

# Aplicaciones de neutrones cósmicos de bajas energía para agricultura de precisión

Los rayos cósmicos son partículas provenientes del espacio exterior, con energías que abarcan desde 109 eV hasta aproximadamente 1020 eV, que al interactuar con las moléculas del aire, generan cascadas de diversas partículas, incluyendo los neutrones. En los últimos años se ha investigado el uso de los neutrones cósmicos para medir la humedad del suelo [1]. Para calibrar las mediciones y garantizar resultados confiables es fundamental conocer el flujo incidente. Por esta razón, es imprescindible estudiar los factores que afectan el flujo de neutrones, como la altitud y la latitud, así como también estudiar el comportamiento del flujo luego de su interacción con diferentes porcentajes de humedad en el suelo.

Para estudiar los efectos del cambio de altitud en el flujo de neutrones cósmicos implementamos simulaciones en URANOS (Ultra Rapid Adaptable Neutron-Only Simulator), un simulador de propagación e interacción de neutrones con el suelo [2]. Simulamos el espectro de neutrones para dos altitudes diferentes (0 m s.n.m y 3000 m s.n.m) y no se observaron cambios significativos en el flujo de neutrones. Por lo que extendimos el estudio implementando otros simuladores de partículas como CORSIKA y Geant4.

CORSIKA es un software utilizado para simular cascadas de partículas, pero no incluye las interacciones de neutrones con energías menores a 300 MeV. En consecuencia, complementamos el análisis con Geant4, que permite simular interacciones en un rango de energías más amplio. En Geant4, modelamos la atmósfera terrestre como un paralelepípedo de 600 m de ancho, 600 m de profundidad y 2000 m de altura. Utilizamos un modelo atmosférico basado en el gas ideal para representar las variaciones en la densidad del aire debido a los cambios de altitud. Además simulamos el suelo con diferentes porcentajes de agua, desde el 0% hasta 30%. En CORSIKA, los rayos cósmicos se propagaron desde el tope de la atmósfera hasta 2000 m sobre la superficie de las ciudades de Buenos Aires, Bucaramanga y Berlín (Colombia). De esta manera, para cada ciudad, se registraron el número de neutrones previo y posterior a la interacción con el suelo.

Los espectros de neutrones, previos a interactuar con el suelo, mostraron una relación significativa entre el número de neutrones que alcanzaron la superficie y la altitud. Obtuvimos que el flujo de neutrones en Bucaramanga (956 m s.n.m.) es 2.2 veces mayor que en Buenos Aires (10 m s.n.m.), mientras que en Berlín (3450 m s.n.m.) es 4.8 veces mayor que en Buenos Aires. Por otra parte, observamos una disminución del 39,8% en el flujo de neutrones en suelos con 30% de humedad en comparación con suelos secos. Además, se encontró que los neutrones con energías menores a 1 MeV generan 66% más neutrones secundarios, por lo tanto, se determinó que la energía mínima con la que emergen es del orden de los meV.

[1] Zreda, M., D. Desilets, T. Ferré, and R. Scott (2008). Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. *Geophys. Res. Lett.* 35, L21402. doi:10.1029/2008GL035655.

[2] Köhli, M., M. Schrön, S. Zacharias, and U. Schmidt (2023). URANOS v1.0 –the Ultra Rapid Adaptable Neutron-Only Simulation for Environmental Research. *Geosci. Model Dev.* 16, 449–477.

## Nivel de formación

Maestría

**Autores primarios:** DOMINGUEZ BALLESTEROS, Yessica (Universidad Industrial de Santander); MIRANDA LEURO, Luigui Joel (Unicersidad Industrial de Santander)

**Coautores:** VÁSQUEZ RAMÍREZ, Adriana (Universidad Industrial de Santander); SARMIENTO CANO, Christian (Universidad Industrial de Santander); Dr. PIÑERES RICO, Luis Felipe (Universidad Industrial de Santander); Dr. ASOREY, Hernan Gonzalo (Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)); NUNEZ, Luis (Universidad Industrial de Santander)

**Presentadores:** DOMINGUEZ BALLESTEROS, Yessica (Universidad Industrial de Santander); MIRANDA LEURO, Luigui Joel (Unicersidad Industrial de Santander)