



# Técnicas Nucleares Aplicadas a la Investigación en Ingeniería Ambiental

Ernesto Torres Quintero  
Ingeniero Civil, Magíster en Recursos Hidráulicos,  
Catedrático Investigador Universidad Libre

## Auxiliares de Investigación

**Sedimentos:** Rodrigo Osorio, Gustavo Marín y Javier Rodríguez

**Aguas Subterránea:** Carolina Gaitán y Alexander López

**Humedad y Densidad:** Jazmín Medina y Jamed González

## RESUMEN

Desde el año 2002, se han desarrollado actividades dentro del convenio vigente Universidad Libre - INGEOMINAS, utilizando Técnicas Nucleares Aplicadas a la Investigación en Ingeniería Ambiental los proyectos específicos de Sedimentos, Humedad – Densidad y Agua Subterránea.

## ABSTRACT

From the year 2002, activities have been developed inside the agreement effective University LIBRE - INGEOMINAS, using Technical Nuclear Applied of Investigation in Environmental Engineering the specific projects of Silts, Humidity - Density and Underground Water.

## INTRODUCCIÓN

El proyecto de Investigación se inició desde agosto de 2002 con la colaboración de la Decanatura de Ingeniería y el centro de Investigaciones de la Universidad Libre y se ha tenido el Apoyo de INGEOMINAS con el Subdirector Hernando Pérez y los ingenieros Luis Vásquez y Guillermo Ávila, es de anotar que este proyecto de Investigación pretende retomar, implementar y actualizar técnicas que no se han desarrollado en Colombia desde 1998 por la liquidación del Instituto de CIENCIAS Nucleares y Energías Alternativas INEA.

### 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En Colombia, las técnicas nucleares no se están utilizando como herramientas científicas en los avances técnicos en la Industria y la Ingeniería Ambiental.

### 2. HIPÓTESIS

El estudio de antecedentes en la aplicación de técnicas nucleares, la experiencia adquirida de docentes de la Universidad Libre, la capacitación a auxiliares de Investigación y la colaboración estrecha con INGEOMINAS permitirá aplicar las técnicas nucleares no se están utilizando como herramientas científicas en los avances técnicos en la Industria y la Ingeniería Ambiental.

### 3. METODOLOGÍA EMPLEADA EN SU DESARROLLO

#### | SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN

Para iniciar las medidas de sedimentos en suspensión, inicialmente se realizó una investigación en los laboratorios de INGEOMINAS para tratar de buscar los equipos y elementos necesarios para armar el equipo de suspensión, una vez armado se realiza la curva de calibración

del lugar, estudiando el tipo de fuente radiactiva a utilizar, el equipo de centelleo a utilizar, la distancia óptima entre fuente – detector y la forma de realizar la calibración una vez que se realice una investigación exhaustiva y se puedan realizar mediciones confiables se podrán realizar mediciones directas en los ríos y embalses en donde se introduce el equipo a la profundidad deseada y en pocos minutos se conoce la concentración de sedimentos en suspensión.

Este equipo reduce el tiempo en comparación con los métodos convencionales y la manipulación de muestras desde la toma hasta el laboratorio; otra ventaja es el bajo costo, una de las limitaciones es que no es sensible para medir concentraciones inferiores a 0.5 gramos/litro.

Concentraciones de sedimentos en suspensión se han determinado con esta tecnología en el río Cauca, embalse de Chivor, río Checua donde se instaló un equipo fijo, donde con determinado nivel del río prendía y registraba la concentración de sedimentos en suspensión en la crecida del río. Esta investigación es muy importante porque el río es intermitente, es decir en un porcentaje de tiempo el río no lleva caudal pero cuando llueve se presentan pequeñas avenidas que conllevan transporte de sedimentos, que con los métodos convencionales es muy difícil determinar.

#### | HUMEDAD

##### ◀ Curvas de calibrado:

Éstas se establecen determinando la razón de conteo nuclear de cada uno de varios materiales de densidades conocidas, trazando la razón de conteo contra densidad y ajustando una curva a través de los puntos resultantes. El método usado para establecer la curva, es el mismo que se usa para determinar la densidad *in situ*. La densidad de los materiales usados para establecer la curva (como por ejemplo bloques de granito, aluminio, magnesio, caliza, etc.), deben ser uniformes y variar dentro de un rango de densidades que incluya la del suelo a medir.

## AGUAS SUBTERRÁNEAS

La metodología utilizada se basó en la recolección de información en la aplicación de la tecnología de técnicas nucleares en aguas subterráneas. El avance de la aplicación de las técnicas nucleares en aguas subterráneas ha sido referente a la recolección de información, procesamiento de datos, revisión de equipos en INGEOMINAS y posibilidad de trabajos de investigación a presentar a Colciencias.

### DETERMINACIÓN DE SEDIMENTOS UTILIZANDO EQUIPOS CON FUENTES NUCLEARES

El presente capítulo presenta los principios para cuantificar los sedimentos de suspensión y de fondo empleando equipos con fuentes radiactivas, que por primera vez en Colombia fueron desarrollados en el año de 1990.

### TEORÍA

Los equipos se dividen en dos; para determinar los sedimentos en suspensión ver figura 1, que se basa en la atenuación de rayos x o gamma, en este equipo se coloca una fuente radiactiva generalmente Americio - 241 de 100 mCi, enfrentada a un detector de centelleo a una distancia apropiada. Este sistema de atenuación de rayos x o gamma, es similar a ubicar entre una fuente de luz y un detector de luz diferentes medios, la pasa sin barreras se puede detectar la mayor intensidad de luz, si se ubica obstáculos se detecta menor cantidad de luz de acuerdo con la cantidad de obstáculos entre la fuente de luz y el detector, en el caso de los

sedimentos, si pasa sólo agua limpia el detector podrá medir mayor cantidad de intensidad de radiactividad, en caso de tener sedimentos en suspensión en el agua, presentan obstáculos que no permiten leer toda la intensidad de la radiactividad.

El equipo de sedimentos de fondo que se observa en la figura 2 que consta de una fuente radioactiva Cesio-137 separada por un blindaje del detector de centelleo que no deja que la radiación incida directamente sobre el detector, la única manera que la radiación sea registrada, es por retrodispersión atravesando el medio en el que está sumergida la sonda.

Para ambos casos si tenemos agua, nos da un determinado contaje en el equipo registrador, pero si tenemos una mezcla de agua y sedimentos se disminuye las mediciones, antes de realizar las

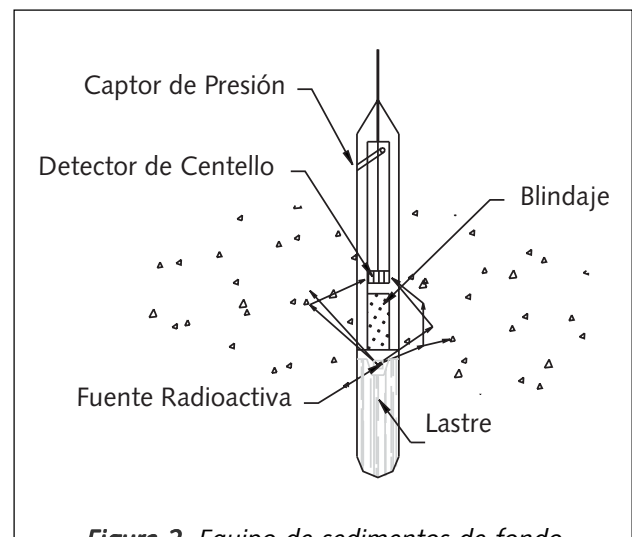


Figura 2. Equipo de sedimentos de fondo

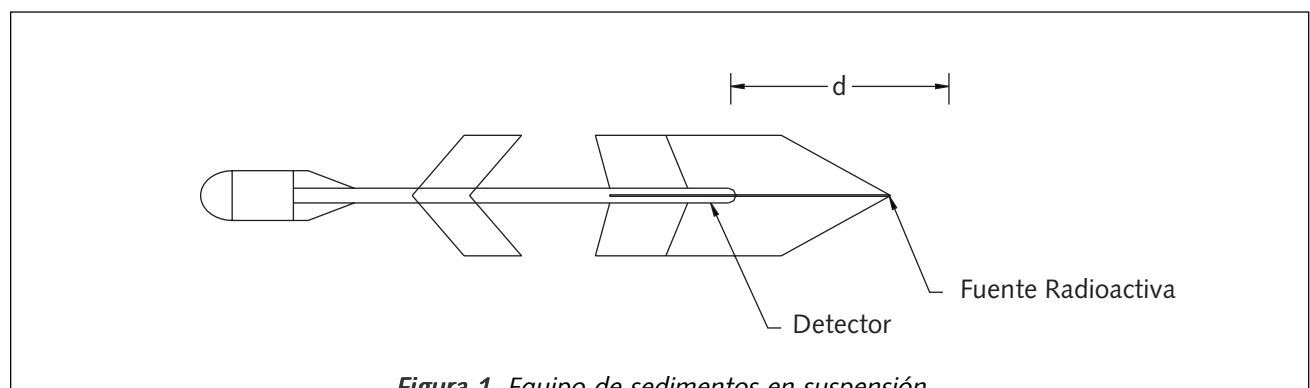


Figura 1. Equipo de sedimentos en suspensión

medidas sobre el río, embalse, lago o cualquier cuerpo de agua, se realiza una calibración que consiste en hacer medidas en agua, posteriormente se va añadiendo concentración de sedimentos de la región a estudiar hasta obtener una recta.

## MEDIDAS EN CAMPO

### Sedimentos de fondo

Estas medidas se realizan generalmente en puertos para determinar dónde y cuándo dragar, en los embalses para conocer con exactitud el volumen del embalse muerto.

El equipo una vez conocida la curva de calibración, se introduce en el sitio determinado, el cual nos registra un perfil de la concentración de sedimentos de fondo desde  $1.0 \text{ ton/m}^3$  hasta  $1.4 \text{ ton/m}^3$ , la ventaja de este método frente a la medida convencional (ecosonda), es que cuando registra el perfil de sedimento se ubica fácilmente la densidad de  $1.2 \text{ ton/m}^3$  que es la aceptada mundialmente para que los buques puedan navegar en los canales, puertos, etc.; mientras que con el método utilizado en Colombia sólo registra un determinado nivel de densidad de sedimentos ( $1.02 \text{ ton/m}^3$ ), lo que conduce a sobrecostos en el dragado al no tener una buena información para planear el dragado. Ver figura 3.

Esta tecnología se utiliza en Países con gran cantidad de puertos como Brasil y España.

Medidas de este tipo se han realizado en el Puerto de Buenaventura, es de anotar que estos equipos son operativos en sitios donde se encuentran sedimentos limo – arcillosos, con velocidad del agua menor a 2 mts/seg.

### Aguas subterráneas

Las técnicas que se pueden aplicar son los isótopos estables de agua y los trazadores radiactivos expresamente adicionados.

### Isotopos estables del agua

Los estudios hidrológicos relacionados con obtener conclusiones sobre origen y comportamiento del agua, los isótopos estables son una herramienta debido a que los procesos físicos y meteorológicos que producen el transporte del agua en el ciclo hidrológico, lo marcan isotópicamente.

Los isótopos estables del agua son por el Hidrógeno:

H-1 y H-2 (Deuterio) y por el oxígeno: O –16, O – 17 y O – 18, las unidades con la que se expresan tanto el H – 2 (Deuterio) como del O – 18 que son los isótopos estables del agua que más se emplean es en tanto por mil ( ‰ ), el valor de referencia más utilizado mundialmente es el SMOW ( Standard Mean Ocean Water), que fue preparado mezclando 19 muestras de deferentes océanos y que por definición tiene un valor de  $d = 0 \text{ ‰}$ .

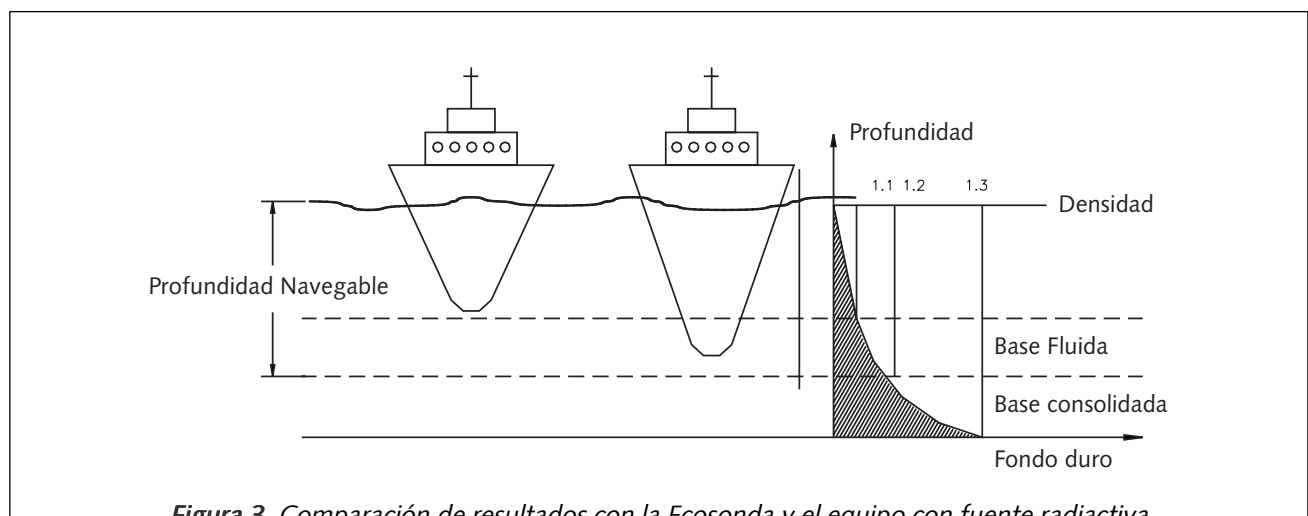


Figura 3. Comparación de resultados con la Ecosonda y el equipo con fuente radiactiva



Figura 4. Espectrómetro de masas

Tanto el Deuterio como el oxígeno -16 se determinan en el espectrómetro de masas. Ver figura 4.

### VARIACIÓN DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA A TRAVÉS DEL CICLO HIDROLÓGICO

La composición isotópica de cualquier muestra de agua depende de su movimiento, iniciada en el momento de salir del mar.

#### Nube

La nube formada por evaporación del mar es isotópicamente más ligera, debido al fraccionamiento producido en el cambio de estado.

#### Precipitación

En las precipitaciones se tiene en cuenta el efecto de continentalidad, es decir, las masas nubosas teniendo un mismo origen, las precipitaciones son más ligeras (más negativo) cuando mayor es la distancia al mar, los valores de oxígeno - 18 en el mar el valor aproximado es más alejado de 0% ejemplo, en el agua de precipitación varían entre (-8%o hasta -12%o).

Otro factor que afecta el contenido de Deuterio y oxígeno-18 es la altitud, en ciertas regiones se disminuye en un 3%o para Deuterio y 0.3%o para oxígeno 18 por cada 100 metros de altitud, es decir a mayor altitud el contenido Deuterio y oxígeno 18 son más negativos.

Esta variación se utiliza para determinar origen y recarga de las aguas subterráneas en diferentes proyectos. En Colombia se a utilizado los isótopos estables en diferentes proyectos.

Un ejemplo de la interacción entre las aguas de precipitación y las aguas subterráneas, se utilizó en la determinación del origen del agua subterránea, causa que contribuye al deslizamiento en la vereda de masa en la cuenca del río Blanco. Los resultados combinados de hidrogeoquímica e isótopos estables indican que parte del agua que produce deslizamientos es debido a las tuberías y drenajes ubicadas en la parte alta utilizados por los pobladores para abastecimiento de agua y riego. Esta circunstancia señaló que se debe hacer mantenimiento a estas tuberías y mangueras para controlar el flujo una de las causas del deslizamiento Blanco.

### RELACIÓN ENTRE EL DEUTERIO Y EL OXÍGENO - 18 EN LAS PRECIPITACIONES

En la mayor parte de las precipitaciones del globo obedecen a la ecuación general :

DEUTERIO = 8 d Oxígeno - 18 + 10. Ver figura 5.

Sin embargo en casos aislados pueden observarse valores fuera de estas rectas debido a fenómenos de evaporación. En la figura siguiente se muestra las líneas de precipitación y evaporación, y la curva de relación entre el d oxígeno 18, y el d deuterio para las estaciones de precipitación de la Sabana de Bogotá.

Esta curva se utiliza para análisis de las aguas subterráneas y superficiales, para conocer su procedencia y origen.

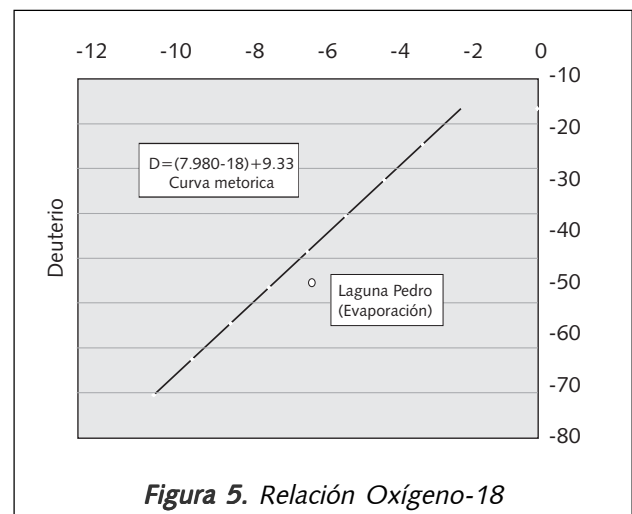


Figura 5. Relación Oxígeno-18 Deuterio Sabana de Bogotá

## Trazadores radiactivos

Dentro de los trazadores radiactivos que más utilizan son los naturales (Tritio y Carbono -14), y los expresamente adicionados para determinar velocidad, dirección, permeabilidad, transmisibilidad de estos los más utilizados son: Bromo- 82, Yodo - 131 y Oro- 198.

### El tritio

El tritio es el único isótopo radioactivo del hidrógeno de masa atómica 3 y que posee 2 neutrones y 1 protón en el núcleo, tiene un período de desintegración de 12.26 años y emite una energía de radiaciones beta de 0.018 Mev; su presencia en las precipitaciones se debe a las siguientes causas:

1. Reacciones termonucleares originadas por los rayos cósmicos con los gases de la atmósfera.
2. Explosiones termonucleares (bomba de hidrógeno) llevadas a cabo en 1952. Estas explosiones han liberado en la atmósfera cantidades de tritio que hicieron aumentar su concentración en la precipitación en aproximadamente 1000 veces en el hemisferio norte.

Después de algunas pruebas experimentales llevadas a cabo en la primavera de 1951 en la zona de pruebas de Estados Unidos, Islas Marshall, el 1 de noviembre de 1952 se realizó con éxito la primera prueba a gran escala de un dispositivo de fusión. Esta bomba llamada Mike, produjo una explosión de la potencia de varios millones de toneladas de TNT ( es decir, varios megatones). La Unión Soviética detonó una bomba termonuclear de más de un megatón en agosto de 1953, mucho antes de lo que se esperaba. El 1 de marzo de 1954, Estados Unidos hizo explotar una bomba de fusión de una potencia de 15 megatones. Provocó una bola de fuego de más de 4.8 kilómetros de diámetro y una enorme nube en forma de hongo, que se elevó con mucha rapidez hasta la estratósfera. (Microsoft Encarta 99)

La presencia de tritio en las precipitaciones tiene como consecuencia su contenido en todas las fases del ciclo hidrológico. Debido a los

pequeños valores de concentraciones producidos por el tritio cosmogónico (teoría de la formación del universo), las aguas precipitadas con anterioridad a 1952 tienen en la actualidad unas concentraciones tan bajas, que en la mayoría de los casos no son detectables. Por lo tanto, si en una muestra de agua se encuentra una concentración de tritio superior a 4UT (Unidades de tritio); puede determinarse que el agua es total o parcialmente posterior a 1952. Es decir, el tritio puede identificar aguas recientes datables con exactitud.

## DENSIDAD – HUMEDAD

Los resultados de la investigación tiene una aplicación concreta frente al tema “medición de densidad y humedad del suelo”, el cual ayudará a mejorar los sistemas y procedimientos aplicados a solucionar problemas que tengan relación con el medio ambiente.

La medición de la densidad del suelo, permitirá realizar un diagnóstico más rápido y acertado de los diferentes materiales que conforman el suelo y sus propiedades y por ende determinar se fertilidad y posibles usos más recomendados, por otra parte, la medición de la humedad, aunque íntimamente ligada con el parámetro anterior permite determinar características más específicas del suelo, como espacio poroso, drenaje natural, escorrentía, cantidad y el tipo de coloides que allí se presenten, y todas aquellas relacionadas con el manejo del suelo y su pedogénesis.

Finalmente, al desarrollar estas líneas de investigación se podrá contribuir a mejorar la situación actual del país en lo referente a la deficiencia en cuanto al conocimiento, información y accesibilidad a estas técnicas y a su aplicabilidad.

## 4. OBJETIVO GENERAL

Aplicar las técnicas isotópicas y nucleares en Proyectos de Ingeniería Ambiental iniciando en campos específicos como Determinación de Humedad y Densidad, Aguas Subterráneas, Sedimentos y Aguas Superficiales.

## 5. MARCO METODOLÓGICO

### | 5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es primordialmente cuantitativo porque:

- Se realiza medición, control y precisión.
- Se realiza énfasis en la prueba de hipótesis o confirmación de la teoría.
- Se realiza diseño previo de la investigación.
- Se realizan muestras representativas para producir generalizaciones.
- Se vale de la estadística para demostrar validez y confiabilidad, para procesar la información recolectada.

enfoque de la investigación es:

- Experimental
- Descriptiva
- Correlacional
- Investigación Prospectiva

Adicionalmente se presentan enfoque cualitativos como son:

- Estudio de casos
- Evaluativa
- Descriptiva

### | 5.2 RECOLECCIÓN DE DATOS:

Observación: Se utilizan equipos con técnicas nucleares para realizar las investigaciones. Se analizan todos los documentos existentes teniendo como fuente, registros de hechos o datos de diferentes tipos, institucionales, revistas, libros técnicos especializados, publicaciones científicas, etc.

## 6. ESTADO ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

Actualmente la Facultad de Ingeniería Ambiental, a través de un grupo de auxiliares de investigación, estudiantes de décimo semestre con la asesoría de profesionales y técnicos de INGEOMINAS hacen parte del nuevo esquema

para la investigación en la UNIVERSIDAD LIBRE, se están generando proyectos de investigación en técnicas nucleares aplicadas al medio ambiente.

Básicamente, con respecto al proyecto de la línea de investigación en sedimentos en suspensión, inicialmente se recopila y recolecta la información acerca de la técnicas nucleares aplicadas al medio ambiente, ya que actualmente en el país, ésta es muy escasa; como segundo punto, se realizará la calibración en laboratorio del equipo análogo – digital de tecnología nuclear (SILENA), que da una lectura cuantitativa de concentración de sedimentos detectados en cuerpo de agua (río, laguna, embalse), igualmente realizar estas mediciones en campo para poder comparar la eficiencia y la importancia de utilizar las técnicas nucleares en Colombia.

La aplicación de estas técnicas es muy variada en diferentes campos de la ciencia como medicina, química, microbiología, ingeniería, etc; pero en el ámbito del medio ambiente en el caso de sedimentos en suspensión se busca involucrar la variable ambiental, para el manejo integral de cuencas hidrográficas (ordenación), identificar, calificar y evaluar parámetros como la erosión e igualmente proponer medidas de prevención, corrección para los cuerpos de agua no tengan elevadas concentraciones de sedimentos en suspensión, este control puede estar dado por planes de manejo que incluyen programas de reforestación.

También tiene aplicación ambiental dependiendo del uso que tenga la fuente, como navegación, o para el abastecimiento y potabilización para el acueducto de determinada región, al determinar de forma cuantitativa la concentración de sedimentos en suspensión, se facilita la selección de la fuente y el dimensionamiento en el diseño de una planta de tratamiento.

En la línea de investigación de aguas subterráneas, las técnicas nucleares se aplican en

conjunto de las técnicas convencionales para determinar, origen, dirección, velocidad, dinámica, dispersión que son parámetros fundamentales para la explotación de las aguas subterráneas y herramientas fundamentales en la formulación técnica en los Planes de Ordenamiento Territoriales, actualmente se está identificando el estado actual de los equipos disponibles en el INGEOMINAS y se adelantan trabajos con técnicas convencionales como son la geoelectrica y las prueba de bombeo.

En la línea de Investigación de humedad y densidad, las técnicas nucleares se aplican para la determinación en el sitio la Humedad que sirve para planificar la cantidad de agua necesario para distritos de riego con el fin planificar de forma planificada la cantidad necesaria óptima para alcanzar mejores cultivos, una menor cantidad de agua no permitirá el crecimiento adecuado de las plantas y una mayor cantidad de agua desperdiciará el volumen de agua y de fertilizantes, actualmente se encuentra en calibración uno de los pocos equipos que existen en Colombia.

Cabe señalar que el país cuenta con un mínimo de personal técnico capacitado y el conocimiento de estas técnicas para su aplicación, éstas se convierten en una alternativa con respecto a las convencionales, para obtener de una manera más eficiente y a un menor costo, excelentes resultados para su aplicación e implementación, con un uso y manejo adecuado, y poder involucrar estas tecnologías hacia un desarrollo sostenible.

## CONCLUSIONES

### | SEDIMENTOS

- Con el trabajo realizado en la investigación se logró reactivar el equipo de sedimentos en suspensión con técnicas nucleares.
- Con las calibraciones realizadas se fue mejorando sustancialmente, disminuyendo poco a poco los fenómenos que afectaban a las primeras calibraciones, como era el fondo

producido por la Fuente Gamma, el sistema de agitación y la distancia fuente detector.

- Es necesario continuar el trabajo de investigación, con sedimentos propios de una cuenca hidrográfica seleccionada, realizando mejoras en la calibración y realizar medidas en campo.
- La redistribución de la geometría del equipo permitirá realizar calibraciones de Sedimentos de fondo.
- De los valores obtenidos en las calibraciones se puede deducir que existe un buen coeficiente de correlación entre las CPM y los sedimentos en suspensión en concentraciones que están entre 0.5 y 20 mg/litro.

### | AGUAS SUBTERRÁNEAS

- De acuerdo con el estudio realizado se puede observar la importancia de las técnicas nucleares en los estudios de aguas subterráneas.
- Con los equipos disponibles en INGEOMINAS, en el proyecto de investigación se ha recopilado antecedentes de aplicación de técnicas nucleares en los estudios de aguas subterráneas, y la aplicación de otras técnicas convencionales como son las pruebas de bombeo, y la geoelectrica en estudio integral de las aguas subterráneas.
- Es necesario incrementar el estudio y la aplicación en Colombia de los trazadores radiactivos utilizados en estudios anteriores como es la medida de velocidad del agua subterránea, la dirección y la determinación de parámetros como es la porosidad eficaz.
- Diseñar equipos y presupuestarlos para que sean adquiridos dentro de convenios entre la UNIVERSIDAD LIBRE, INGEOMINAS y la CAR.

### | HUMEDAD

- Se utilizó y verificó la operación del equipo utilizado en la investigación la sonda de neutrones, el cual consta de una fuente de Americio-berilio de 50mCi, y de un detector de  $^3\text{He}$ ; ambos, fuente y detector se encuentran



encapsulados con un doble recubrimiento de plomo y parafina; además, cuenta con un sistema electrónico el cual permite llevar un registro de las lecturas del equipo, la unidad de medida se denomina cuentas por segundo y el intervalo de lectura es de 30 segundos, el equipo consta también de un cable retenedor que permite desplazar la fuente a diferentes profundidades del suelo.

- El principio de funcionamiento del equipo se basa en la termalización de neutrones. En este proceso los neutrones de alta energía emitidos por una fuente son retardados hasta los niveles de energía térmica o temperatura ambiente, para que este proceso pueda llevarse a cabo los neutrones requieren de varias colisiones con los núcleos de los átomos presentes en el suelo; sin embargo, la concentración de neutrones termalizados depende principalmente de la naturaleza del átomo con el cual choque, existiendo 3 posibles consecuencias: dispersión del neutrón con bajas pérdidas de energía, dispersión del neutrón con altas pérdidas de energía o absorción del neutrón por los núcleos de los átomos.

Cuando los neutrones colisionan con los núcleos de los átomos cuya masa es mayor, la energía pérdida es menor por lo que el neutrón va a requerir un mayor número de colisiones para ser termalizado; por ejemplo, para el carbono, oxígeno y plomo se requieren 120, 150 y 2000 colisiones respectivamente.

Por otra parte, cuando la masa del núcleo es igual a la del neutrón, caso del hidrógeno, la pérdida de energía es mucho mayor, siendo necesarias solamente 20 colisiones para que sea termalizado. Teniendo en cuenta que la mayoría del hidrógeno presente en el suelo, forma parte del agua, la concentración de neutrones termalizados será proporcional al contenido volumétrico del agua del suelo.

- El proceso de calibración se realizó durante la perforación, es recomendable realizar una toma

de muestras, durante el registro de humedad con el equipo es importante tener en cuenta que los puntos de lectura sean los mismos puntos en los cuales han sido tomadas las muestras.

- El uso adecuado de la sonda de neutrones en un relleno sanitario, permitiría estimar parámetros como volumen y flujo de lixiviados a través de la celda de contención, esto basados en que existe una gran cantidad de materia orgánica presente en los lixiviados, su presencia en las celdas de contención se traduciría en un notable aumento en el registro de lecturas del equipo.
- De acuerdo con el principio básico de funcionamiento del equipo, que es la detección de variaciones de humedad a lo largo del perfil de suelo, el equipo permite obtener registros sobre el coeficiente de almacenamiento de un acuífero; además de realizar investigaciones acerca del balance hídrico proporcionando información de infiltración y evaporación del agua, siendo un excelente complemento de los métodos convencionales.
- Su aplicación básica en agricultura en la cual un seguimiento riguroso a la cantidad de agua aplicada a un cultivo, ya que si se excede en volumen de riego, el suelo puede lavarse, filtrando fertilizantes y plaguicidas, siendo ésta una de las principales causas de contaminación del suelo por origen agrícola.

## BIBLIOGRAFÍA

- BROWN, R. II., A. A. Konoplyantsev, J. Ineson, Y. S. CASTANY, G. *Traitépratique Des Eaux Souterraines*. Dunod. Paris. 1967.
- \_\_\_\_\_ *Tratado práctico de las Aguas Subterráneas*. Barcelona. Ed. Omega. 1971.
- CENTRO de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Cedex). *Curso Sobre: Hidrología Isotópica*. España. Universidad Autónoma de Madrid. 1995.
- CUSTODIO, Emilio. *Hidrología Subterránea*.
- DE PONCE De León, Catherine L. *Aguas Subterráneas: Aplicación del modelo de simulación GRWF – SALT*.

ESCUELA de Ingenieros Militares. Aguas Subterráneas y Perforación de Pozos.

FORBES, C. F. Theory and Appraisal of Hydraulic Conditions In Wells". Proceed Ings. of ground-water Symposium. August 1969. Report No. 113, Water Research Laboratory of the University of New South Wales, Pp. 28-49, Australia, April 1970.

HERNÁNDEZ VALDÉS, A. "Efectos de la penetración parcial en los pozos con 1 Régimen no lineal". Ingeniería Hidráulica. Vol. V, No. 2, Pp. 216-228. 1984.

HUYAKORN, P. S. "Finite Element Solution of Two-regime Flow Towards: Wells". Australia. Report 137. Water Research Laboratory. The University of New South Waler. December. 1973.

HUYAKORN, P. S. and Colin R. Dudgeon: "Investigation of two Regime Well Flow". Proceedings Asce. Journal of the Hydraulics Division. Vol. 102. No. Hy9, Pp. 1 149-1 165. September 1976.

IGLESIAS López, A. Métodos Numéricos aplicados al diseño, equipado y desarrollo de pozos. Tesis Universidad Politécnica de Madrid. Noviembre de 1989.

JACOB, C. E. "Drawdown Test to Determine Effective Radius Of 16. 16. Artesian Web, Trans. Am. Soc. Of. Civil Engineers, Vol. 112. Pp. 1 047-1 070, 1974.

\_\_\_\_\_ "Drawdown test to determine effective radius of Artesian Well". Transaction S Asce. Vol. 112, Pp. 1 047-1 070, 1947.

KOVALEVSKY: Ground. Water Studies. París. The Unesco Press. 1975.

KRUSEMAN, G. P. And N. A. de Ridder "Analysis and evaluation of pumping test data". International Institute Of Land Reclamation and Lmprovement, Bulle Un 11, Wageningen, the Netherlands, 1970.

\_\_\_\_\_ "Analysis and Evaluation of Pumping Test Data". Bulletin 11. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen. The Netherlands. 1970.

LENNOX, Donald II. "Analysis And Application of Step Drawdown Test". Proceedings Asce. Journal of The Hydraulics Division. Vol. 92, No. Hy6. Pp. 25-48. November 1966.

MOGG, Joe L: Hidráulica de Pozos. Traducción del Inglés por Osvaldo De Sola. La Habana. Editorial Centsco. Septiembre 1971.

\_\_\_\_\_ Hidráulica de pozos (Traducido del inglés). Grupo Hidráulico Dap. La Habana. 1971.

PÉREZ FRANCO, D. Theoretical and practical! Investi-gation into the Nordinear Seepage Law, Budapest, 1977.

\_\_\_\_\_ "Flujo no lineal permanente e impermanente hacia un pozo en un acuífero confinado". Ciudad de La Habana. Ciencias Técnicas. Ser de Ingeniería Hidráulica. No. 2, Pp. 115-135. Febrero de 1978.

\_\_\_\_\_ "Pruebas de pozo con abatimiento Escalonado en régimen no lineal impermanente". Ciudad de La Habana. Ciencias Técnicas. Ser de Ingeniería Hidráulica. No. 5, 5-17. Agosto. 1979.

\_\_\_\_\_ "Un Segundo Método para calcular las propiedades de un acuífero por prueba de pozo con flujo no lineal". Ciudad de La Habana. Voluntad Hidráulica. Nos. 52/53. 1980.

\_\_\_\_\_ "La Utilización de los gráficos de tiempo-abatimiento y distancia-abatimiento en flujo no lineal". Ciudad de La Habana. Ingeniería Hidráulica. 2 (3). 1981.

\_\_\_\_\_ Hidráulica Subterránea. Ciudad de La Habana. Ed. Científico-técnica. 1982.

\_\_\_\_\_ "Las pruebas de bombeo, su ejecución e interpretación". Ciudad de La Habana. Ingeniería Hidráulica. IV (1): 65-83. 1983.

\_\_\_\_\_ "Un Procedimiento aproximado para la determinación de las propiedades hidrogeológicas de un acuífero a través de una prueba de bombeo con datos de un solo punto". Ciudad de La Habana. Lngeniería Hidráulica XII (2): 3-6. 1991.

\_\_\_\_\_ "El Abatimiento en un pozo de extracción y sus elementos componentes". Santiago, Chile. Memorias XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 1994.

\_\_\_\_\_ "Análisis del Flujo hacia un Pozo en Régimen Permanente Turbulento y su Aplicación a los Acuíferos Cubanos". Tecnología; Ser. 10. Ingeniería Hidráulica. No. 2. Cict. Universidad de La Habana. Julio de 1969.

\_\_\_\_\_ "Ocurrencia del Régimen Turbulento en la Captación del Agua Subterránea". México. Memorias IV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. T. II, Pp. 63-71. 1970.

\_\_\_\_\_ "Flujo del Agua Subterránea hacia un Pozo en régimen Permanente no Lineal". Tecnología, Ser. 10, Ingeniería Hidráulica. No. 19. Cict. Universidad de La Habana. Febrero de 1979.

\_\_\_\_\_ Theoretical and Practical Investigation into the Nonlinear Seepage Law. Hungarian Academy Of Sciences. Budapest. 1977.

\_\_\_\_\_ "Flujo no lineal permanente e Impermanente hacia un Pozo en un acuífero confinado". Ciudad de La Habana. Ciencias Técnicas, Ser. De Ingeniería Hidráulica. No. 2, Pp. 115-135. Ispjae. Febrero 1978.

\_\_\_\_\_ "A New Parameter for Nonlinear Flow in Porous Media". Poland. Journal of Hydrological Sciences. Vol. 5, No. 2. Pp. 127-131. 1978.

\_\_\_\_\_ "Pruebas de Pozo con Abatimiento Escalonado en Régimen no lineal Impermanente", Ciencias Técnicas, Ser de Ingeniería Hidráulica, No. 3, Pp. 5-17, Ispjae, Ciudad de La Habana, Agosto de 1980.

\_\_\_\_\_ "Un Segundo Método para el cálculo de las propiedades de un acuífero por prueba de pozo con flujo no lineal". Voluntad Hidráulica. Nos. 52-53, Pp. 46-52,

\_\_\_\_\_ "Influencia del diámetro del pozo sobre el caudal y el abatimiento". Mérida, Venezuela. Memorias IX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, T. 1, Pp. 323-330. Julio de 1980.

\_\_\_\_\_ "Identificación práctica del régimen de flujo existente alrededor de un pozo de bombeo". Ingeniería Hidráulica. Vol. 2, No. 1, Pp. 5-16. 1981.

\_\_\_\_\_ "Consideraciones sobre la extensión del radio de influencia de un pozo". Ingeniería Hidráulica. Vol. 2, No. 2, Pp. 138-147. 1981.

PLATA, Antonio. Isotopos en Hidrología. Sección II. Control y Aprovechamiento de las Aguas. Editorial Alhambra. 1972.

PLATA, Antonio y BAONZA, Enrique. Técnicas Nucleares en Hidrología e Hidrogeología, Curso de Hidrología Aplicada. 1983.

RORABAUGH, M. L "Graphical and Theoretical Analysis of step Drawdown Test of Artesian Well", Asce Proceedings, No. 362. 1953.

SCIINEEBELI, G. Hydraulique Souterraine. Eyrolles. París. 1966.

SEN, Zekái "Type Curves For Two-regime Well Flow". Journal Of Hydraulic Engineering. Vol. 114, No. 12, Pp. 1461-1484. December 1986

STALIMAN, R. W.: "Aquifer-test Design, Observation And Data Analysis". In Techniques of Water-resources Investigations of The Us Geological Survey, Book 3, Applications of Hydraulics, Chapter 31, us Government Printing office, Washington. 1971.

THEIS, C. V. "The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of Discharge of a Well using Ground Water Storage". Trans. Am. Geophysical. Union, Vol. 16, Pp. 519-524. 1935.

TORRES Q, Ernesto. Conceptos de Hidrología Isotópica y Aplicaciones en Ingeniería. 1983.

\_\_\_\_\_ La Importancia del Tritio en Hidrología, En: Revista Colombia Hídrica. 1992.

TORRES, Ernesto; Obando, Edgar et al. Logros en Hidrología Isotópica. Ministerio de Minas y Energía. Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas (Inea). Bogotá D.C., Colombia. 1997.

WAL W. C. Groundwater Resources Evaluation, McGraw-Hill, New York. 1970.