

JUSTIFICACIÓN TÉCNICA-CIENTÍFICA Y PERICIAL DE LOS INSTRUMENTOS PARA EL PROYECTO DE TIERRAS RARAS

ADQUISICIÓN DE SISTEMA INTEGRADO DE ESPECTRÓMETRO DE MASA/MASA (ICP-MS/MS) CON INSTRUMENTO DE ABLACIÓN LÁSER DE MUESTRAS SÓLIDAS Y MINERALÓGICAS (LA) – AUTODILUTOR/AUTOMUESTREADOR/AUTOCALIBRADOR DE MUESTRAS LÍQUIDAS – HORNO DE FUNDICIÓN DE PERLAS – CALENTADOR TIPO HOT PLATE MODULAR - SISTEMA DE DIGESTIÓN ÁCIDA POR MICROONDAS

04 de agosto de 2026

1. Antecedentes y contexto institucional

La República Dominicana ha iniciado un proyecto de Estado de alto interés nacional orientado a la identificación, análisis, caracterización y eventual aprovechamiento estratégico de minerales portadores de tierras raras, liderado por el Ministerio de Energía y Minas, la Empresa Minera Dominicana, y con el Laboratorio Científico de la Dirección General de Aduanas (DGA) como pilar técnico-científico y analítico del proyecto.

En este esquema institucional, el Laboratorio Científico de Aduanas no actúa como un ente auxiliar, sino como el núcleo científico responsable de generar datos analíticos confiables, trazables y defendibles, sobre los cuales se sustentan decisiones estratégicas de carácter geológico, económico, industrial, fiscal y de soberanía de recursos. La validez del proyecto depende directamente de la capacidad real del laboratorio para caracterizar con precisión las matrices mineralógicas complejas que contienen tierras raras, bajo estándares internacionales de calidad.

El Laboratorio Científico de Aduanas desarrolla actividades de análisis científico avanzado, investigación aplicada y proyectos analíticos de alta complejidad, incluyendo la determinación de metales y elementos de tierras raras en matrices complejas. Estas actividades se realizarán bajo métodos de ensayo acreditados conforme a la norma ISO/IEC 17025, lo cual exige control metrológico estricto, trazabilidad, validación completa de los sistemas de medición y confiabilidad absoluta de los resultados.

Para fortalecer las capacidades analíticas estratégicas, el laboratorio requiere la adquisición de un sistema de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente en configuración MS/MS, acoplado física y funcionalmente a un sistema de ablación láser para análisis directo de sólidos, Autodilutor/Automuestreador/Autocalibrador de Muestras Líquidas, Horno de Fundición de Perlas – Calentador tipo Hot Plate Modular y un Sistema de Digestión por microondas para control dinámico de matrices y rangos de concentración.

El Laboratorio Científico de Aduanas no actúa únicamente como un laboratorio de apoyo, sino como el centro de referencia analítica del Estado para este proyecto. Los resultados emitidos por el laboratorio:

- Definen la caracterización real de los recursos minerales.
- Sustentan estudios de viabilidad técnica y económica.
- Respaldan decisiones de política pública.
- Deben ser defendibles ante auditorías nacionales e internacionales.

Sin la instrumentación solicitada, el laboratorio no podría cumplir con este mandato, comprometiendo la capacidad del Estado de avanzar de manera autónoma y técnicamente sólida en el proyecto de tierras raras.

2. Naturaleza del sistema requerido: un sistema único e integrado

Desde el punto de vista técnico, científico y operativo, el sistema requerido no constituye la simple suma de equipos independientes, sino un sistema analítico integrado, conformado por:

- Instrumento de Ablación Laser de muestras sólidas y mineralógicas y caracterización elemental de perlas fundidas de minerales con escáner de QR y carrusel con 20 posiciones numeradas rotativas.
- Espectrómetro de masa-masa multicuadrupolo Q0-Q3 acoplado a plasma inductivo (ICP MS/MS) con celda de reacción dinámica (DRC) basada en cuadrupolo con sintonización por banda de paso (bandpass tuning), que contenga deflector de iones.
- Horno para fundición de seis muestras minerales simultáneas por ciclo para producir perlas fundidas homogéneas con crisoles tipo flat bottom de 95%Pt-5%Au, de 30 g, y moldes de 30/32 mm para análisis por AA, ICP, ICPMS y XRF con temperatura de operación constante hasta 1200 °C.
- Autodilutor/Autocalibrador/Automuestreador de muestras líquidas sin diluir hasta factores superiores a 1000x para análisis Fast por ICP-MS/MS con sensores de flujo y estación de autolavado.
- Sistema de Digestión por microondas de 32 posiciones con viales de 85 mL autoventeados para preparar muestras mineralógicas por ICP-MS/MS.
- Calentador FluroPlate Modular de tamaño (30x40x13) cm con regulador non-programable y temporizador con racks para viales de 15 y 50 mL.

Este conjunto opera como una sola plataforma analítica, con interdependencia funcional, mecánica, electrónica y de software, por lo que no es técnicamente viable, ni científicamente responsable, tratar cada componente como una adquisición aislada o como responsabilidad de suplidores distintos.

El correcto funcionamiento del sistema exige:

- Compatibilidad total de interfaces mecánicas (acoplamientos, interfaces ópticas, líneas de gas y vacío).
- Compatibilidad electrónica y de señales.
- Comunicación directa y nativa entre módulos, sin adaptaciones externas improvisadas.

- Control centralizado por software integrado.

Cuando los módulos provienen de distintos suplidores con contratos independientes, no existe garantía real de compatibilidad completa, lo que introduce riesgos técnicos que comprometen la estabilidad del sistema, la reproducibilidad analítica y la validación ISO/IEC 17025.

3. Validación analítica y cumplimiento ISO/IEC 17025

Bajo ISO/IEC 17025 el laboratorio debe validar el sistema como un todo, no por componentes aislados. Debe existir una única responsabilidad técnica claramente identificable. La trazabilidad, exactitud, precisión e incertidumbre deben evaluarse en el sistema integrado. Si estos equipos son suministrados por oferentes distintos: ninguno asume la validación total del sistema., y si se diluye la responsabilidad técnica, se dificulta o imposibilita la defensa técnica ante auditorías o evaluaciones externas.

Los sistemas modernos de análisis de metales y tierras raras requieren: sincronización en tiempo real entre introducción de muestra, ablación y adquisición de datos, autodilución reactiva basada en calidad (QC), control automatizado de rangos, interferencias y matrices, trazabilidad electrónica completa de datos. Esto solo es viable cuando los módulos están diseñados para operar como un solo sistema y coadyuvante imprescindible, y el proveedor asume responsabilidad total del flujo de trabajo analítico.

4. Justificación operativa y de mantenimiento

Cuando un sistema acoplado depende de múltiples proveedores independientes cada proveedor puede atribuir fallas a otro módulo, los tiempos de respuesta se duplican o triplican, se incrementa el riesgo de interrupciones prolongadas del servicio, y el laboratorio pierde capacidad operativa crítica. Por tanto, un proveedor único del sistema completo elimina estas situaciones, ya que existe una sola línea de soporte técnico, un solo proveedor asume responsabilidad integral, se garantizan mantenimientos preventivos y correctivos coordinados.

Para un laboratorio estratégico no es aceptable depender de varias cadenas logísticas distintas, además de que la obsolescencia o discontinuación de un módulo afecta a todo el sistema. Un proveedor único garantiza compatibilidad futura, coordina actualizaciones de hardware y software, asegura la continuidad operativa del sistema durante su vida útil.

5. Justificación científica

En investigación científica avanzada y análisis de tierras raras la confiabilidad de los datos depende directamente de la calidad del sistema, la reproducibilidad entre campañas analíticas es crítica y los errores de acoplamiento o sincronización invalidan interpretaciones científicas. Por ello, la selección del sistema debe priorizar la excelencia

tecnológica, no la fragmentación contractual. La ciencia de alto nivel no admite soluciones parcialmente compatibles ni responsabilidades técnicas difusas.

6. Justificación Técnica-Pericial por exclusividad

La caracterización geoquímica, mineralógica y metalúrgica de los depósitos de tierras raras de la República Dominicana constituye uno de los desafíos analíticos más complejos que puede enfrentar un laboratorio científico especializado. Las matrices minerales presentes en los yacimientos dominicanos no están compuestas únicamente por elementos de tierras raras, sino que contienen elevadas concentraciones de hierro, aluminio, titanio, calcio, magnesio, manganeso, fósforo, silicio y otros elementos mayoritarios, asociados además a procesos intensos de lateritización y enriquecimiento de minerales derivados de rocas bauxíticas. La presencia simultánea de estos componentes genera una enorme cantidad de especies poliatómicas, óxidos metálicos, hidróxidos, especies doblemente cargadas y otros interferentes espectrales que dificultan significativamente la determinación exacta y precisa de los elementos de tierras raras presentes a niveles de traza y ultratrazas.

Estas condiciones mineralógicas son particularmente relevantes en el contexto dominicano, donde muchas de las matrices objeto de estudio presentan importantes contenidos de bauxita, óxidos de hierro y minerales aluminosilicatos. Tales características incrementan considerablemente la complejidad analítica debido a la formación de especies interferentes derivadas de aluminio, hierro, titanio, calcio y tierras alcalinas, las cuales afectan directamente la medición de diversos isótopos pertenecientes al grupo de las tierras raras y elementos asociados. Como consecuencia, la selección de la tecnología analítica principal no puede fundamentarse en criterios comerciales, presupuestarios o de preferencia institucional, sino exclusivamente en la capacidad demostrada del sistema para eliminar interferencias complejas y producir resultados técnicamente válidos, reproducibles y metrológicamente defendibles.

Luego del análisis técnico realizado sobre las tecnologías ICP-MS/MS disponibles en el mercado internacional, se determinó que el único sistema que incorpora una arquitectura multicuadrupolar verdadera compuesta por cuatro etapas independientes de discriminación iónica identificadas funcionalmente como Q0-Q1-Q2-Q3 corresponde al sistema **NexION™ 5000 ICP-MS/MS**. Esta arquitectura constituye una capacidad tecnológica exclusiva y diferenciadora que no se encuentra disponible en otras plataformas ICP-MS/MS convencionales, las cuales utilizan configuraciones tradicionales de triple cuadrupolo.

Desde el punto de vista científico, la existencia del cuadrupolo **Q0** constituye una diferencia técnica fundamental para el cumplimiento de los objetivos del proyecto. El Q0 realiza una etapa de filtrado y discriminación previa antes de que los iones alcancen la primera etapa de selección de masas (Q1). Esta función permite reducir de forma anticipada la presencia de especies neutras, fotones residuales procedentes del plasma, partículas energéticas y otros componentes indeseados que normalmente ingresan al sistema de reacción en arquitecturas convencionales. Como resultado, se disminuye significativamente la carga química que recibe la celda de reacción, mejorando la eficiencia de las reacciones de eliminación de interferencias y reduciendo la generación de productos secundarios no deseados.

La importancia de esta capacidad se incrementa considerablemente cuando se trabaja con matrices minerales complejas como las presentes en los depósitos de tierras raras dominicanos. En estas condiciones, las altas concentraciones de hierro, aluminio, calcio, titanio y fósforo favorecen la

formación de especies poliatómicas y óxidos que pueden interferir directamente con las masas de interés analítico. La posibilidad de disponer de una etapa adicional de discriminación antes de la celda de reacción permite reducir la presencia de estos interferentes desde las primeras etapas del proceso analítico, mejorando la relación señal-ruido, incrementando la sensibilidad efectiva y fortaleciendo la selectividad de las determinaciones.

De igual manera, el cuadrupolo Q0 contribuye a minimizar los efectos de matriz característicos de minerales lateríticos, bauxíticos y carbonatíticos, reduciendo el impacto de fluctuaciones derivadas de cambios en la composición química de las muestras y proporcionando una mayor estabilidad instrumental durante campañas analíticas prolongadas. Esta característica resulta particularmente importante para proyectos nacionales que requieren comparabilidad de resultados a lo largo de varios años y entre distintos lotes de muestras provenientes de diferentes zonas geológicas del país.

Desde la perspectiva metrológica, la arquitectura multicuadrupolar Q0-Q1-Q2-Q3 ofrece ventajas directas sobre parámetros críticos relacionados con la validación y acreditación de métodos analíticos. La reducción de interferencias desde etapas tempranas del proceso de medición permite disminuir errores sistemáticos, mejorar los niveles de exactitud y precisión, aumentar la robustez de los métodos, reducir la incertidumbre de medición y fortalecer la reproducibilidad interlaboratorio. Todos estos parámetros forman parte de los requisitos fundamentales establecidos por la norma ISO/IEC 17025 para la validación y mantenimiento de métodos de ensayo acreditados.

Asimismo, la mejora en el control de interferencias favorece una mejor concordancia con los materiales de referencia certificados utilizados en los procesos de validación, fortaleciendo la trazabilidad metrológica de las mediciones y asegurando que los resultados generados por el Estado dominicano sean comparables internacionalmente. En un proyecto de carácter estratégico orientado a determinar el valor real de recursos minerales críticos, estas condiciones constituyen requisitos técnicos indispensables y no elementos opcionales.

Adicionalmente, el sistema NexION™ 5000 constituye el núcleo analítico de la plataforma instrumental propuesta para el Proyecto Nacional de Caracterización de Tierras Raras. Sobre este detector principal se integran funcionalmente los demás módulos especializados del sistema, incluyendo la plataforma de ablación láser para análisis directo de sólidos, el sistema automático de autodilución inteligente, los sistemas de horno de preparación de perlas fundidas y demás componentes asociados al flujo analítico completo. La compatibilidad física, electrónica, lógica y de software entre estos módulos resulta indispensable para garantizar el funcionamiento integrado de la plataforma.

La arquitectura del sistema propuesto ha sido diseñada para operar como una solución instrumental única, donde el desempeño de cada módulo depende directamente de las capacidades analíticas del detector principal. Por esta razón, la exclusividad técnica asociada al NexION™ 5000 se extiende funcionalmente al conjunto del sistema, ya que la sustitución del núcleo analítico por una arquitectura diferente comprometería la compatibilidad, integración, validación conjunta y responsabilidad técnica del sistema completo.

De manera complementaria, se deja constancia de que fueron realizadas las diligencias correspondientes ante el fabricante PerkinElmer para la identificación de los distribuidores autorizados con capacidad para suministrar, instalar, integrar, validar y ofrecer soporte técnico al sistema requerido. Como resultado de estas gestiones, el fabricante ha emitido las correspondientes certificaciones y cartas de autorización mediante las cuales reconoce oficialmente a sus representantes autorizados en la República Dominicana para la comercialización y suministro de

esta solución tecnológica integral. Dichas certificaciones forman parte de la documentación de respaldo del presente procedimiento y evidencian la existencia de canales formalmente autorizados por el fabricante para atender los requerimientos del proyecto.

En consecuencia, la exigencia de un sistema ICP-MS/MS basado en una arquitectura multicuadrupolar verdadera Q0-Q1-Q2-Q3, específicamente representada por la plataforma **NexION™ 5000**, no constituye una referencia arbitraria de marca ni una preferencia comercial, sino una necesidad técnica objetiva derivada de las características mineralógicas de los depósitos dominicanos de tierras raras, de los requisitos de calidad metrológica exigidos por la norma ISO/IEC 17025, de la complejidad analítica de las matrices ricas en hierro, bauxita y otros minerales interferentes presentes en el país, y de la necesidad de disponer de una plataforma instrumental capaz de generar resultados científicamente válidos, trazables y defendibles en apoyo a los intereses estratégicos del Estado dominicano. Bajo estas condiciones, cualquier solución que no incorpore dicha arquitectura multicuadrupolar verdadera no puede considerarse técnicamente equivalente ni satisfacer plenamente los requerimientos científicos y metrológicos establecidos para el Proyecto Nacional de Caracterización de Tierras Raras.