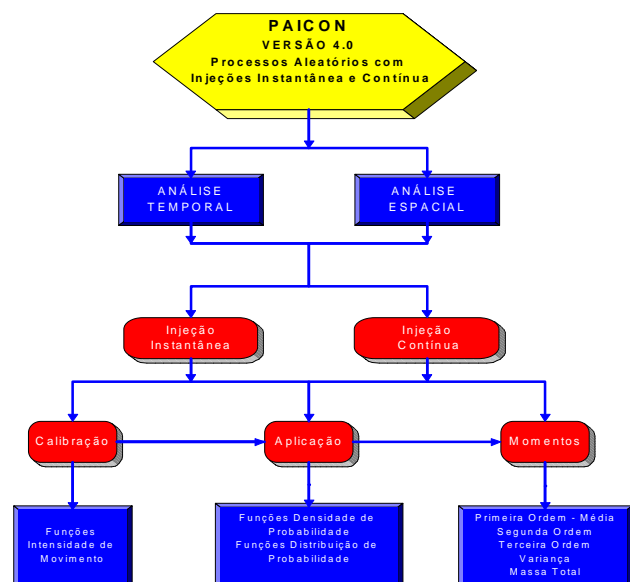


Figura 27. Formas de Análisis de los Datos del Programa PAICON

de Calibración, Aplicación y el Cálculo de los Momentos de las Funciones de Densidad de Probabilidad. El programa es iniciado con la lectura de los archivos que contienen los resultados de los trabajos de campo, donde los valores experimentales de las funciones de densidad de probabilidad temporal $q_x(t)$, y espacial $f_t(x)$, son expresados en función de x y t , respectivamente. Los archivos experimentales son creados, editados y visualizados a través de una herramienta localizada en el menú **Archivo**, situado en la página de apertura mostrada en la **Figura 29**, donde se ilustran las opciones del **Análisis Espacial**. Opciones semejantes son disponibles para el **Análisis Temporal**.



Figura 28. Página de Créditos del Programa PAICON (Monteiro y Wilson-Jr, 2001)



Figura 29. Opciones del Análisis Espacial del Programa (Monteiro y Wilson-Jr, 2001)

En el Programa PAICON se implementó, la **Calibración** de los valores de las funciones de movilidad temporal y espacial, $\lambda_1 (T^{-1})$ y $\lambda_2 (L^{-1})$, la **Aplicación** de las funciones de densidad y distribución de probabilidades y las **Ecuaciones de los Momentos** y de **Decaimiento de los Máximos**. La pantalla de la **Calibración** está ilustrada en la **Figura 30**.

El objetivo de la **Calibración** es determinar los valores (λ_1, λ_2), tal que, las funciones teóricas de densidad de probabilidad se ajusten a las curvas experimentales. A través del par (λ_1, λ_2), se puede calcular las Funciones Densidad de Probabilidad aproximadas superior e inferior, las Funciones de Distribución de Probabilidad, la Moda, la Masa Total, el Decaimiento de los Máximos, los Momentos de 1ª, 2ª y 3ª Orden, la Varianza y los Coeficientes de Asimetría, para las inyecciones continuas y instantáneas.

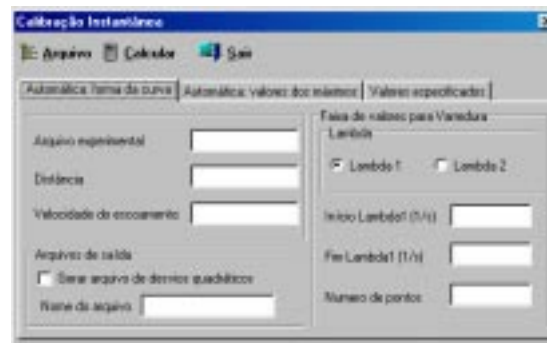


Figura 30. Pantalla de Calibración del Programa (Monteiro y Wilson-Jr, 2002)

Diagramas de Transporte: Entrada de los Datos del Programa PAICON

El diagrama de transporte, según la forma con que fue presentado en la **Figura 16**, representa la función de densidad de probabilidad longitudinal absoluta, de las tasas de contagio detectadas durante el paso de las sondas radioactivas sobre el fondo del escurrimiento. En seguida, las ordenadas de cada detección fueron divididas por el valor del área según el diagrama de transporte de una de las primeras detecciones. El diagrama de transporte así normalizado representa la función de densidad de probabilidad longitudinal relativa, experimental, de las posiciones de las partículas para un determinado instante. Los archivos de los diagramas de transporte normalizados constituyen los datos de entrada de la Opción **Análisis Espacial**, con inyección instantánea, del Software **PAICON 4.0**.

La utilización del programa fue dividida en dos etapas. La primera etapa consiste en la **Calibración** o determinación de los valores de las funciones de movilidad del grano, λ_1 y λ_2 , de forma tal, que los valores de las funciones teóricas de densidad de probabilidad relativa de las posiciones longitudinales de las partículas, para tiempos fijos, **Ecuaciones 21 y 22**, se ajusten a los valores experimentales. La segunda etapa consiste en la **Aplicación** del Modelo Poissoniano Homogéneo Unidimensional - MPHU, que contiene las siguientes posibilidades: cálculos de las funciones de densidades de probabilidad, funciones de distribución (**Ecuaciones 19 y 20**), momentos, posición media de las partículas, varianzas, valores de los picos de concentración en función del tiempo (**Ecuaciones 27 a 37**), cálculos de la velocidad media de transporte y de la descarga sólida, entre otros.

Cálculo del Movimiento por Arrastre de los Sedimentos como Proceso Aleatorio

Determinación de las Funciones de Movilidad λ_1 y λ_2

En este trabajo serán descriptos, resumidamente, cuatro formas de calibración de las funciones de movilidad del grano, λ_1 y λ_2 , utilizadas en el Arroyo Horácio. La **primera forma**, permite ajustar el par de valores de λ_1 y λ_2 para cada detección. De esta manera el par calculado provoca que las funciones teóricas aproximadas, superior e inferior del modelo Poissoniano tengan un mejor ajuste en relación a la dispersión del grupo de partículas, como ilustrado en la **Figura 31**. La **segunda forma** consiste, también, en la determinación de un par de valores de λ_1 y λ_2 para cada detección, siendo que de esta vez el ajuste va a favorecer la localización del pico de concentración (**Figura 32**). Estas dos formas permiten que se evalúe la dependencia del tiempo y del espacio de las funciones de movilidad. La primera forma de ajuste de los datos es usada cuando se quiere determinar con precisión, la longitud del tramo contaminado, siendo que con la segunda forma la precisión de la estimación está orientada para la previsión de los contenidos máximos de contaminantes alcanzados a una cierta distancia de la inyección.

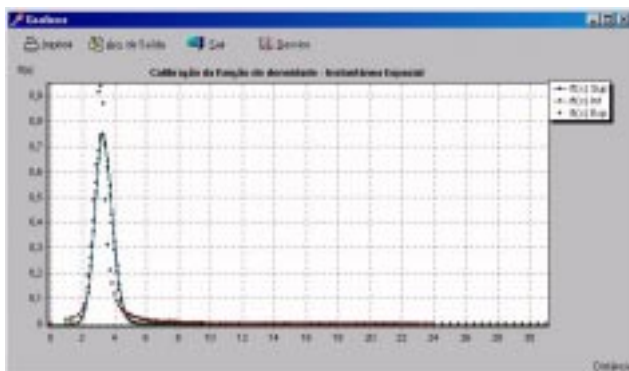


Figura 31.- Ejemplo del Ajuste de la Función de Densidad de Probabilidad Longitudinal por la Posición Media de las Partículas. (Monteiro y Wilson-Jr, 2002)

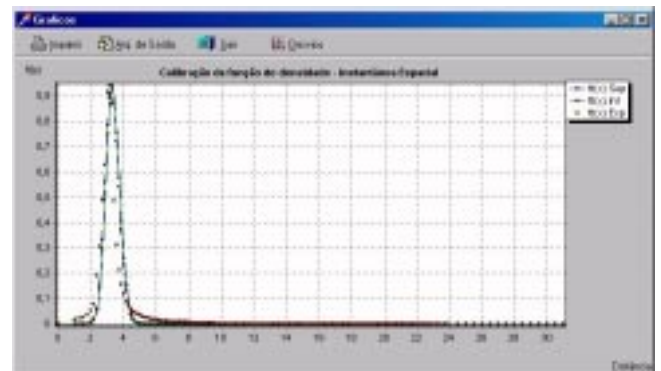


Figura 32.- Ejemplo del Ajuste de la Función de Densidad de Probabilidad Longitudinal por la Posición del Pico de Concentración. (Monteiro y Wilson-Jr, 2002)

Los valores de λ_1 y λ_2 , calculados para cada detección, permiten verificar si esas funciones de movilidad son constantes. Los resultados obtenidos, y que están ilustrados en las **Figuras 33 y 34**, indican que el movimiento de los sedimentos por arrastre del Arroyo Horácio constituye un **Proceso Aleatorio Poissoniano No Homogéneo**, donde las funciones de movilidad de los sedimentos son funciones del tiempo. Esos modelos fueron desarrollados analíticamente por Shen y Todorovic' (1971), y están también presentados en Wilson-Jr (1987).

La **tercera forma** de calibración consiste en la utilización de un único par de valores de λ_1 y λ_2 para todo el escurrimiento. Este par es calculado a partir de la evolución temporal de la

media y de la varianza, siendo debidamente adecuado para los casos en que los resultados experimentales son ajustados perfectamente a los Modelos Poissonianos Homogéneos.

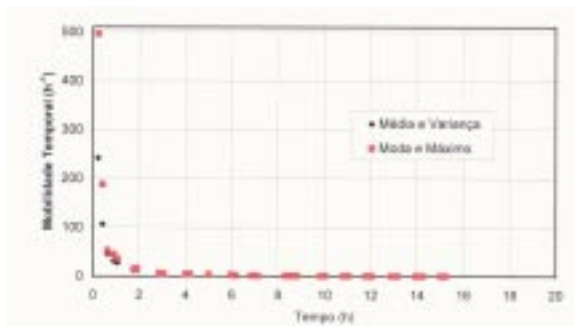


Figura 33.- Variación de la Función de Movilidad Temporal λ_1 con el tiempo (Monteiro y Wilson-Jr, 2002)

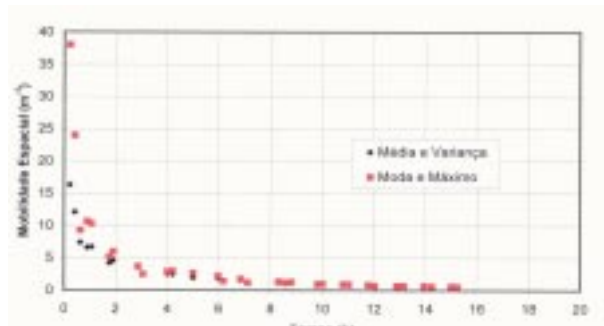


Figura 34.- Variación de la Función de Movilidad Espacial λ_2 con el tiempo (Monteiro y Wilson-Jr, 2002)

Wilson-Jr (1987) y Mendes (1995) mostraron que los Modelos Poissonianos Homogéneos describen bien el movimiento en suspensión de las partículas finas de sedimentos y de los contaminantes líquidos o fijos a los sedimentos, en escurrimientos con superficie libre. No obstante, los resultados de los experimentos realizados en laboratorio sobre el movimiento de los sedimentos por arrastre en escurrimientos con fondo móviles, en regimenes de dunas y rizas (Wilson-Jr, 1972; y Buckmann, 1996), exigieron modelos más complejos: **Poissonianos No Homogéneos y No Poissonianos**.

El fondo del Arroyo Horácio está compuesto de arena con $D_{50} = 0,310 \text{ mm}$ caracterizados por tener formas en el fondo del tipo **dunas y rizas**, como ilustrado en las **Figuras 21 y 22**. En esas circunstancias, el programa PAICON permite verificar la utilidad y el comportamiento de los Modelos Poissonianos Homogéneos. En las **Figuras 35 y 36** están presentados, a modo de ejemplo, los valores de las posiciones medias, de los máximos de concentración de los sedimentos marcados con trazadores radioactivos, y los valores experimentales de las varianzas de esas posiciones, en función del tiempo, relativos al primer experimento con Au^{198} . Otros resultados pueden ser vistos en Monteiro y Wilson-Jr, 2002.

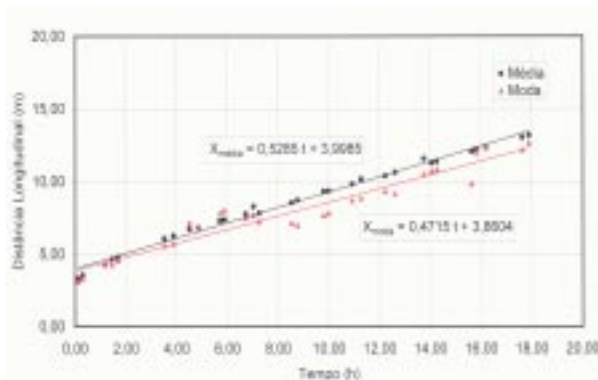


Figura 35.- Evolución de la Media y de la Moda durante el Primer Experimento con Au^{198} . (Monteiro y Wilson-Jr, 2002)

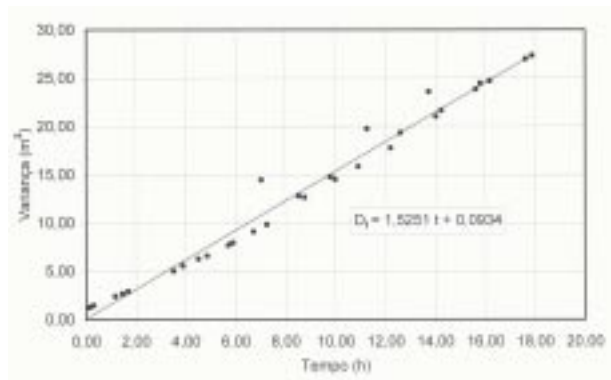


Figura 36.- Varianza de las Posiciones de las Partículas en Función del Tiempo. Primer Experimento con Au^{198} . (Monteiro y Wilson-Jr, 2002)

Para esta tercera forma de determinación de los valores de λ_1 y λ_2 , es conveniente destacar, que las evoluciones de la media, de la moda y de la varianza en función del tiempo son ajustadas por ecuaciones lineales, a través del método de los mínimos cuadrados. Los valores de λ_1 y λ_2 para el primer experimento, fueron obtenidos de la **Ecuación 38**, a seguir. A través de ecuaciones semejantes, fueron obtenidos los resultados para los tres experimentos, los

cuales están ilustrados en la **Tabla 5**. Eses valores caracterizan la movilidad media del grano, donde $V_{m\acute{e}dia}$ representa la velocidad media del transporte s\olido.

$$\begin{cases} V_{m\acute{e}dia} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 0,5285 \\ 2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2^2} = 1,5251 \end{cases} \quad (38)$$

En los Processos Poissonianos Homog\eneos (Wilson-Jr, 1987), $1/\lambda_1$ representa la duraci\on media del per\iodo en que la part\icula deja de desplazarse en el sentido del escurrimiento, y $1/\lambda_2$ representa la distancia media longitudinal recorrida durante un desplazamiento. Para el movimiento por arrastre, $1/\lambda_1$ corresponder\eda a la duraci\on media de un per\iodo de reposo. En la **Tabla 5** est\an presentados, tambi\en, los valores de la Velocidad de Desplazamiento del Pico de Concentraci\on de los Sedimentos, V_{moda} , obtenidos de las inclinaciones de las rectas de las evoluciones temporais de la moda.

Tabla 5 – Valores Medios de las Funciones de Movilidad del Grano (Monteiro y Wilson-Jr, 2002)

Experimentos	λ_1 (h ⁻¹)	λ_2 (m ⁻¹)	$V_{m\acute{e}dia}$ (m/h)	V_{moda} (m/h)
1 ^a Inyecci\on de Au ¹⁹⁸	1,1848	2,2418	0,5285	0,4715
2 ^a Inyecci\on de Au ¹⁹⁸	1,7930	2,3420	0,7656	0,6538
1 ^a Inyecci\on de Ir ¹⁹²	1,0181	1,6181	0,6292	0,7777

En la **Figura 37** est\an plotados los valores m\aximos de las funciones de densidad de probabilidad de la posici\on de las part\iculas en funci\on del tiempo, inici\andose as\, la **cuarta forma** de determinaci\on de λ_1 y λ_2 . De esta vez, las funciones λ_1 y λ_2 fueron estimadas consider\andose el comportamiento asint\otico de la moda (**Ecuaci\on 37**), la ecuaci\on lineal que describe la posici\on de la moda en funci\on del tiempo (**Figura 35**), los valores de la **Tabla 5** y de la concentraci\on m\axima. La curva de la **Figura 37** fue ajustada por el m\etodo de los m\inimos cuadrados, a trav\es del sistema de **Ecuaciones 39**.

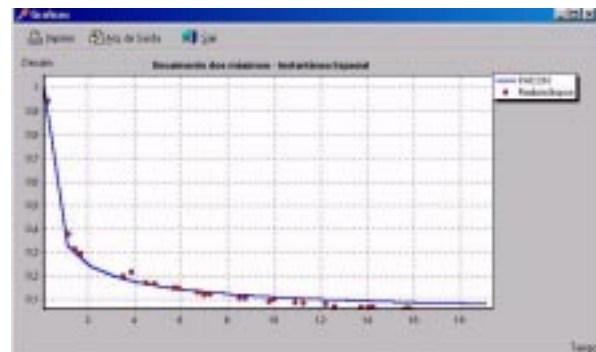


Figura 37.- Pico de la Concentraci\on en Funci\on del Tiempo. 1^o Experimento. $\lambda_1 = 0,342 \text{ h}^{-1}$ y $\lambda_2 = 0,726 \text{ m}^{-1}$. (Monteiro y Wilson-Jr, 2002)

$$\begin{cases} x_{Moda} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} t \\ \lambda_1 = 4 \pi V_{Moda}^2 \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n \frac{f_{tMaxi}}{\sqrt{t_i}} \right\}^2}{\left\{ \sum_{i=1}^n \frac{1}{t_i} \right\}^2} \end{cases} \quad (39)$$

Funciones de Densidad de Probabilidad Longitudinal de los Trazadores

Como ilustración, están representados en las **Figuras 38 y 39**, curvas correspondientes a los experimentos con Au^{198} , de las Funciones de Densidad de Probabilidad de las Posiciones de las Partículas para tiempos fijos, a lo largo del tramo del Arroyo Horácio, siendo ejemplificado el inicio del movimiento de los sedimentos del primer experimento ($t = 1,68$ h) y el movimiento después $t = 6,84$ h de la inyección, para el segundo experimento.

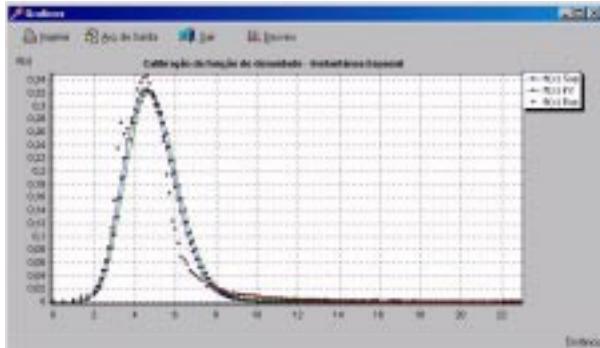


Figura 38.- Función de Densidad de Probabilidad.
1º Experimento Au^{198} . $\lambda_1 = 17,54 \text{ h}^{-1}$ y $\lambda_2 = 6,17 \text{ m}^{-1}$.
(Monteiro y Wilson-Jr, 2002)

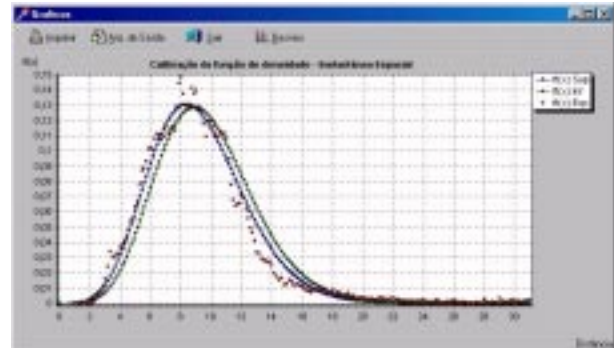


Figura 39.- Función de Densidad de Probabilidad.
2º Experimento Au^{198} . $\lambda_1 = 2,52 \text{ h}^{-1}$ y $\lambda_2 = 1,88 \text{ m}^{-1}$.
(Monteiro y Wilson-Jr, 2002)

Descarga sólida del material del fondo

La Descarga Sólida por Arrastre por unidad de ancho, q_b , del material del fondo fue calculada a través de la **Ecuación 40**:

$$q_b = (\gamma_s - \gamma) \cdot E \cdot V_{\text{média}} \cdot \int_0^l f_t(x) dx \quad (40)$$

donde **E** es el espesor medio de la capa móvil y la integral corresponde a la distribución longitudinal de las partículas a lo largo del tramo **l** del escurrimiento.

Los resultados obtenidos para la tercera forma de estimación son semejantes a los obtenidos con radioisótopos por Nery (2002), una vez que para ambos cálculos fueron utilizados valores de espesores de transporte medidos directamente en las muestras de los sedimentos de la capa móvil del fondo (**Tabla 1**). En la **Figura 40**, están presentados los valores de la Descarga Sólida Lineal del primer experimento, en función del tiempo transcurrido después de la inyección. Figuras semejantes fueron obtenidas para los otros experimentos.

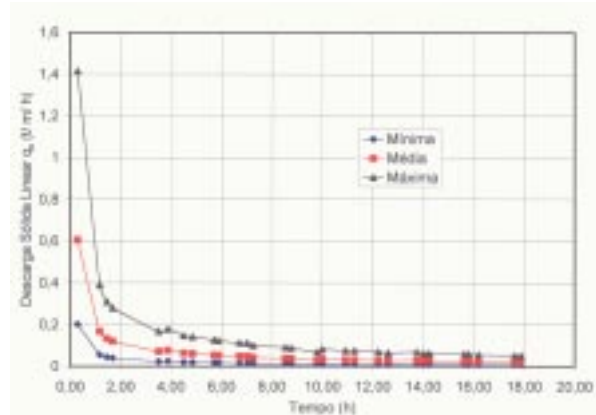


Figura 40.- Descargas Sólidas Lineales en Función del Tiempo. Primer Experimento con Au^{198} .
(Monteiro y Wilson-Jr, 2002)

CONSIDERACIONES SOBRE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO UTILIZADOS

En la **Tabla 6**, a seguir, están mostrados los principales valores de las variables hidráulicas y sedimentológicas medidas durante los ensayos con trazadores radioactivos.

Tabla 6.- Características Hidráulicas y Sedimentológicas Obtenidas Durante la

Campana de Mediciones Especiales (Nery, 2002)

Características Hidráulicas y Sedimentológicas	Unidades	10/11/1974		13/11/1974		18/11/1974	
		16:00	17:40	12:50	15:15	13:10	17:45
Radio Hidráulico	m	0,149	0,145	0,148	0,164	0,132	0,135
Velocidad Media	m/s	0,419	0,423	0,460	0,459	0,336	0,330
Caudal Líquido	m ³ /s	0,179	0,186	0,184	0,190	0,143	0,144
Peso Específico del Grano	N/m ³	26.193		26.193		26.193	
Peso Específico del Agua	N/m ³	9.810		9.810		9.810	
Diámetro: Sedimento del Fondo	m	0,000310		0,000304		0,000305	
Pendiente Máxima	m/m	0,000982		0,001495		0,001430	
Pendiente Media	m/m	0,000527		0,000773		0,000808	
Pendiente Mínima	m/m	0,000037		0,000235		0,000145	
Descarga Sólida Lineal Máxima	N/s/m	0,175		0,253		0,209	
Descarga Sólida Lineal Media	N/s/m	0,070		0,102		0,085	
Descarga Sólida Lineal Mínima	N/s/m	0,018		0,027		0,022	

Dedido a la precisión obtenida con el **Uso de Trazadores Radioactivos**, este método há sido usado por todo el mundo como padrón para la verificación de los modelos del movimiento por arrastre. No obstante, sus resultados son limitados según el tiempo de duración de la experiencia. Cuando es necesario extrapolar para un período mayor de tiempo, igual al del ciclo hidrológico, por ejemplo, es necesario que se conozcan las características hidrometeorológicas, hidráulicas y sedimentológicas, no sólo del período de las mediciones con trazadores, sino también del período de aplicación de los resultados obtenidos.

El **Método de Balance de las Tasas de Contage** permite también que sea determinado el Espesor Medio del Transporte **E** de la nube radioactiva (Wilson-Jr, Rodrigues y Santos, 1980), desde que toda la nube de radioisótopos sea detectada, o sea, desde que el balance sedimentológico, expresado por el valor de **N**, sea mantenido. Para el caso del Arroyo Horácio esto ocurre hasta que los primeros granos de sedimentos sobrepasen la extremidade aguas abajo del tramo de mediciones. A partir de ese momento, el valor de **N** disminuye y el cálculo del espesor tornase incorrecto. Por este motivo, en este trabajo, el Espesor del Transporte **E** fue determinado a través de los muestreos de los granos de sedimentos radioactivos distribuidos en profundidad, en la capa móvil del fondo. La comparación de los valores estimados por el **Modelo Analítico para el Cálculo de Descarga Sólida por Arrastre del Arroyo Horácio** con los medidos con trazadores radioactivos, están representados en la **Figura 41**, al lado. La diagonal de la figura representa la curva del perfecto ajuste entre los valores estimados y los medidos.

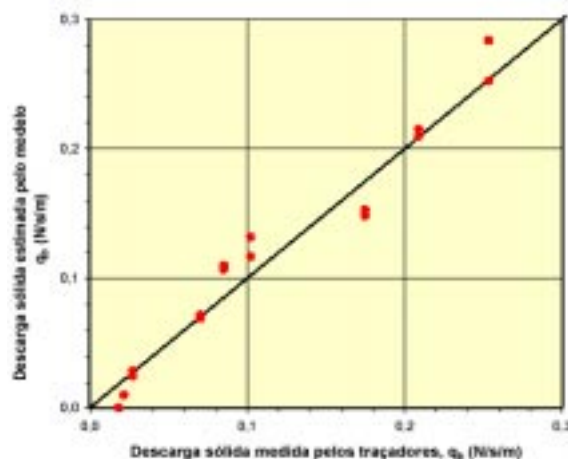


Figura 41.- Descargas Sólidas Lineales por Arrastre: Medidas y Estimadas. (Nery, 2002)

El punto más distante presenta una diferencia de 0,030 N/s/m, o sea una diferencia máxima de 29,41 % entre los valores de las descargas sólidas del modelo y del trazador. Por eso, el modelo fue considerado satisfactorio y adoptado como representativo del movimiento por arrastre del Arroyo Horácio, en el tramo **Barraco de Zinco**, para el ciclo hidrológico estudiado.

Para la aplicación de la **Ecuación de las Dunas y Rizas** es necesario conocer los valores de las variables: ρ , ρ_s , V_s , L , y E , siendo, este último valor calculado a partir de la amplitud media de la configuración del fondo. Básicamente, todos los valores de la **Ecuación 2** del Método del Balance de las Tasas de Contage pueden ser estimados a través de los registros topo-batimétricos longitudinales y temporales del tramo representativo del escurrimiento. Esto significa que el uso de esta ecuación sea cada vez más prometedora. Sin embargo, como en el Arroyo Horácio los registros de las dunas fueron hechos solamente en el eje principal del río, o sea, en el eje de los mayores valores de velocidad líquida, las velocidades de las dunas fueron bien superiores a los valores medios del desplazamiento de la nube radioactiva.

La **Teoría de los Procesos Aleatorios** se reafirma como un método analítico potente para la interpretación de los datos obtenidos con los trazadores, sea para el movimiento por arrastre así como para el movimiento en suspensión, tanto para los casos de inyección instantánea como en la continua. Utilizándose en la **Ecuación 42**, los valores de $f_t(x)$ normalizados, no hay necesidad de cubrir toda la nube radioactiva. O sea, una vez calibrado el modelo para el tramo de medidas, se obtendrán fácilmente los valores de la dispersión de los sedimentos y contaminantes, además de este tramo.

CONCLUSIONES

Los trazadores radioactivos son una técnica bastante eficiente para medir con precisión el comportamiento de los sedimentos y de contaminantes fijos a estos sedimentos, en escurrimientos naturales con superficie libre. No obstante, al contrario de lo que sucede en la Medicina, incluyendo la Odontología, en la Industria y en la Agricultura, entre otras ramas, los Institutos Nucleares brasileños no han promovido el uso de radioisótopos, por profesionales que no estén vinculados directamente a estos institutos.

Debido a esas dificultades y producto de la necesidad de un patrón de calibración y validación de los modelos y fórmulas para estimar el movimiento de los sedimentos, se procuró analizar los procesos sedimentológicos y morfológicos de los tramos representativos de estos escurrimientos. En estos tramos, los levantamientos topográficos y batimétricos sistemáticos y detallados pueden ofrecer las descripciones cualitativas y cuantitativas de los movimientos de los sedimentos, o sea, pueden se transformar en el patrón deseado.

Para el caso del Arroyo Horácio, con el registro batimétrico realizado en el eje principal del escurrimiento, fue posible modelar y aplicar los Modelos Poissonianos Homogéneos Unidimensionales, para describir el transporte y la dispersión longitudinal del sedimento, aguas abajo de una sección de referencia bien determinada: la sección de inmersión de los trazadores radioactivos.

Para los trabajos futuros, los levantamientos topográficos y batimétricos temporales y espaciales deberán ser realizados en varios segmentos longitudinales, para que sean distinguidas las fajas transversales del escurrimiento cubiertas por un mismo tipo de

configuración. Esto es debido a que en los escurrimientos naturales generalmente es fácil detectar la presencia de fondos planos, con movimiento sedimentar incipiente o despreciable, y de rizos a lo largo de las margens del río; al mismo tiempo, configuraciones de los tipos dunas, fondos ondulados o planos con movimiento sedimentar continuo, y antidunas, en la parte central de los escurrimientos.

La metodología presentada en este trabajo tiene como base los estudios analíticos y científicos, donde las mediciones especiales pueden, también ser realizadas por métodos clásicos topográficos y morfológicos. La Sedimentología, y, particularmente, el Estudio del Movimiento de los Sedimentos en flujos con superficie libre, es una ciencia bastante bien más exacta en relación al modo con que muchas veces há sido considerada. Sobre todo, no se debe esperar que esos fenómenos ejersan sus efectos nocivos, como se pasó en la Región del Noroeste del Estado del Paraná, para que, entonces, sean investigados y conocidos.

Agradecimientos. El autor expresa sus más sinceros agradecimientos al Centro de Desarrollo de Tecnología Nuclear de la Comisión Brasileña de Energía Nuclear (CDTN/CNEN), a los Programas de Ingeniería Civil y Océánica de la COPPE/UFRJ, y al Centro de Desarrollo e Investigaciones Tecnológicas del Brasil (CNPq), por los apoyos técnicos y financieros recibidos durante la realización y análisis de los datos de este trabajo. El autor agradece a los Ingenieros Cid da Silva Garcia Monteiro, Luis Evaristo Dias de Paiva, y Renata de Almada Nery, por sus participaciones especializadas para el análisis del Banco de Datos del Arroyo Horácio. El autor expresa un agradecimiento especial por la dedicación y eficiencia con que el Ingeniero René Sena García realizó la traducción de este artículo para el español. Sin la participación de esas organizaciones y personas, este trabajo no podría haber sido realizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Buckmann, M. F. Y. (1996), “Transporte Longitudinal de Sedimentos Finos por Arraste em Regime de Rugas”. Tesis de *Mestre em Ciências em Engenharia Civil*, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Einstein, H. A. (1950), “The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows”. Tech. Bulletin N° 1026, U. S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D. C., Septiembre.

Hanno, H. A. (1979). “Etude de la Dispersion Longitudinale des Sédiments de Fond”. Tesis de *Docteur ès Sciences Appliquées*. Universidad de Montréal, 161 p., Diciembre.

Mendes, M. F. A. (1995), “Modelos Poissonianos Homogêneos Unidimensionais Aplicados ao Transporte e à Dispersão de Poluentes e de Sedimentos Finos em Suspensão, nos Escoamentos com Superfície Livre”. Tesis de *Mestre em Ciências em Engenharia Civil*, COPPE/UFRJ, 173 p. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Monteiro, C. S. G. y Wilson-Jr, G. (2001), “PAICON 4.0: Um Software Descritivo do Movimento de Sedimentos e Poluentes, com Uso da Teoria dos Processos Aleatórios”, XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju, SE, Brasil.

Monteiro, C. S. G. y Wilson-Jr, G. (2002), “Cálculo da Descarga Sólida com Uso da Teoria dos Processos Aleatórios: Aplicação no Córrego Horácio”, V Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. CES/ABRH, pp. 295-312. São Paulo, SP, Brasil.

Nery, R. A. (2002), “Estimativa do Transporte e Dispersão de Sedimentos com Uso de Métodos Clássicos e Radioativos: Aplicação na Sub-bacia do Córrego Horácio/Noroeste do

Paraná”. Tesis de *Mestre em Ciências em Engenharia Civil*, COPPE/UFRJ, 214 p. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Shen, H. W. y Todorovic', P. (1971), “A General Stochastic Model for the Transport of Sediment Bed Material”. *Proceedings of International Symposium on Stochastic Hydraulics*, University of Pittsburgh, May 31-June 2.

Simons, D. E., Richardson, E. V. y Nordin, C. F. (1965), “Bed-Load Equation for Ripples and Dunes”, *Geological Survey Professional Paper 462. H*, United States Government Printing Office, Washington DC.

Todorovic', P., Vukmirovic'. V., Vukotic', R., y Filip, A. (1966), “A Contribution to the Kinetic Theory of Bed Material Discharge”. *Symposium on the Use of Isotopes in Hydrology*. IAEA, SM-83/19, p. 271-290, Vienna, Austria.

Todorovic', P. (1975), “A Stochastic Model of Dispersion of Sediment Particles Released from a Continuous Source”. Reprinted from *Water Resources Research*. Vol II, N° 6, Dec. USA.

Todorovic', P., Simons, D. B. y Li, R. M. (1976), “Deterministic and Stochastic Approaches for Modeling of Longitudinal Dispersion in a Turbulent Open Channel Flow”. *Stochastic Approaches to Water Resources*. Vol. II, Ed. H. W. Shen, p. 27.1-27.17. USA.

Vukmirovic', V., y Vukotic', R. (1981), “Bed-Load Transport on Small Rivers”. Relato 7p. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad de Belgrado. Yugoslavia.

Wilson-Jr., G. (1972), “Transporte e Dispersão de Areia em Canais de Laboratório”. Tesis de *Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares*. UFMG. Vol. 2, p. 335, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Wilson-Jr., G. (1987), “Etude du Transport et de la Dispersion des Sédiments en tant que Processus Aléatoires”. Tesis de *Docteur d'Etat ès Sciences Physiques*. 419 p., Universidad de Paris VI, Francia.

Wilson-Jr., G. (1999), “Estudo do Movimento Sedimentar em Escoamentos com Superfície Livre”. In: *XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. ABRH, 28/11 a 02/12, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Wilson-Jr., G. (2002), “Acervo de Dados Hidráulico-Sedimentológicos e Fotos dos Estudos Realizados na Bacia Hidrográfica do Rio Ivai”. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Wilson-Jr., G., Rodrigues, H. T., Santos, J. S. (1980), “Estudos Hidráulicos e Sedimentológicos Realizados no Trecho Inferior do Rio Ivai”. OEA: Projeto Hidrología. ARH/SVOP/PR. CBTN/NUCLEBRÁS. 179 p., F. A3, Belo Horizonte/MG, Brasil.

Wilson-Jr., G. y Paiva, L. E. D. (2003), “Estimativa da Descarga Sólida por Arraste a Partir do Registro das Configurações de Fundo: Aplicação ao Córrego Horácio, Noroeste do Estado do Paraná”, In: *XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. ABRH. 23 a 27/11, Curitiba/PR, Brasil.