

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



**TESIS**

**ANÁLISIS DEL CONTROL DE CALIDAD UTILIZADO EN EL MUESTREO  
GEOQUÍMICO EN EL PROYECTO DE Cu-Fe FORTUNA, DISTRITO  
MINERO DE MARCONA, ICA**

Para optar título profesional de:

**Ingeniero Geólogo**

Autor:

**Bach. Patricia del Carmen Guevara Vásquez**

Asesor:

**Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique**

**Cajamarca – Perú**

**2025**

## **CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD**

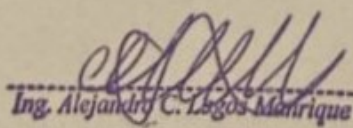
### **- FACULTAD DE INGENIERÍA -**

1. Investigador: PATRICIA DEL CARMEN GUEVARA VÁSQUEZ  
DNI: 72814131  
Escuela Profesional: INGENIERÍA GEOLÓGICA
2. Asesor: Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique  
Facultad: Ingeniería
3. Grado académico o título profesional  
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad  
☐ Maestro ☐ Doctor
4. Tipo de Investigación:  
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional  
☐ Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:

**ANÁLISIS DEL CONTROL DE CALIDAD UTILIZADO EN EL MUESTREO  
GEOQUÍMICO EN EL PROYECTO DE Cu-Fe FORTUNA, DISTRITO  
MINERO DE MARCONA, ICA**

6. Fecha de evaluación: 17/01/2025
7. Software antiplagio: ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (\*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 10%
9. Código Documento: oid:3117:421571786
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:  
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 22/01/2025



Ing. Alejandro C. Lagos Manrique

**FIRMA DEL ASESOR**  
**ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE**  
DNI: 09224934



Firmado digitalmente por:  
BAZAN DIAZ Laura Sofia  
FAU 20148258601 soft  
Motivo: En señal de  
conformidad  
Fecha: 22/01/2025 11:17:35-0500

**UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI**



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



**ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.**

TÍTULO : ANÁLISIS DEL CONTROL DE CALIDAD UTILIZADO EN EL MUESTREO GEOQUÍMICO EN EL PROYECTO DE Cu-Fe FORTUNA, DISTRITO MINERO DE MARCONA, ICA.

ASESOR : Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0189-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 08 de mayo de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **treinta días del mes de mayo de 2025**, siendo las nueve horas (09:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210), de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.  
Vocal : Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.  
Secretario : M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada **ANÁLISIS DEL CONTROL DE CALIDAD UTILIZADO EN EL MUESTREO GEOQUÍMICO EN EL PROYECTO DE Cu-Fe FORTUNA, DISTRITO MINERO DE MARCONA, ICA**, presentado por la Bachiller en Ingeniería Geológica **PATRICIA DEL CARMEN GUEVARA VÁSQUEZ**, asesorada por el Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron a la sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y la evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 04 PTS.  
EVALUACIÓN PÚBLICA : 12 PTS.  
EVALUACIÓN FINAL : 16 PTS. DIECUEEN (En letras)

En consecuencia, se la declara APROBADA con el calificativo de DIECUEEN.  
acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 10.00 am horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.  
Presidente

Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.  
Vocal

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.  
Secretario

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.  
Asesor

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, y a mis compañeros de clase, por los años de aprendizaje compartidos, así como por sus valiosas sugerencias y el apoyo brindado durante la realización de esta investigación. A mi asesor, el Dr. Ing. Alejandro Lagos, le agradezco profundamente por su orientación, dedicación y minuciosa revisión a lo largo del desarrollo de esta tesis.

Asimismo, quiero agradecer al equipo de Exploraciones de Marcobre por el apoyo proporcionado para llevar a cabo este trabajo.

Finalmente, no puedo dejar de agradecer a mi madre, cuya constante motivación y sabias palabras me dieron el impulso necesario para concluir este proyecto. Sin su apoyo incondicional, este logro no habría sido posible.

P.C.G.V.

## **DEDICATORIA**

A mi familia, y especialmente a mi madre, por su apoyo incondicional y constante motivación a lo largo de mi vida. Su presencia ha sido fundamental no solo en mi formación académica y profesional, sino también en mi crecimiento personal. Cada consejo, cada palabra de aliento y cada gesto de amor han sido los pilares que me han impulsado a seguir adelante, superando obstáculos y alcanzando metas. Sin su dedicación y confianza en mí, este logro no habría sido posible.

P.C.G.V

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|                                    | Pág.        |
|------------------------------------|-------------|
| <b>AGRADECIMIENTO .....</b>        | <b>ii</b>   |
| <b>DEDICATORIA.....</b>            | <b>iii</b>  |
| <b>LISTA DE TABLAS .....</b>       | <b>vi</b>   |
| <b>LISTA DE FIGURAS .....</b>      | <b>viii</b> |
| <b>LISTA DE FÓRMULAS .....</b>     | <b>ix</b>   |
| <b>LISTA DE GRÁFICOS .....</b>     | <b>x</b>    |
| <b>LISTA DE FOTOGRAFÍAS .....</b>  | <b>xii</b>  |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS .....</b> | <b>xiii</b> |
| <b>RESUMEN.....</b>                | <b>xiv</b>  |
| <b>ABSTRACT .....</b>              | <b>xv</b>   |

### **CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN**

### **CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO**

|                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2.1. Antecedentes Teóricos de la Investigación .....</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1.1. Antecedentes Internacionales.....                      | 3         |
| 2.1.2. Antecedentes Nacionales .....                          | 3         |
| 2.1.3. Antecedentes Locales .....                             | 4         |
| <b>2.2. Bases Teóricas .....</b>                              | <b>4</b>  |
| 2.2.1. Depósitos IOCG.....                                    | 4         |
| 2.2.2. Aseguramiento de la Calidad.....                       | 11        |
| 2.2.3. Control de la Calidad .....                            | 14        |
| 2.2.4. Programa de Aseguramiento y Control de la Calidad..... | 24        |
| <b>2.3. Definición de Términos Básicos.....</b>               | <b>28</b> |

### **CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS**

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.1. Ubicación de la Investigación.....</b> | <b>30</b> |
| 3.1.1. Ubicación Política.....                 | 30        |
| 3.1.2. Ubicación Geográfica .....              | 30        |

|                                                              | Pág.      |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.3. Accesibilidad .....                                   | 31        |
| <b>3.2. Procedimientos .....</b>                             | <b>33</b> |
| 3.2.1. Etapa Preliminar de Gabinete. ....                    | 33        |
| 3.2.2. Etapa de Campo. ....                                  | 33        |
| 3.2.3. Etapa Final de Gabinete. ....                         | 33        |
| <b>3.3. Metodología de la Investigación .....</b>            | <b>33</b> |
| 3.3.1. Enfoque de la Investigación.....                      | 33        |
| 3.3.2. Alcance de la Investigación .....                     | 34        |
| 3.3.3. Método de la Investigación.....                       | 34        |
| 3.3.4. Población de Estudio .....                            | 34        |
| 3.3.5. Muestra .....                                         | 34        |
| 3.3.6. Unidad de Análisis.....                               | 34        |
| 3.3.7. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos ..... | 34        |
| 3.3.8. Análisis e Interpretación de Datos .....              | 34        |
| <b>3.4. Unidades Morfogenéticas .....</b>                    | <b>35</b> |
| <b>3.5. Geología Local.....</b>                              | <b>36</b> |
| <b>3.6. Geología Estructural.....</b>                        | <b>40</b> |

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.1. Protocolo de Control de Calidad .....</b>           | <b>41</b> |
| <b>4.2. Ratio de Inserción de Muestras de Control .....</b> | <b>46</b> |
| <b>4.3. Control de la Precisión .....</b>                   | <b>48</b> |
| <b>4.4. Control de la Exactitud .....</b>                   | <b>73</b> |
| <b>4.5. Control de la Contaminación.....</b>                | <b>81</b> |
| <b>4.6. Contrastación de la Hipótesis .....</b>             | <b>86</b> |

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

|                                         |           |
|-----------------------------------------|-----------|
| <b>5.1. Conclusiones .....</b>          | <b>87</b> |
| <b>5.2. Recomendaciones .....</b>       | <b>88</b> |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b> | <b>89</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>                     | <b>95</b> |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                                  | Pág. |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1. Resumen de las características de un sistema IOCG .....                                                 | 10   |
| Tabla 2. Errores de muestreo según Pierre Gy .....                                                               | 12   |
| Tabla 3. Tasas de inserción sugeridas por varios autores .....                                                   | 27   |
| Tabla 4. Ubicación Política de la zona de estudio .....                                                          | 30   |
| Tabla 5. Ubicación Geográfica de la zona de estudio (UTM Datum WGS-84) .....                                     | 30   |
| Tabla 6. Distancia, tiempo y condiciones de la accesibilidad al área de estudio.....                             | 31   |
| Tabla 7. Resumen del programa de perforación del Proyecto Fortuna.....                                           | 41   |
| Tabla 8. Comparación entre la tasa de inserción recomendada y la tasa de inserción en el Proyecto Fortuna .....  | 46   |
| Tabla 9. Tasa de inserción por sondaje en el Proyecto Fortuna .....                                              | 47   |
| Tabla 10. Parámetros utilizados en el método hiperbólico para el cálculo de la precisión en los duplicados ..... | 48   |
| Tabla 11. Resumen de resultados de los duplicados de Cu utilizados en la perforación del Proyecto Fortuna .....  | 48   |
| Tabla 12. Resumen de resultados de los duplicados de Fe utilizados en la perforación del Proyecto Fortuna .....  | 49   |
| Tabla 13. Estadísticas básicas de las muestras originales y gemelas para el cobre .....                          | 49   |
| Tabla 14. Análisis de los resultados de las muestras originales con las muestras gemelas para el cobre .....     | 51   |
| Tabla 15. Estadísticas básicas de las muestras originales y gemelas para el hierro .....                         | 53   |
| Tabla 16. Análisis de los resultados de las muestras originales con las muestras gemelas para el hierro.....     | 55   |
| Tabla 17. Estadísticas básicas de las muestras originales y duplicados gruesos para el cobre .....               | 57   |
| Tabla 18. Análisis de los resultados de las muestras originales con los duplicados gruesos para el cobre .....   | 59   |
| Tabla 19. Estadísticas básicas de las muestras originales y duplicados gruesos para el hierro .....              | 61   |

|           |                                                                                                      |    |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 20. | Análisis de los resultados de las muestras originales con los duplicados gruesos para el hierro..... | 63 |
| Tabla 21. | Estadísticas básicas de las muestras originales y duplicados finos para el cobre...                  | 65 |
| Tabla 22. | Análisis de los resultados de las muestras originales con los duplicados finos para el cobre .....   | 67 |
| Tabla 23. | Estadísticas básicas de las muestras originales y duplicados finos para el hierro ..                 | 69 |
| Tabla 24. | Análisis de los resultados de las muestras originales con los duplicados finos para el hierro.....   | 71 |
| Tabla 25. | Relación de estándares utilizados durante el periodo de evaluación de la exactitud.                  | 73 |
| Tabla 26. | Resumen de resultados de los estándares utilizados en la perforación del Proyecto Fortuna.....       | 73 |
| Tabla 27. | Estadísticas básicas del estándar de ley baja para el cobre.....                                     | 74 |
| Tabla 28. | Resultados de Cu para el estándar de ley baja.....                                                   | 75 |
| Tabla 29. | Estadísticas básicas del estándar de ley media para el cobre.....                                    | 77 |
| Tabla 30. | Resultados de Cu para el estándar de ley media.....                                                  | 78 |
| Tabla 31. | Estadísticas básicas del estándar de ley alta para el cobre.....                                     | 80 |
| Tabla 32. | Resultados de Cu para el estándar de ley alta.....                                                   | 80 |
| Tabla 33. | Resumen de resultados de los blancos utilizados en la perforación del Proyecto Fortuna.....          | 81 |
| Tabla 34. | Estadísticas básicas del blanco fino para el cobre .....                                             | 82 |
| Tabla 35. | Resultados de Cu para el blanco fino. ....                                                           | 83 |
| Tabla 36. | Estadísticas básicas del blanco grueso para el cobre .....                                           | 84 |
| Tabla 37. | Resultados de Cu para el blanco grueso. ....                                                         | 85 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                 | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. Modelo esquemático para sistemas magmático-hidrotermales relacionando depósitos tipo pórfido Cu±Mo±Au y depósitos tipo IOCG.....      | 6    |
| Figura 2. Diagrama esquemático del entorno tectónico y litosférico de los depósitos IOCG .                                                      | 7    |
| Figura 3. Sección esquemática de la zonificación de alteración en depósito IOCG. ....                                                           | 9    |
| Figura 4. Sección esquemática que muestra la zonificación de la alteración y mineralización hidrotermal y las fuentes de metales y fluidos..... | 10   |
| Figura 5. Comparación entre las líneas de fallas (Simon, 2004, modificado por el autor) ....                                                    | 16   |
| Figura 6. Diagramas de dispersión para calcular la precisión que comparan resultados analíticos de muestras duplicadas versus originales. ....  | 18   |
| Figura 7. Método de Reconocimiento de Patrones en el gráfico de control Shewart para muestras estándares. ....                                  | 21   |
| Figura 8. Diagramas para evaluar la contaminación.....                                                                                          | 23   |
| Figura 9. Explicación de la precisión y exactitud de los datos .....                                                                            | 24   |
| Figura 10. Flujograma resumido del proceso de muestreo, preparación, análisis y QA/QC de resultados.....                                        | 25   |
| Figura 11. Ubicación del Proyecto Fortuna .....                                                                                                 | 32   |
| Figura 12. Columna Estratigráfica Regional.....                                                                                                 | 39   |
| Figura 13. Flujograma del proceso de corte y muestreo en el Proyecto Fortuna. ....                                                              | 42   |
| Figura 14. Flujograma del proceso de preparación de muestras en el Proyecto Fortuna.....                                                        | 43   |
| Figura 15. Flujograma del proceso de análisis de muestras en el Proyecto Fortuna.....                                                           | 44   |
| Figura 16. Flujograma del proceso de interpretación de QA/QC en el Proyecto Fortuna. ....                                                       | 45   |

## LISTA DE FÓRMULAS

|                                                                             | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|
| Fórmula 1. Cálculo del error total en el muestreo.....                      | 12   |
| Fórmula 2. Fórmula del Error Relativo para calcular la Precisión.....       | 15   |
| Fórmula 3. Fórmula de la línea hiperbólica para analizar la precisión ..... | 15   |
| Fórmula 4. Fórmula del sesgo para calcular la exactitud .....               | 20   |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                                                                         | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Gráfico 1. Distribución normal de las muestras originales y gemelas para el cobre .....                                                 | 50   |
| Gráfico 2. Gráfico de dispersión de las muestras originales y gemelas para el cobre. ....                                               | 52   |
| Gráfico 3. Gráfico de dispersión de las muestras originales y gemelas con énfasis en los valores bajos para el cobre.....               | 52   |
| Gráfico 4. Distribución normal de las muestras originales y gemelas para el hierro.....                                                 | 54   |
| Gráfico 5. Gráfico de dispersión de las muestras originales y gemelas para el hierro. ....                                              | 56   |
| Gráfico 6. Gráfico de dispersión de las muestras originales y gemelas con énfasis en los valores bajos para el hierro. ....             | 56   |
| Gráfico 7. Distribución normal de las muestras originales y duplicados gruesos para el cobre .....                                      | 58   |
| Gráfico 8. Gráfico de dispersión de las muestras originales y duplicados gruesos para el cobre. ....                                    | 60   |
| Gráfico 9. Gráfico de dispersión de las muestras originales y duplicados gruesos con énfasis en los valores bajos para el cobre. ....   | 60   |
| Gráfico 10. Distribución normal de las muestras originales y duplicados gruesos para el hierro.....                                     | 62   |
| Gráfico 11. Gráfico de dispersión de las muestras originales y duplicados gruesos para el hierro.....                                   | 64   |
| Gráfico 12. Gráfico de dispersión de las muestras originales y duplicados gruesos con énfasis en los valores bajos para el hierro. .... | 64   |
| Gráfico 13. Distribución normal de las muestras originales y duplicados gruesos para el cobre. ....                                     | 66   |
| Gráfico 14. Gráfico de dispersión de las muestras originales y duplicados finos para el cobre. ....                                     | 68   |
| Gráfico 15. Gráfico de dispersión de las muestras originales y duplicados finos con énfasis en los valores bajos para el cobre. ....    | 68   |
| Gráfico 16. Distribución normal de las muestras originales y duplicados finos.....                                                      | 70   |
| Gráfico 17. Gráfico de dispersión de las muestras originales y duplicados finos para el hierro.....                                     | 72   |

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 18. Gráfico de dispersión de las muestras originales y duplicados finos con énfasis en los valores bajos para el hierro. .... | 72 |
| Gráfico 19. Gráfico de control de Shewart para control de ley baja de cobre. ....                                                     | 76 |
| Gráfico 20. Gráfico de control de Shewart para control de ley media de cobre. ....                                                    | 79 |
| Gráfico 21. Gráfico de control de Shewart para control de ley alta de cobre. ....                                                     | 81 |
| Gráfico 22. Gráfico de control de Shewart para control de blanco fino con muestra precedente. ....                                    | 84 |
| Gráfico 23. Gráfico de control de Shewart para control de blanco grueso con muestra precedente. ....                                  | 86 |

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

|                                                                                                                                                                                                       | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Fotografía 1. Predominancia de unidades morfogénicas eólicas debido al ambiente desértico. ....                                                                                                       | 35   |
| Fotografía 2. Presencia de nebkhas o dunas obstaculizadas por vegetación, además de dunas. ....                                                                                                       | 35   |
| Fotografía 3. Campo de regolito que incluye depósitos eólicos y fragmentos de rocas volcanoclástica de la Formación Rio Grande, además de relieve intrusivo relacionado al Batolito de la Costa. .... | 36   |
| Fotografía 4. Litología en el Proyecto Fortuna. ....                                                                                                                                                  | 37   |
| Fotografía 5. Tipos de alteración en el Proyecto Fortuna. ....                                                                                                                                        | 38   |
| Fotografía 6. Mineralización en el Proyecto Fortuna. ....                                                                                                                                             | 38   |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|           |                                                                            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------|
| AA        | : Absorción Atómica para detección de Cu.                                  |
| BF        | : Blanco Fino                                                              |
| BG        | : Blanco Grueso                                                            |
| CV        | : Coeficiente de Variación                                                 |
| ICP-OES   | : Emisión Óptica de Plasma Inductivamente Acoplado.                        |
| IOCG      | : Depósitos de óxidos de hierro, cobre y oro.                              |
| m.        | : Metros                                                                   |
| MV        | : Mejor Valor del certificado.                                             |
| Nro.      | : Número                                                                   |
| Prof.     | : Profundidad                                                              |
| Q1        | : Medida estadística correspondiente al primer cuartil (25% de los datos). |
| Q3        | : Medida estadística correspondiente al tercer cuartil (75% de los datos). |
| QA/QC     | : Aseguramiento de la Calidad/Control de la Calidad.                       |
| REE       | : Tierras raras.                                                           |
| SD        | : Desviación estándar.                                                     |
| 2SD       | : Dos veces la desviación estándar                                         |
| 3SD       | : Tres veces la desviación estándar                                        |
| VOL       | : Método Volumétrico para detección de Fe.                                 |
| $\bar{x}$ | : Media o promedio.                                                        |

## RESUMEN

El Proyecto de Cu-Fe Fortuna, ubicado en Marcona, Ica, se encuentra en la franja de los depósitos Fe-Cu-Au/IOCG del Jurásico Medio-Superior con zonas de óxidos y sulfuros; durante la campaña de perforación se realizaron diez sondajes y para validar estos resultados fue necesario estudiar cómo es el control de calidad en el muestreo geoquímico a través de la evaluación de la precisión mediante el error relativo de los duplicados y exactitud mediante el sesgo en los estándares, para una posterior evaluación de recursos minerales; adicionalmente, se determinó el ratio de inserción de muestras de control y se mejoró el protocolo de control de calidad al realizar análisis adicionales como absorción atómica para el cobre y análisis volumétrico para el hierro en los casos que superan el límite de detección. La metodología de trabajo incluyó la etapa preliminar de gabinete donde se realizó una búsqueda de información científica y revisión de las características geológicas del depósito, seguida de la etapa de campo donde se insertaron muestras de control que se analizaron por digestión con agua regia y lectura con ICP-OES, absorción atómica o método volumétrico; y finalmente, se evaluaron los resultados utilizando gráficos de dispersión para los duplicados y gráficos de control de Shewart para los estándares y blancos. El control de calidad incluyó la inserción de muestras control de 17.3% superior al recomendado, y los resultados muestran un error relativo aceptable por debajo del 5% para Cu y Fe, y los estándares presentaron sesgos menores al 5%; adicionalmente, la evaluación de contaminación evidenció procedimientos efectivos sin valores atípicos asegurando la integridad de la información.

**Palabras Claves:** *contaminación, control de calidad, exactitud, muestreo geoquímico, precisión.*

## ABSTRACT

The Fortuna Cu-Fe Project, located in Marcona, Ica, is located in the belt of Fe-Cu-Au/IOCG deposits of the Middle-Upper Jurassic with oxide and sulfide zones. During the drilling campaign, ten holes were drilled and to validate these results, it was necessary to study how the quality control is in the geochemical sampling through the evaluation of the precision by means of the relative error of the duplicates and accuracy by means of the bias in the standards, for a later evaluation of mineral resources. Additionally, the ratio of insertion of control samples was determined and the quality control protocol was improved by performing additional analyses such as atomic absorption for copper and volumetric analysis for iron in cases that exceed the detection limit. The work methodology included the preliminary stage of the office where a search for scientific information and a review of the geological characteristics of the deposit was carried out, followed by the field stage where control samples were inserted and analyzed by digestion with aqua regia and reading with ICP-OES, atomic absorption or volumetric method. and finally, the results were evaluated using scatter plots for the duplicates and Shewart control charts for the standards and blanks. Quality control included the insertion of control samples 17.3% higher than recommended, and the results show an acceptable relative error below 5% for Cu and Fe, and the standards presented biases less than 5%; additionally, the contamination evaluation showed effective procedures without outliers ensuring the integrity of the information.

**Keywords:** *contamination, quality control, accuracy, geochemical sampling, precision.*

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

El Proyecto de Cu-Fe Fortuna está ubicado en el distrito minero Marcona, en la provincia y departamento de Ica, en la franja metalogenética correspondiente a los depósitos Fe-Cu-Au/IOCG del Jurásico Medio-Superior, cuya mineralización está definida por una zona de óxidos conformada principalmente por atacamita y crisocola, y una zona de sulfuros caracterizada por pirita y calcopirita asociados a mantos de magnetita. Durante la etapa de perforación, se ejecutaron diez sondeos cuyos resultados necesitan ser validados para ser utilizados, posteriormente, en el cálculo de recursos y reservas que va a influir en la valorización del proyecto, por lo que, es necesario analizar la calidad de los resultados del muestreo geoquímico a través del cálculo de la precisión determinando el error relativo de las muestras duplicadas y la exactitud determinando el sesgo de las muestras estándares; debido a lo anterior, se formuló la siguiente pregunta: ¿cómo es el control de calidad en el muestreo geoquímico en el Proyecto de Cu-Fe Fortuna en el distrito Minero Marcona, Ica?, planteándose como hipótesis que el control de calidad utilizado en el muestreo geoquímico en el Proyecto Cu-Fe Fortuna es bueno, debido a que la precisión es alta con un error relativo menor al 5% y la exactitud es alta con un sesgo menor al 5%.

Esta investigación se justifica, ya que, un programa de control de calidad construido en base a las buenas prácticas identifica la fuente de error analítico y proporciona confiabilidad en los datos, su importancia radica en que implica monitorear la precisión y exactitud desde el muestreo hasta el análisis utilizando muestras duplicadas y estándares insertados de manera sistemática para minimizar la incertidumbre de la medición y asegurar las buenas prácticas en el posterior cálculo de recursos y reservas. Además, servirá de base para futuros estudios e investigaciones relacionados a teoría del muestreo, aseguramiento y control de la calidad, y cálculo del error fundamental. El alcance o

delimitación de este estudio está orientado al muestreo geoquímico de sondajes de perforación diamantina en el Proyecto de Cu-Fe Fortuna.

El objetivo general de este trabajo es realizar el análisis del control de calidad utilizado en el muestreo geoquímico en el Proyecto Fortuna, para lo cual se establecieron los objetivos específicos que incluyen mejorar el protocolo de control de calidad del muestreo geoquímico, determinar el ratio de inserción de muestras de control y calcular la precisión y exactitud del muestreo geoquímico.

La descripción de los contenidos de los capítulos es la siguiente: el Capítulo I como Introducción sintetiza el planteamiento y formulación del problema, así como la hipótesis, justificación, alcances y objetivos de la presente investigación, el Capítulo II como Marco Teórico detalla el marco teórico utilizado con las bases teóricas y la definición de términos básicos, el Capítulo III como Materiales y Métodos describe la ubicación de la investigación, los procedimientos, la metodología de la investigación y algunos aspectos como unidades geomorfológicas, geología local y geología estructural del área de investigación; el Capítulo IV como Análisis y Discusión de Resultados que aborda la descripción y mejoramiento del protocolo de control de calidad, ratio de inserción de muestral de control y, el análisis y control de la precisión, exactitud y contaminación, además de la contrastación de la hipótesis; finalmente, el Capítulo V como Conclusiones y Recomendaciones plasmados en función a los objetivos, y finalmente se incluyen las referencias bibliográficas utilizadas a lo largo del desarrollo de esta investigación.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes Teóricos de la Investigación**

##### **2.1.1. Antecedentes Internacionales**

Bariatska y Sergeieva (2023), analizan 111 programas de Aseguramiento y Control de la Calidad de 87 proyectos mineros, determinando que la cantidad de muestras de control no alcanza necesariamente el 20% recomendado y es ligeramente superior al 16%, las más utilizadas son las denominadas estándares, y las menos utilizadas son los blancos gruesos; sin embargo, esta cantidad y variedad también depende del tipo de mineral.

Gan, et. al. (2022), determinan que el uso de materiales de referencias (muestras de tipo estándar, duplicadas y blancos) es esencial para monitorear y evaluar el desempeño de la práctica de control de calidad en términos de exactitud, precisión y posible contaminación que afecte los datos analíticos reportados en la mina Havelock, Eswatini.

Silva y Coimbra (2018), proponen un enfoque para definir la incertidumbre de medición asociada a la calidad del muestreo mediante la definición de subgrupos que tienen la misma relación entre concentración e incertidumbre de medición y usan esta ecuación para estimar la incertidumbre de las mediciones realizadas en las muestras originales.

##### **2.1.2. Antecedentes Nacionales**

Alfaro (2022), en su investigación, estandariza la inserción sistemática de muestras de control enviadas a laboratorio interno y externo para evaluar y determinar el grado de confianza en los procesos así como la calidad de los datos y la confiabilidad en el proceso de estimación, logrando monitorear la precisión y exactitud de los resultados analíticos, así como controlando la contaminación de las muestras y diagnosticando e identificando las fuentes de error en el cuerpo Salvadora en la Unidad Operativa Andaychagua en Junín.

Rojas (2022), aplica el sistema de control de calidad |en el proceso de muestreo geológico en la mina Tambomayo, Caylloma en Arequipa para determinar si tiene influencia en la reducción del error relativo, sesgo y tasa de contaminación para validar la estimación de recursos.

### 2.1.3. Antecedentes Locales

Gallarda (2019), analiza el método de muestreo de detritos de los sondajes para voladura y control de envío de mineral en Mina Justa con el fin de desarrollar un programa de muestreo que asegure la calidad de la toma de datos y de la campaña de perforación.

Hidalgo (2013), realiza un estudio del control de la calidad en los sondajes diamantinos de exploración en el proyecto Mina Justa, a través de procesos de validación desde la etapa de perforación, traslado de bandejas de testigos, revisión de tramos de muestreo, muestreo, logueo, envío de a análisis de laboratorio geoquímico y supervisión de estos, con el fin de evitar errores groseros o malas prácticas para optimizar el desarrollo del modelo geológico.

## 2.2. Bases Teóricas

### 2.2.1. Depósitos IOCG

#### 2.2.1.1. Generalidades Teóricas

Uno de los estilos de mineralización más desconocidos y discutido es el denominado IOCG (Hitzman, et. al., 1995 & Williams, et. al., 2005); a pesar de que la asociación de óxidos de hierro (magnetita y hematita) con sulfuros de cobre y oro se encuentra en diversos estilos de mineralización, se incluyen también dentro de este estilo, las siguientes características:

- Asociación con un alteración alcalino-cálcica que incluye proporciones muy variables de clinoanfíboles férricos y/o hedenbergita, albita, feldespato potásico o biotita.
- La relación con zonas de cizalla transcrustales o rocas magmáticas de composición diversa.
- Presencia de elementos característicos que incluyen U, tierras raras, Co, Ni o Mo; y cantidades significativas de minerales ricos en elementos volátiles como P, F o B.

- La relación con fluidos hipersalinos de alta temperatura (a veces con CO<sub>2</sub>) equilibrados con rocas profundas.
- La asociación en el mismo distrito de depósitos de magnetita-apatito (tipo Kiruna), depósitos de óxidos de hierro (cobre-oro) y depósitos de cobre-oro pobres en óxidos de Fe.

La mineralización de tipo IOCG se encuentra en varios distritos bien delimitados del mundo, la mayor parte de ellos como en Cloncurry, Skelletfe, Carajás y Great Bear se localizan en cinturones antiguos con intensa deformación, magmatismo y metamorfismo de alto grado y polifásicos, lo que muchas veces hace difícil establecer una relación precisa entre mineralización y eventos geológicos; sin embargo, en los Andes (Perú y Chile) hay mineralización que reúne características del sistema IOCG pero que están poco deformadas y metamorfizadas.

Actualmente existen dos tipos de hipótesis generales para la génesis de estas mineralizaciones: la hipótesis magmática defendida por Frietsch (1978), Mark & Foster (2000), Pollard (2000), Sillitoe (2003) y Tornos et. al. (2005), entre otros que sostienen que los fluidos mineralizadores son producto de la exsolución magmática y que dan lugar a una zonación similar a la de los pórfidos cupríferos. La segunda hipótesis defendida por Barton & Jhonson (1996; 2000), plantea que los fluidos son derivados de cuencas ricas en evaporitas y que las rocas ígneas solo actúan como fuentes de calor (Figura 1).

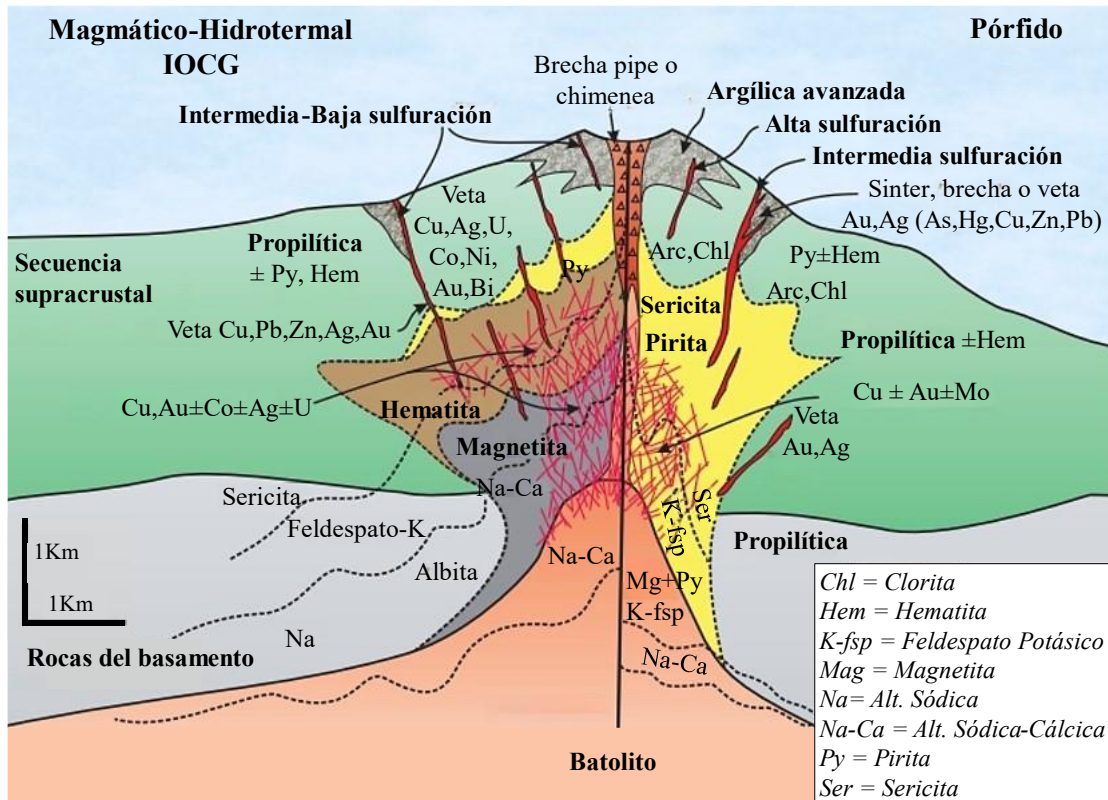


Figura 1. Modelo esquemático para sistemas magmático-hidrotermales relacionando depósitos tipo pórfido  $\text{Cu} \pm \text{Mo} \pm \text{Au}$  y depósitos tipo IOCG.

Fuente: Modificado de Richards & Mumin, (2013).

#### 2.2.1.2. Formación de Depósitos IOCG

Los principales sistemas IOCG se encuentran en entornos orogénicos continentales a post orogénicos del Arcaico tardío (p. ej., distrito de Carajas, Brasil) y Proterozoico (p. ej., distritos de Olympic Dam y Cloncurry, Australia; Norrbotten, Suecia; Great Bear, Canadá), hasta el Mesozoico (p. ej., Candelaria–Punta del Cobre y Manto Verde en Chile; Raúl-Condestable y Mina Justa en Perú).

Estos depósitos constituyen grandes enriquecimientos geoquímicos en Fe, pero principalmente como óxidos de Fe ( $\pm$  silicatos de Fe, carbonatos de Fe) con sulfuros de Fe relativamente menores; contienen enriquecimientos económicamente importantes en  $\text{Cu} \pm \text{Au} \pm \text{U} \pm \text{REE}$  (elementos de tierras raras)  $\pm \text{Co}$ . Se asocian comúnmente con magmas calco-alcalinos a ligeramente alcalinos relativamente oxidados, pero aparentemente pobres en S. Muestran amplias zonas de alta temperatura ( $\sim 600\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) Na (albita-anfíbol-piroxeno), Na-Ca-Fe (magnetita-actinolita-apatito) o alteración K-Fe (K-feldespato-magnetita-biotita-anfíbol). La alteración de temperatura más baja ( $<400$

°C; p. ej., hematita-clorita-sericita-carbonato) se caracterizan por la persistencia de condiciones de pH casi neutrales a levemente ácidas, con raras alteraciones altamente ácidas, lo que refleja una menor abundancia de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en los fluidos hidrotermales.

El origen de los fluidos IOCG ha sido ampliamente debatido, desde fuentes metamórficas y de la corteza hasta fluidos hidrotermales magmáticos; sin embargo, tomando en cuenta la teoría de sistemas impulsados por magma que involucran fluidos magmáticos primarios, aunque con contribuciones variables de la corteza (Barton y Johnson, 2000; Pollard, 2006; Groves et al., 2010; Skirrow, 2010).; los sistemas IOCG se forman principalmente durante los períodos de deformación extensional o transtensional, en entornos tectónicos que van desde el arco posterior o arco distal (p. ej., Olympic Dam; Skirrow, 2010) hasta el interior del arco (p. ej., Candelaria–Punta del Cobre, Marcona; Marschik y Fontboté, 2001; Chen et al., 2008), y a entornos extensionales posteriores a la colisión (p. ej., Great Bear). Estos ambientes geotectónicos son compartidos por depósitos de pórfido relacionados con el arco y posteriores a la subducción (Figura 2).

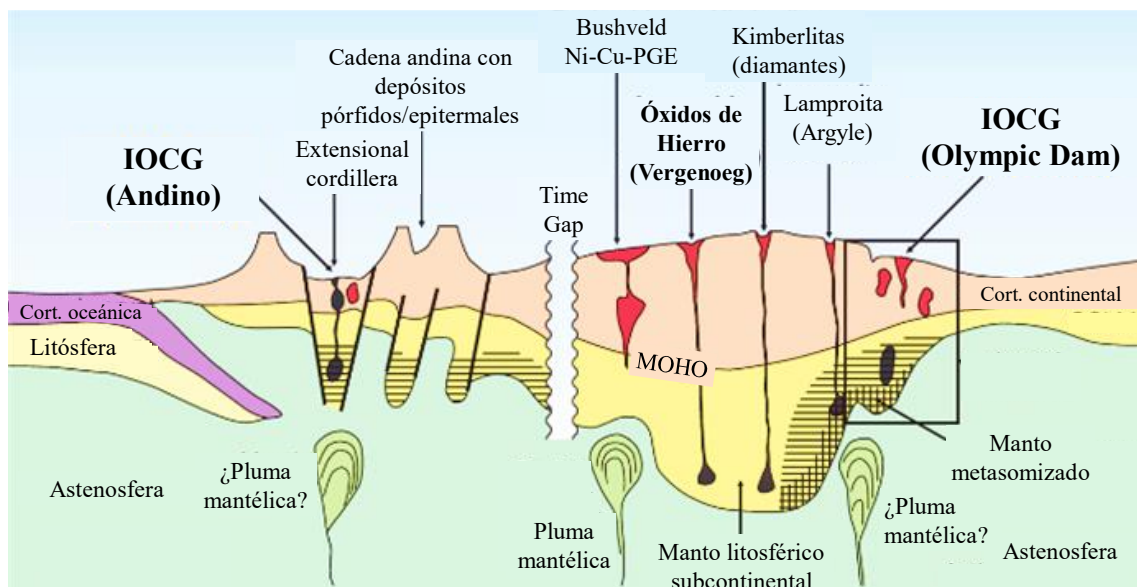


Figura 2. Diagrama esquemático del entorno tectónico y litosférico de los depósitos IOCG, tanto en el cratón Pre Cámbrico como en las partes extensionales de los arcos cordilleranos.

Fuente: Groves, et. al. (2010).

### 2.2.1.3. Alteración Hidrotermal en Depósitos IOCG

La presencia de una amplia zona de alteración hidrotermal con feldespato-clinoanfíbol dominante con poca alteración sericítica superimpuesta sugiere que los sistemas IOCG

eran relativamente isotermos, tamponados por rocas cuarzo-feldespáticas y sin una entrada significativa de fluidos superficiales, una característica que los hace muy distintos de los sistemas tipo pórfido.

La presencia de zonas con alteración albita-magnetita o biotita-feldespato potásico-magnetita podría estar controlada por la composición del fluido, que en un espacio Na/K estabilizaría unos minerales frente a otros; los datos de Manning & Pichavant (1985) muestran que procesos de inmiscibilidad de CO<sub>2</sub> estabilizan la albita frente al feldespato potásico. La existencia de minerales ricos en B (axinita, turmalina, vonsenita) en sistemas dominados por alteración potásica y de apatito o fluorita en los dominados por albita sugiere que la presencia de unos volátiles u otro es el control de la alteración alcalino-cálcica (Figura 3).

Aunque no hay datos geocronológicos absolutos, las mineralizaciones con hematita parece ser más joven y relacionada con la circulación de fluidos superficiales a menores temperaturas; la solubilidad relativa entre la magnetita y la calcopirita es lo que explica la cronología entre ambos; sin embargo, los datos indican que ambos fueron transportados por el mismo fluido. La magnetita puede precipitar a cualquier temperatura motivado por su concentración y la alta solubilidad, la solubilidad de los complejos clorurados de cobre muestra que estos son muy solubles a temperaturas sobre 350°C y solo por debajo de esta pueden formarse los sulfuros; el oro, posiblemente, transportado como AuCl<sub>4</sub> en estos sistemas, precipitaría siguiendo las pautas del cobre. En estas condiciones, tanto la inmiscibilidad como el enfriamiento simple no parecen ser mecanismos suficientes para la precipitación del Cu-Au; más bien, la mezcla con fluidos menos salinos (y posiblemente oxidados) o la reacción con la magnetita precipitada anteriormente parecen ser los controles de la precipitación de la paragénesis del Cu-Au. (Hitzman et. al., 1992)

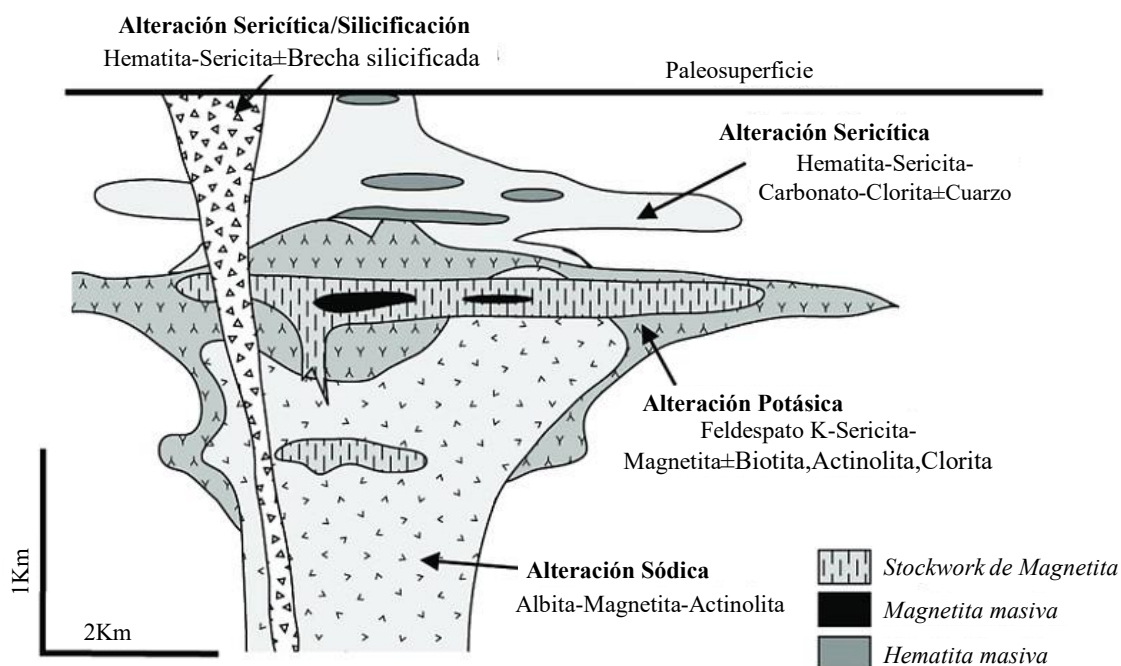


Figura 3. Sección esquemática de la zonificación de alteración en depósito IOCG.

Fuente: Hitzman et. al., (1992)

#### 2.2.1.4. Mineralización en Depósitos IOCG

La mineralización de tipo IOCG en los Andes están estudiadas por Marschik & Fontbote (2001), Sillitoe (2003) y Haller et. al. (2006); hay indicios con marcado control estructural en la andesita del Jurásico Superior-Cretácico Inferior, y que solo localmente aparecen relacionados con pequeñas intrusiones subvolcánicas. Las rocas encajantes muestran una alteración potásica (microclina+biotita) y cálcico-férrica (clinoanfíbol) dominantes; generalmente, la primera predomina cerca de los intrusivos mientras que la segunda está ligada a fracturas, gradando a zonas ricas en clorita-sericita. En las zonas más proximales se reconocen brechas de turmalina-feldespato potásico-cuarzo.

La mineralización se caracteriza por magnetita con calcopirita, pirita y oro; superpuesta o posterior a esta etapa hay una de hematita-calcopirita-bornita con un fuerte control estructural y que ha dado lugar a depósitos como Mantoverde y Carmen; la alteración es de tipo sericita-ankerita-cuarzo y es equivalente a la alteración sericítica somera de Sillitoe (2003) (Figura 4).

En relación espacial con estos depósitos hay abundantes yacimientos de magnetita-(apatito) de origen controversial (Carmen de Fierro, Fresia, Marcona, Romeral, Cerro Imán) que gradan a mineralizaciones similares a las anteriores pero ricas en clinoanfíbol-

apatito; sin embargo, la geología, estructura y textura y geoquímica indican que muchos de estos depósitos son de origen magmático y producto de la inmiscibilidad de un magma rico en óxidos de hierro y volátiles, tal como lo indicó Lledó (2005) (Tabla 1).

Tabla 1. Resumen de las características de un sistema IOCG

| Características               | IOCG Magmático-Hidrotermal                                              |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Asociación de metales mayores | Fe, Cu, Au                                                              |
| Asociación de metales menores | U, REE, Co, Ag                                                          |
| Contenido de sulfuros         | Bajo, pocos sulfuros                                                    |
| Asociación de sulfuros        | Magnetita, hematita, calcopirita, bornita, calcocita                    |
| Alteración geoquímica         | Na-K-Fe-P-Ca-CO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub>                          |
| Metamorfismo regional         | Bajo a alto grado                                                       |
| Características del magma     | Calcoalcino a alcalino; máfico a félsico; $\Delta\text{FMQ} = 0$ a $+2$ |
| Ambiente tectónico            | Distal, back-arc o post subducción                                      |
| Ambiente cinemático           | Extensión o transtensión                                                |
| Edad                          | Pre Cámbrico, Mesozoico.                                                |

Fuente: Modificado de Richards & Mumin, (2013).

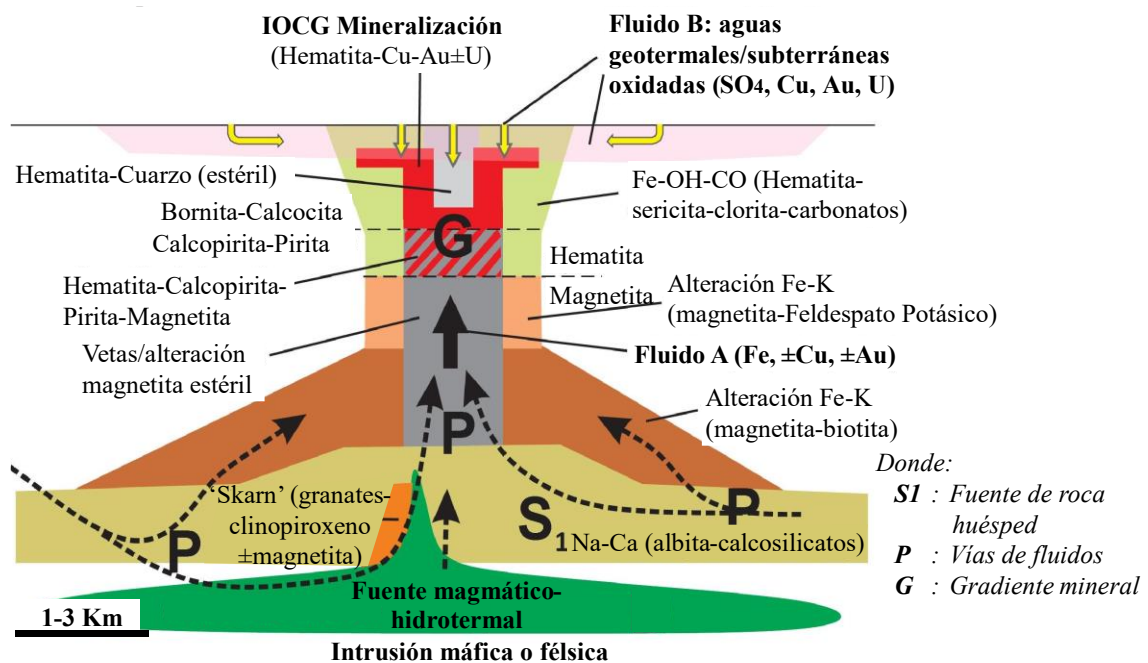


Figura 4. Sección esquemática que muestra la zonificación de la alteración y mineralización hidrotermal y las fuentes de metales y fluidos.

Fuente: Modificado de Skirrow, (2019).

### 2.2.2. Aseguramiento de la Calidad

El aseguramiento de la calidad comprende acciones sistemáticas y establecidas con anterioridad para demostrar y cuantificar la confiabilidad de los datos de los ensayos químicos (Long, 2003). Abarca los procedimientos rutinarios para monitorear la calidad con el objetivo de evitar que se cometan errores en el proceso de muestreo, preparación y/o análisis asegurándose de que cada operación esté documentada y, de esta manera, demostrar que no hay variaciones o sesgos adicionales (Sterk, 2015); es decir, mientras el Aseguramiento de la Calidad está relacionado directamente con la prevención, el Control de Calidad se encarga de la detección de problemas (Simon, 2004).

#### 2.2.2.1. Teoría del Muestreo

Según la Teoría del Muestreo (Gy, 1979; Pitard, 2005), el objetivo del muestreo es seleccionar un subconjunto de población más pequeño que sea representativo de la población en su conjunto para medir el parámetro de interés; en el campo de la geoquímica, el muestreo y submuestreo son fundamentalmente técnicas de reducción de masa y deben utilizarse los métodos adecuados para asegurar que se mantengan la composición y características del conjunto, cuando se realiza el muestreo correctamente, todos los componentes del material de interés tienen la misma probabilidad de ser seleccionados; sin embargo, un muestreo incorrecto proporciona valores no representativos.

La causa “fundamental” del error en el muestreo está relacionado a la heterogeneidad del material geológico; es decir, cuanto más heterogéneo es el material muestreado, más difícil es obtener una muestra representativa e inferir sus características; por lo que, es necesario tener una visión de la relación entre el grado de heterogeneidad de la mineralización muestreada y la representatividad de la muestra, ya que, si la muestra no es representativa no importa que tan bueno sea el análisis, los datos no serán veraces; por lo que, un muestreo adecuado debe considerar lo siguiente (Vallée, 1999):

1. La distribución regionalizada de las muestras dentro del material geológico.
2. Protocolo de muestreo.
3. Protocolo de submuestreo para reducir la masa original para el análisis.
4. Método de análisis.

Pitard (1993), resumió los siete errores de muestreo de Gy (1979) que deben considerarse durante todo el proceso desde la generación de la muestra, preparación y análisis, incluyendo la metodología del laboratorio (Tabla 2).

Tabla 2. Errores de muestreo según Pierre Gy

| <b>Tipo de Error</b>                     | <b>Descripción</b>                                                                                  | <b>Mitigación</b>                                                                                                                       |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Error Fundamental del Muestreo           | Error debido a la composición física del material geológico.                                        | Utilizar un monograma de muestreo.                                                                                                      |
| Error de agrupamiento y segregación      | Atribuido a una distribución física no aleatoria de partículas.                                     | Homogeneizar y dividir la muestra.                                                                                                      |
| Error de Heterogeneidad de largo alcance | Diferencias no aleatorias debidas a la ubicación de la muestra dentro del yacimiento                | Usar variogramas para analizar la variabilidad espacial y gestionar el efecto de las diferencias espaciales tomando varias submuestras. |
| Error de Heterogeneidad periódico        | Fluctuaciones especiales o temporales.                                                              | Compositar muestras antes de analizar las relaciones de leyes entre muestras.                                                           |
| Error de Delimitación de Incremento      | Error debido a un diseño de muestreo inadecuado y/o una selección incorrecta del equipo de muestreo | Cuidado el diseño de muestreo y selección de equipos                                                                                    |
| Error de Extracción del Incremento       | Cuando no se sigue el procedimiento de muestreo correcto.                                           | Cumplir el protocolo de muestreo.                                                                                                       |
| Error de Preparación                     | Cuando parte de la muestra se pierde, se contamina o altera.                                        | Cumplir el protocolo de muestreo y del laboratorio.                                                                                     |

Fuente: Modificado de Coombes, (2008).

En resumen, los errores pueden generarse en cualquier etapa del muestreo, preparación y ensayo analítico de las muestras; y, en general, se agrupan por sus tipos y factores que causan errores (Abzalov, 2016).

$$\text{Error Total} = \text{Errores}_{(1er \text{ Grupo})} + \text{Errores}_{(2do \text{ Grupo})} + \text{Errores}_{(3er \text{ Grupo})}$$

Fórmula 1. Cálculo del error total en el muestreo

Donde:

Errores <sub>(1er Grupo)</sub>: relacionados al protocolo de muestreo, siempre están presentes y no se puede eliminar por completo, ya que está relacionados a características intrínsecas del material geológico, como la mineralogía y textura; es decir, relacionado a la heterogeneidad y se conoce como Error Fundamental del Muestreo (Gy, 1979); sin

embargo, se puede minimizar mediante la optimización de los protocolos de muestreo. También se incluye el error de agrupación-segregación (Pitard, 2005).

Errores (2do Grupo): relacionados con la práctica de muestreo; incluye errores de delimitación, extracción, preparación y pesaje, causados por una extracción incorrecta de las muestras de un lote, sus procedimientos de preparación y mediciones analíticas incorrectas; los errores humanos, como números de muestras mixtos, también pueden incluirse en este grupo. Estos errores se pueden minimizar mejorando los procedimientos de control de calidad.

Errores (3er Grupo): errores analíticos e instrumentales en las operaciones analíticas (Gy, 1979), como ensayos, análisis de humedad, pesaje de alícuotas, análisis de densidad, difieren de los dos primeros grupos debido a los diferentes factores que los causan.

Según Simon (2004) para reducir al mínimo el error total posible (Long, 2000), algunas muestras de control deben ser tomadas y/o insertadas durante el proceso de muestreo como:

*Muestras gemelas:* Se obtienen al dividir a la mitad el testigo, ambas muestras deben ser preparadas en el mismo laboratorio y analizadas con diferente número en el mismo lote y se usan para evaluar el error de muestreo. Se recomienda evitar el uso del término de duplicado, ya que el original y la muestra gemela ocupan, formalmente, diferentes posiciones espaciales.

*Duplicados gruesos:* Son tomados después de una fase de chancado y cuarteo, y deben ser analizados en el mismo laboratorio, con diferente número, y en el mismo lote que la muestra original. Se usan para evaluar el error de cuarteo o sub-muestreo.

*Duplicados finos o de pulpa:* Son duplicados de muestras originales previamente pulverizadas, que son enviados con diferente número al laboratorio primario para su análisis en el mismo lote que las muestras originales. Estas muestras se utilizan para evaluar la precisión analítica del laboratorio.

*Estándares:* Son muestras elaboradas bajo condiciones especiales, que deben formar parte del lote analizado, se utilizan para evaluar la exactitud analítica y se recomienda seleccionar materiales de composición aproximadamente similar a la de las muestras originales para reducir al mínimo el efecto analítico de la matriz mineral, además se recomienda utilizar al menos tres estándares (ley baja, ley media y ley alta).

*Blancos finos:* Son muestras de material estéril pulverizado, que deben ser analizadas a continuación de muestras fuertemente mineralizadas, y se utilizan para determinar si se produce contaminación durante el proceso de análisis.

*Blancos gruesos:* Son muestras de material estéril, con granulometría gruesa, que deben ser sometidas a todo el proceso de preparación en conjunto con las demás muestras y deben ser preparadas a continuación de muestras fuertemente mineralizadas. Los blancos gruesos permiten evaluar si se produce contaminación durante la preparación.

### 2.2.3. Control de la Calidad

El control de la calidad consiste en la inserción sistemática de muestras de control en los lotes enviados al laboratorio; al evaluar los resultados es importante monitorear la precisión, exactitud y contaminación para detectar los problemas relacionados al muestreo, preparación y análisis (Simon, 2004).

#### 2.2.3.1. Control de la Precisión

La precisión de las muestras se controla utilizando pares de muestras llamados muestra duplicadas que, básicamente, es recolectada en el mismo lugar y siguiendo las mismas reglas que se utilizaron para recolectar la muestra original o inicial, en la práctica, puede ser la otra mitad del testigo de perforación, pero, también, puede ser recolectada en una etapa particular del protocolo de muestreo, como rechazos gruesos después de que el material triturado se haya dividido o una segunda alícuota recolectada de la misma pulpa pulverizada; en todos los casos, se procesan de manera similar permitiendo su análisis comparativo, las diferencias entre los valores analizados de la muestra y su duplicado se deben a errores asociados con la preparación y el ensayo de la muestra. (Abzalov 2008).

Los errores son aditivos; cada paso de recolección, procesamiento y análisis de muestra añaden errores que se pueden medir y controlar utilizando procedimientos de muestreo y análisis apropiados; sin embargo, la variación geológica es inherente a la naturaleza de un determinado depósito y no se puede controlar; una alta varianza en la distribución de mineral es compensada recolectando más muestras (disminuir el espaciamiento de la perforación) y de mayores tamaños (mayor diámetro de perforación).

La precisión se trata como un parámetro cualitativo y se evalúa mediante el Error Relativo (ER), que se calcula matemáticamente como el valor absoluto de la diferencia entre el valor original y el duplicado, dividido por el promedio de los dos valores:

$$ER = \frac{2|X_1 - X_2|}{(X_1 + X_2)}$$

Fórmula 2. Fórmula del Error Relativo para calcular la Precisión

Donde:

$X_1$  = valor original

$X_2$  = valor del par duplicado

En la práctica, la precisión se trata inversamente proporcional al Error Relativo; es decir, cuanto mayor es el ER, menor es la precisión; y, viceversa.

Existen diferentes métodos para estimar el error de precisión a partir de datos de pares (Garrett 1969; Thompson & Howarth 1973, 1976, 1978; Howarth & Thompson 1976; Bumstead 1984; Shaw 1997; Francois-Bongarcon 1998; Sinclair & Blackwell 2002; Simon, 2004, Abzalov 2008). Los métodos más comunes se basan en el supuesto de relaciones lineales entre los errores analíticos y de muestreo y la concentración de los metales analizados, Francois-Bongarcon (1998) ha extendido este principio a las relaciones más complejas descritas por un modelo cuadrático. Un tipo especial de modelo lineal es el eje mayor reducido (RMA) (Sinclair & Bentzen 1998; Davis 2002; Sinclair & Blackwell 2002), esta técnica es aplicable a casos lineales cuando diferentes conjuntos de datos pareados presentan diferencias sistemáticas (sesgo). Pitard (1998) ha sugerido un diagrama de diagnóstico especial, el gráfico de diferencias relativas (RDP), que puede utilizarse para un análisis detallado de las causas de la mala precisión de los datos o de los sesgos de muestra.

Debido a que la precisión disminuye considerablemente a media que el valor se acerca al Límite de Detección (LOD) de un método analítico determinado (Piercey, 2014), generalmente, se tienen conclusiones erróneas en valores bajos; por lo que, Simon (2004) desarrolló el Método Hiperbólico para disminuir este problema. Con este método, cada par duplicado  $X_1$  (muestra original) y  $X_2$  (muestra duplicada) se evalúan con una ecuación cuadrática hiperbólica, de la siguiente manera:

$$y^2 = m^2x^2 + b^2, \text{ para } x \geq y_0$$

Fórmula 3. Fórmula de la línea hiperbólica para analizar la precisión

Donde:

$$y = \text{Máx. } [X_1, X_2]$$

$$x = \text{Mín. } [X_1, X_2]$$

$m$  = Pendiente de la asíntota

$b$  = Valor de la intersección.

Cerca del límite de detección, la línea hiperbólica (considerada la línea de falla) se aleja de la asíntota permitiendo aceptar pares de menor precisión con valores más altos de error relativo; y, lejos del límite de detección, la línea hiperbólica tiende asintóticamente a una línea de pendiente constante  $m$  (Figura 5). El valor de  $m$  se calcula a partir de la ecuación del error relativo, considerando la línea asíntota  $x_2 = mx_1$ , se elige por el error relativo límite requerido para el tipo de duplicados que están siendo evaluados; en este sentido, se recomienda tomar el valor de 1.35 para muestras gemelas (es decir, 30% de error relativo), 1.22 para duplicados gruesos (20% de error relativo), y 1.11 para duplicados de pulpa (10% de error relativo). El valor de  $b$  se establece condicionalmente, dependiente del tipo de material, como un múltiplo entero del límite de detección analítica: de 10 a 20 veces para muestras gemelas, de 6 a 10 veces para duplicados gruesos y de 3 a 5 veces para duplicados de pulpa).

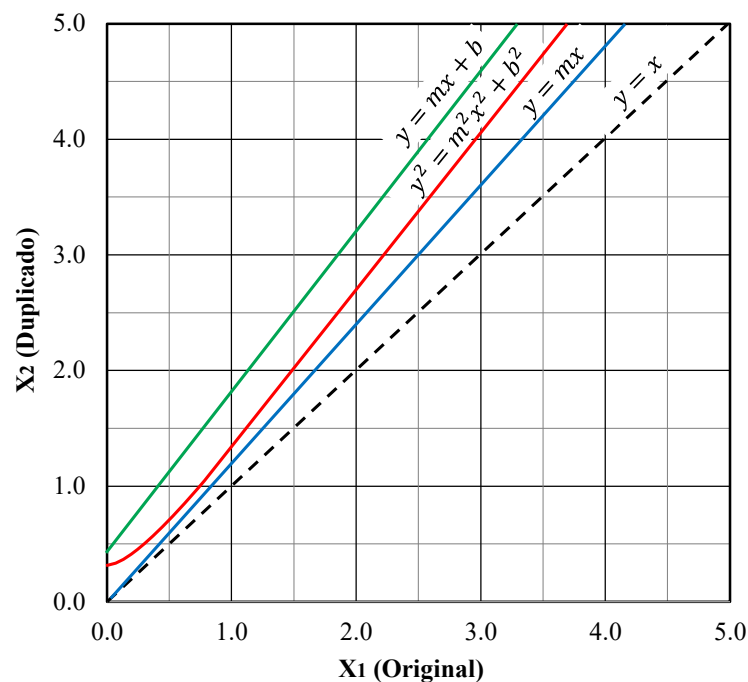


Figura 5. Comparación entre las líneas de fallas (Simon, 2004, modificado por el autor)

El error de precisión, entonces, se cuantifica a partir de los datos emparejados mediante la evaluación de la dispersión de los puntos de datos con correcciones de la línea  $y=x$  (Abzalov, 2011) o por la línea  $y^2 = m^2x^2 + b^2$  (Simon, 2004), estos diagramas proporcionan un medio para visualizar los datos duplicados obtenidos durante un programa analítico e implican trazar el resultado inicial en el eje X ( $X_1$ ) y los datos duplicados en el eje Y ( $X_2$ ) con líneas de control que representan un nivel de precisión determinado (es decir, 5%, 10%, 20%); de esta manera, si todos los datos se encuentran dentro de las líneas de control, entonces los datos son precisos y si los datos se encuentran fuera de las líneas de control, no son precisos hasta dicho nivel (Figura 6).

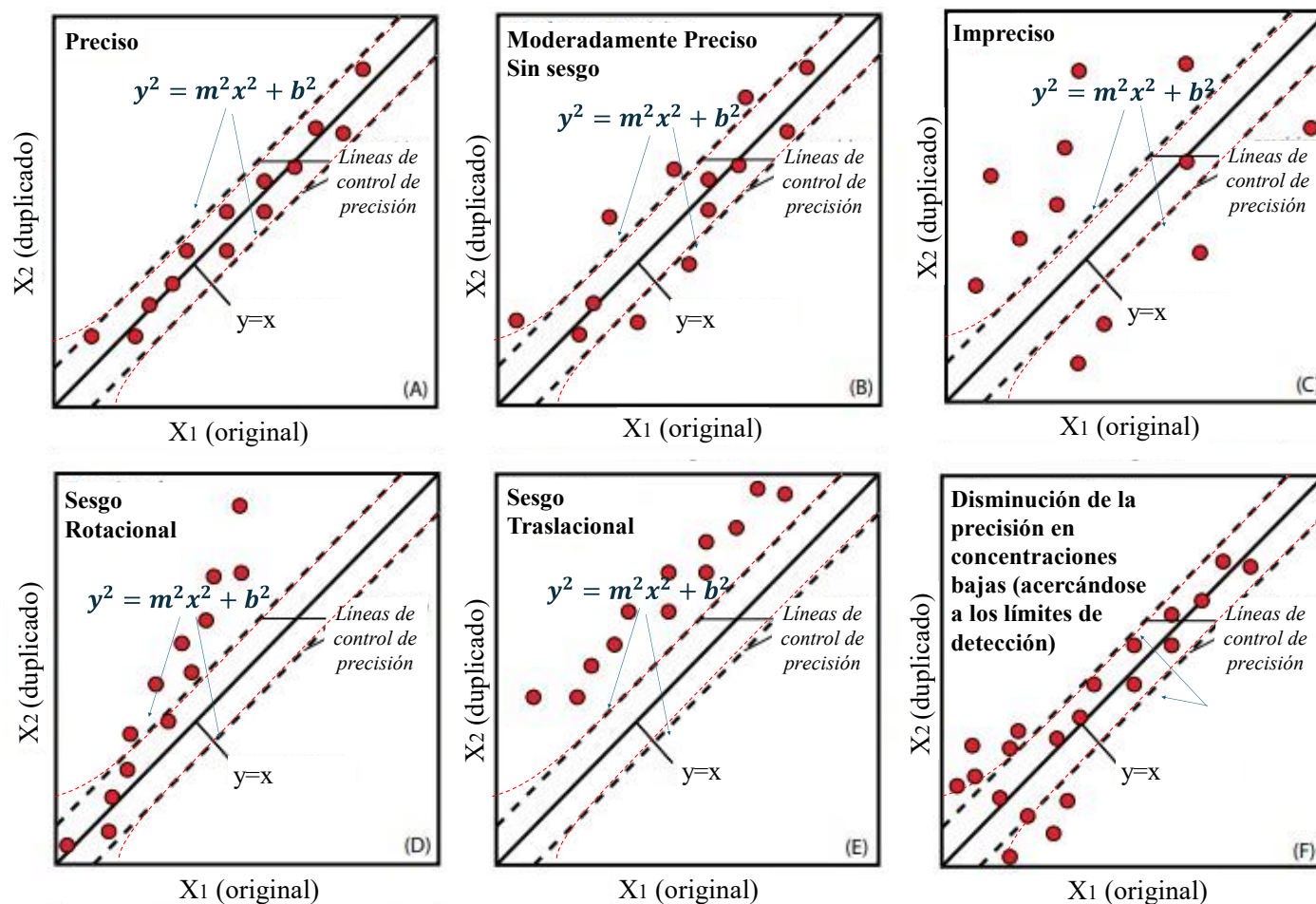


Figura 6. Diagramas de dispersión para calcular la precisión que comparan resultados analíticos de muestras duplicadas versus originales. (A) Datos precisos que se encuentran dentro de las líneas de control. (B) Datos moderadamente precisos con dispersión que sugiere que no hay sesgo. (C) Datos muy imprecisos con una distribución “escopeta”. (D) Datos con sesgo rotacional. (E) Datos con sesgo traslacional. (F) Precisión decreciente con la concentración.

Fuente: Modificado de Fletcher, (2002).

Hay diversos factores que pueden conllevar a un mal análisis de la exactitud, por lo que se recomienda (Simon, 2011):

- Verificar los resultados de los valores de los estándares al evaluar la exactitud de manera oportuna, además almacenar los estándares de manera correcta asegurando que no haya contaminación o degradación.
- Implementar un programa de calidad eficaz y completo para mantener una frecuencia regular de inserción de estándares.
- Insertar estándares preparados y documentados de manera adecuada, correspondiente a la ley y composición de la mineralización de las muestras originales, además manteniendo el anonimato del mejor valor con el laboratorio.
- Controlar la manipulación de datos que pueden conllevar a un mal etiquetado, mezcla de estándares y/o contaminación.

#### *2.2.3.2. Control de la Exactitud*

La exactitud de las muestras se controla incluyendo muestras con ley conocida certificada estadísticamente en el lote de muestras analizadas, denominadas muestras de referencia o estándares y se pueden obtener en laboratorios comerciales donde se hayan preparado y analizado rigurosamente siguiendo los procedimientos apropiados (Kane, 1992). Para esto, la mejor práctica es preparar estándares a partir de material mineralógicamente similar al de la mineralización estudiada, estos se denominan estándares de matriz coincidente, que se incluyen en un lote de muestras y se analizan juntas en el mismo laboratorio (Abzalov, 2011). Es necesario mencionar que la exactitud disminuye a medida que el valor del elemento se acerca al Límite de Detección (LOD) de un método analítico; por lo que es importante utilizar materiales de referencia con un rango de concentraciones conocido para evaluar la precisión en función de la concentración del analito determinado (Piercey, 2014).

En la industria minera moderna para garantizar que las muestras sean precisas, se analiza el sesgo de los materiales de referencia y se identifican los errores y sus posibles causas (Leaver et al. 1997; Sketchley 1998); en este sentido, se construyen gráficos de control de Shewart para cada estándar y cada elemento estudiado, este es un método eficaz ya que permite analizar la deriva instrumental y el sesgo (Croaking & Tobias, 2006); en este gráfico, el eje X representa la fecha de análisis ordenado de manera cronológica y el eje

Y contiene los valores obtenidos para cada estándar, además incluye valores constantes correspondientes a valores como el Mejor Valor (MV), promedio ( $\bar{x}_v$ ) y, la sumatoria del promedio y dos o tres veces la desviación estándar ( $\bar{x}_v \pm 2SD$ ,  $\bar{x}_v \pm 3SD$ ), estos dos últimos calculados a partir de los valores obtenidos. El sesgo analítico  $S_a$  es calculado de la siguiente manera:

$$S_a(\%) = \left( \frac{\bar{x}_v}{MV} \right) - 1$$

Fórmula 4. Fórmula del sesgo para calcular la exactitud

El sesgo es considerado aceptable si su valor absoluto es inferior a 5%, arriesgado si se encuentra entre 5% a 10%, e inaceptable cuando supera el 10% (Simon, 2004). El gráfico de Shewart, no solo permite el seguimiento continuo de los datos de cada nuevo lote analítico, sino que también permiten el seguimiento del rendimiento del laboratorio a lo largo del tiempo (Piercey, 2014).

El Método de Reconocimiento de Patrones, se basa en que los patrones de distribución de los resultados analíticos son indicativos de las fuentes y tipos de errores en el análisis de estándares certificados (Leaver et al. 1997; Sketchley 1998; Abzalov 2008); de esta manera, el análisis de buena calidad se caracterizará por distribuciones aleatorias de los puntos de datos alrededor del promedio en este diagrama (Figura 7A) y el 95% de los puntos de datos estarán dentro de dos desviaciones estándar del promedio y solo el 5% de los ensayos pueden estar fuera del intervalo de dos desviaciones estándar del promedio. Sin embargo, en algunos casos, la presencia de tales "valores atípicos" (Figura 7B) probablemente indique errores de transcripción de datos, esto no implica sesgo, más bien indica una mala gestión de los datos, lo que sugiere posibles errores aleatorios en la base de datos (Abzalov, 2008). El sesgo de los datos es fácilmente reconocible por un cambio constante en los ensayos de una muestra estándar (Figura 7C); por lo general, esto ocurre debido a una calibración fallida del equipo o a cambios en los procedimientos analíticos en el laboratorio. Un patrón de distribución menos común es cuando la dispersión de los valores de los estándares disminuye rápidamente (Figura 7D), esta disminución se interpreta comúnmente como indicativa de manipulación de datos (Sketchley 1998). Los análisis se caracterizan por la falta de tendencias de datos en los diagramas de Shewart; sin embargo, una desviación sistemática de los valores suele indicar una posible desviación instrumental o la degradación de las muestras debido a condiciones inadecuadas de almacenamiento (Figura 7E).

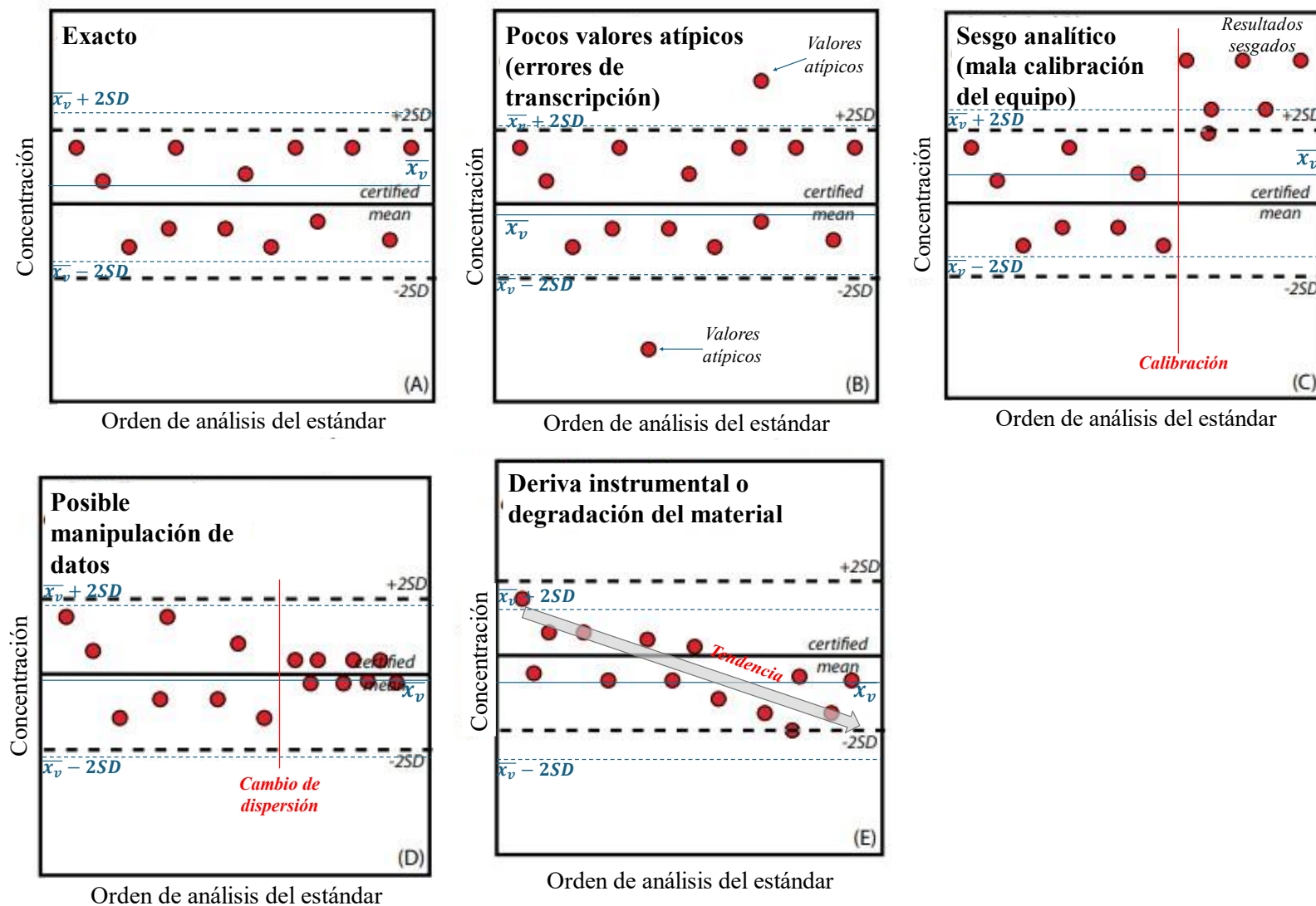


Figura 7. Método de Reconocimiento de Patrones en el gráfico de control Shewart para muestras estándares.  
Fuente: Modificado de Piercey, (2014) y Abzalov, (2008).

Existen reglas rigurosas a seguir al monitorear los resultados de laboratorio (Piercey, 2014):

- Cualquier valor único que se encuentre fuera de dos desviaciones estándares del valor certificado, o cuatro muestras seguidas que se encuentren fuera de una desviación estándar con sesgo positivo o negativo debe ser alerta para monitorear la base de datos.
- Cada vez que hay dos valores seguidos que se encuentren fuera de dos desviaciones estándar o una muestra fuera de tres desviaciones estándar de la media del valor certificado, debería ser motivo de preocupación.

La evaluación inadecuada de la precisión, generalmente, es el resultado de no respetar las condiciones de repetibilidad; sin embargo, hay otros factores que pueden conllevar a un mal análisis, por lo que se recomienda (Simon, 2011):

- Procesar de manera oportuna los valores obtenidos de los duplicados.
- Implementar un programa de calidad eficaz y completo para mantener una frecuencia regular de inserción de duplicados y realizar pruebas granulométricas para monitorear el chancado y pulverizado.
- Mantener la repetibilidad de la muestra usando los mismos equipos y métodos para recolectar y analizar la muestra original y duplicado.
- Controlar la manipulación de datos que pueden conllevar a un mal etiquetado y/o contaminación.

#### *2.2.3.3. Control de la Contaminación*

Para determinar una posible contaminación durante la preparación y el análisis de las muestras debido, por ejemplo, a una limpieza deficiente de los equipos de trituración y pulverización, se insertan muestras tipo blancos que comúnmente es cuarzo estéril y contiene concentraciones bajas del metal de interés, es decir, generalmente, está por debajo del límite de detección de laboratorio. Estas muestras se pueden enviar como blancos gruesos con fragmentos mayores a una pulgada de diámetro o blancos de pulpa o material estéril pulverizado. Como práctica recomendada, las muestras tipo blanco siempre deben insertarse después de muestras mineralizadas (Simon & Gosson, 2008).

Abzalov (2008) recomienda utilizar el gráfico control de Shewart para analizar las muestras tipo blanco de manera similar a lo realizado para monitorear la exactitud, donde en el eje X están los análisis del blanco de manera cronológica y en el eje Y los resultados obtenidos para el elemento de interés; sin embargo, Simon (2004) recomienda preparar gráficos de “Blancos versus Muestra Precedente”, en donde en el eje Y están los valores reportados para los blancos y en el eje X los valores de las muestras precedentes, dependiendo del material se utilizará un límite de aceptabilidad como un múltiplo entero del límite de detección analítica: de 6 a 10 para blancos gruesos y de 3 a 5 veces para blancos finos; este tipo de gráfico permite identificar los eventos de contaminación cruzada de muestras ricas a los blancos y la posible existencia de un patrón de contaminación como una limpieza insuficiente del equipo; por lo que, estas muestras generalmente se insertan después de muestras de mineralización de alta ley y, si el equipo no se ha limpiado adecuadamente, los blancos lo detectarán fácilmente al mostrar leyes altas del material de interés (Figura 8).

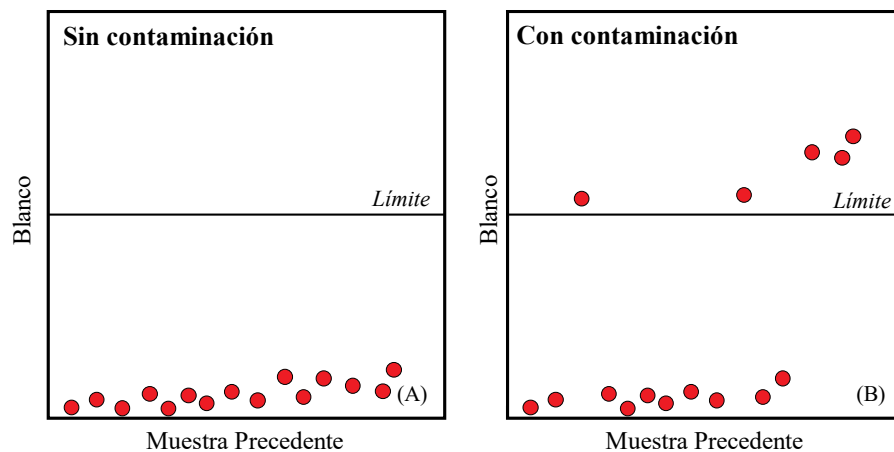


Figura 8. Diagramas para evaluar la contaminación. (A) Las muestras están debajo del límite. (B) Existen muestras por encima del límite, por lo que serán necesarias su revisión para detectar en qué proceso hubo contaminación.

Fuente: Modificado de Fletcher, (2002).

Hay diversos factores que pueden conllevar a un mal análisis de la contaminación durante la preparación y el análisis de las muestras, por lo que se recomienda (Simon, 2011):

- Verificar los resultados de los valores de los blancos al evaluar la contaminación de manera oportuna, además almacenar los blancos de manera correcta asegurando que no haya contaminación o degradación.

- Implementar un programa de calidad eficaz y completo para mantener una frecuencia regular de inserción de blancos.
- Insertar blancos certificados de manera adecuada con leyes suficientemente bajas que permitan detectar una posible contaminación, además manteniendo el anonimato del mejor valor con el laboratorio.
- Controlar la manipulación de datos que pueden conllevar a un mal etiquetado, mezcla de estándares y/o contaminación.

#### 2.2.4. Programa de Aseguramiento y Control de la Calidad

Los códigos internacionales que regulan los informes geológicos como JORC (Australia, Nueva Zelanda), NI-43-101 (Canadá), SAMREC (Sudáfrica) utilizan programas de aseguramiento y control de calidad, que cuantifican y monitorean los posibles errores en cualquier etapa de las pruebas analíticas y proporcionan información para optimizar el procedimiento de muestreo y análisis para minimizar errores (Bariatska, 2022).

Según el Instituto Canadiense de Minería, Metalurgia y Petróleo (CIM, 2018; 2019), durante el proceso de exploración mineral, se debe garantizar que exista el programa de aseguramiento de la calidad (QA) complementado con la implementación de medidas de control de calidad (QC) necesarias para confirmar y documentar la exactitud y precisión de los resultados analíticos mediante la inserción de duplicados, materiales de referencia o estándares y blancos (Figura 9).

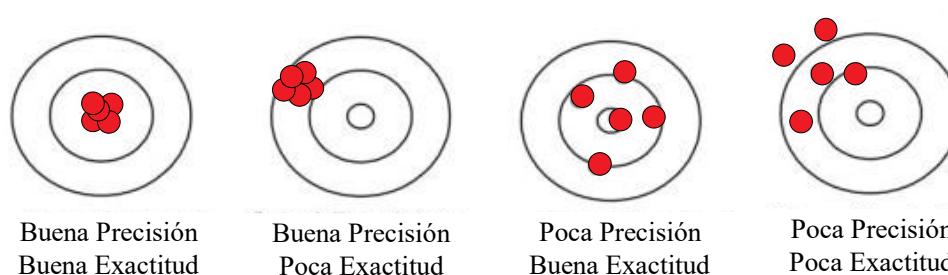


Figura 9. Explicación de la precisión y exactitud de los datos

Fuente: Abzalov, (2008).

El Programa de Aseguramiento y Control de Calidad (QA/QC) debe ser sistemático y aplicarse a las campañas de muestreo superficial y/o perforación, y a todos los resultados analíticos, por lo que, se deben realizar periódicamente auditorías de los métodos y procedimientos utilizados por el laboratorio que realiza los ensayos químicos. Este

programa, debe ser apropiado para el tipo de muestra y la mineralización existente, y planificarse e implementarse como componente integral del programa de exploración.

Se deben documentar los resultados del programa describiendo las acciones y criterios de aprobación o rechazo de los resultados para que cualquier error o discrepancia pueda abordarse de manera oportuna, recordando que los errores dentro de un programa son acumulativos, por lo tanto, pequeños errores a lo largo del muestreo y análisis pueden resultar en grandes errores en los resultados analíticos (Stanley, 2003).

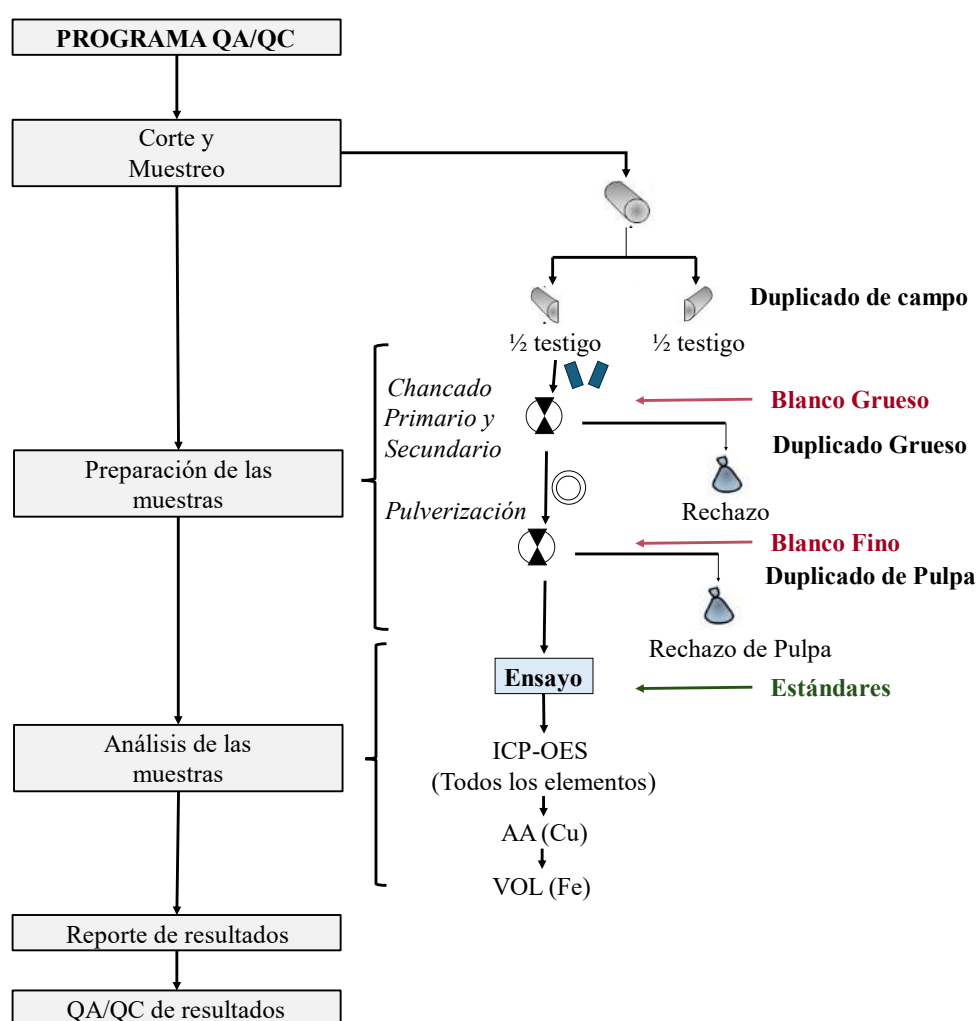


Figura 10. Flujograma resumido del proceso de muestreo, preparación, análisis y QA/QC de resultados.

Fuente: Modificado de Abzalov, (2008).

De manera resumida, el Programa de Aseguramiento y Control de la Calidad (Figura 10) inicia con el muestreo, es el primer paso de cualquier programa analítico y debe tener una “cadena de custodia” clara y documentada, con un número limitado de personas responsables de la interacción con el laboratorio; en general, para evitar posibles

manipulaciones durante el transporte desde el campo al laboratorio, las muestras deben colocarse en bolsas de alta calidad y selladas con bridas o cintas adhesivas además deben etiquetarse con un código único y secuencial. Durante el muestreo y la preparación de la muestra, es necesario garantizar que los equipos se limpien constantemente; ya que, a menudo, la mayor fuente de contaminación ocurre durante las primeras etapas de preparación de la muestra (Abzalov, 2011). Posteriormente, las muestras, generalmente, se analizan con métodos de lectura como la espectrometría de emisión de plasma acoplado inductivamente (ICP-ES) y la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), la utilización de disolución parcial como agua regia o cuatro ácidos puede ser apropiada para metales bases asociados a mineralización de sulfuros y la solución resultante se analiza usando ICP-ES para elementos principales y oligoelementos de alta concentración y ICP-MS para oligoelementos. En algunos casos, se utilizan métodos adicionales, como espectroscopia de absorción atómica (AA) para metales básicos de alta concentración, ensayo al fuego (FAA) para muestras con Au y métodos volumétricos para Fe (VOL) (Piercey, 2014).

La frecuencia de inserción de duplicados, estándares o blancos depende del objetivo de la investigación, ya que los datos que se obtengan se utilizarán para la toma de decisiones futuras debido a la estimación de la calidad e incertidumbre de los datos (Potts, 2012); sin embargo no se ha encontrado una definición clara de un estándar en la industria (Simon, 2011), de esta manera, Rogers (1988) analiza la diferencia entre los estándares de la industria y las mejores prácticas, señalando que lo ampliamente aceptado o el estándar en la industria no debe confundirse con las mejores prácticas, ya que hay muchos procedimientos aceptados por la industria minera que son adecuados en algunas situaciones pero inadecuados en otras debido a que esa aceptación no es universal. Por lo tanto, se han propuesto numerosas estimaciones para el número de inserciones de las muestras de control, así Garrett (1969) sugirió una frecuencia del 10%, mientras que Sketchley (1998) sugirió una frecuencia del 20%, Abzalov (2008) sugirió una frecuencia del 5 al 10 % para duplicados de campo o muestras gemelas y duplicados de rechazos gruesos; del 3 al 5% de las muestras deben ser duplicados de pulpa, materiales de referencia y blancos; y alrededor del 5% de las muestras duplicadas deben procesarse y analizarse en un laboratorio externo; y Simon (2004) recomienda que en un principio las muestras de control deberían estar entre 20% y 25% del número total de muestras enviadas a laboratorio (Tabla 3).

Tabla 3. Tasas de inserción sugeridas por varios autores

| <b>Fuente</b>      | <b>Detalles</b>                                                                                                                                                                                      | <b>% Inserción</b> |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Rogers (1988)      | Duplicados, estándares, blancos: 1 cada 20, controles externos 5%                                                                                                                                    | 20%                |
| Vallée (1998)      | 10% duplicados y estándares                                                                                                                                                                          | 15%                |
| Neuss (1988)       | 2%-5% de duplicados de campo, 2%-5% de duplicados gruesos, 5%-10% de duplicados de pulpa, 5%-10% de controles externos más un estándar y un blanco en cada envío                                     | 19%-25%            |
| Long (2000, 2003)  | 5% de duplicados gruesos, 5% duplicados de pulpa, 5% estándares, un blanco por cada lote (aprox. 3%), controles externos 3%.                                                                         | 21%                |
| Sketchely (1998)   | Cada 20 muestras: un blanco, un estándar, un duplicado; además todas las pulpas deben analizarse en un laboratorio secundario                                                                        | 20%                |
| Bloom (1999)       | Cada 20 muestras: un blanco, un estándar y enviar una de cada diez muestras a un laboratorio secundario.                                                                                             | 20%                |
| Lomas (2004)       | Cada 20 muestras: un blanco, un estándar, un duplicado grueso, un duplicado de pulpa; y 5% de las pulpas deben ser analizadas en un laboratorio secundario (incluidos estándares)                    | 25%                |
| Simon (2011)       | Duplicados (6%): duplicados de campo o muestras gemelas 2%, duplicados gruesos 2%, duplicados de pulpa 2%; estándares 6%, blancos (4%): blancos gruesos 2%, blancos finos 2%, controles externos 4%. | 20%                |
| Almendinger (2018) | Duplicados de campo o muestras gemelas 2%-5%, duplicados de pulpa 2%-5%, estándares 5%-6%, blancos gruesos 2%, blancos finos 2%, controles externos 5%.                                              | 20%                |
| Dominy (2020)      | Cada 20 muestras: un duplicado de campo o muestras gemelas, un duplicado grueso, un duplicado fino, un estándar, un blanco, un control externo.                                                      | 30%                |

Fuente: Simon, (2007) y Bariatska, (2023)

En general, si se detectan errores, se recomienda el siguiente proceso de verificación y/o solución (Simon, 2004):

- Para todos los tipos de muestras de control: revisar los valores de las muestras vecinas, con el fin de identificar posibles confusiones o cambios en la posición de las muestras y de ser necesario repetir los análisis de las muestras de control fallidas junto con algunas muestras vecinas, o el lote entero si el error subsiste.
- Para los duplicados (muestras gemelas): revisar los testigos, para comprobar si los intervalos muestreados corresponden realmente con los valores reportados.

- Para los blancos: requerir al laboratorio mejoras en los procedimientos de preparación y análisis.
- Adicionalmente, llevar a cabo una auditoría de laboratorio puede agregar un valor significativo a cualquier Programa de QA/QC (Sterk, 2015).

### 2.3. Definición de Términos Básicos

**Blanco:** muestra de roca con valores muy bajos o no detectables del elemento de interés, se utiliza para controlar la contaminación durante la preparación y análisis. (Long, 2000).

**Contaminación:** introducción de cualquier sustancia a una muestra geológica que no se encuentre en la ubicación original de la muestra. (Long, 2000).

**Duplicados:** una división de la muestra original analizada por el mismo laboratorio en la misma condición analítica que la muestra original. (Long, 2000).

**Exactitud:** la cercanía de las mediciones a un “verdadero” valor. (Long, 2003).

**Lote:** recolección total de material del que se requiere estimar algún componente. (Simon, 2004)

**Material de referencia:** Son muestras que se utilizan para probar la exactitud, deben insertarse a intervalos regulares y tener una matriz, rango de elementos y concentraciones similares a las muestras a analizar, además de estar certificados con la misma técnica analítica y de digestión que se utiliza durante un programa analítico. (Piercey, 2014)

**Muestra Gemela:** Dos o más muestras intermedias de un mismo rango, obtenidas bajo condiciones similares, al mismo tiempo, usualmente como resultado de la separación de una única muestra intermedia. La diferencia relativa entre la masa y la composición de las muestras gemelas es una variable al azar con media cero, además monitorean errores de muestreo, preparación y análisis. (Simon, 2004).

**Muestreo Geoquímico:** el método geoquímico de exploración o prospección es un método indirecto e incluye diversas metodologías basándose en la medición sistemática de una o varias propiedades químicas del material naturalmente formado; de esta manera el muestreo geoquímico es la manera de obtener muestras representativas de un determinado material natural, colectado de una manera estandarizada y sistemática. (Simon, 2004)

**Precisión:** capacidad de reproducir consistentemente una medida, los datos precisos se agrupan en torno a un valor promedio. (Long, 2000).

**Sesgo:** agrupación de datos por encima o por debajo de una medida aceptada, puede ser causado por un muestreo sistemático o error analítico. (Long, 2000)

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Ubicación de la Investigación

El área de estudio se encuentra localizado políticamente en el distrito de San Juan de Marcona, en la provincia de Nazca, departamento de Ica; correspondiente al Cuadrángulo de Marcona (31-m) 18S. El Proyecto Fortuna se encuentra ubicado dentro del distrito minero Marcona a 800 m.s.n.m. al suroeste de Nazca (Ver Anexo 01).

##### 3.1.1. Ubicación Política

Tabla 4. Ubicación Política de la zona de estudio

| <b>Zona</b>      | <b>Distrito</b>     | <b>Provincia</b> | <b>Departamento</b> | <b>N° Carta Geológica</b> |
|------------------|---------------------|------------------|---------------------|---------------------------|
| Proyecto Fortuna | San Juan de Marcona | Nazca            | Ica                 | 31-m                      |

##### 3.1.2. Ubicación Geográfica

Tabla 5. Ubicación Geográfica de la zona de estudio (UTM Datum WGS-84)

| <b>Vértice</b> | <b>Longitud</b> | <b>Latitud</b> |
|----------------|-----------------|----------------|
| V1             | 488350          | 8325450        |
| V2             | 491350          | 8325450        |
| V3             | 491350          | 8322450        |
| V4             | 488350          | 8322450        |

### 3.1.3. Accesibilidad.

Para llegar al área del proyecto, contamos con un acceso vía terrestre desde Lima hasta el desvío a Marcona (489 Km), luego por la ruta PE-30 hasta llegar al proyecto (20 Km), con tiempo de viaje de 8 horas aproximadamente (Ver Figura 11).

Tabla 6. Distancia, tiempo y condiciones de la accesibilidad al área de estudio.

| <b>Tramo</b>                      | <b>Km</b> | <b>Tiempo (Horas)</b> | <b>Condición de Vía</b> |
|-----------------------------------|-----------|-----------------------|-------------------------|
| Lima-Desvío a Marcona             | 489       | 7                     | Asfaltada               |
| Desvío a Marcona-Proyecto Fortuna | 20        | 1                     | Asfaltada               |

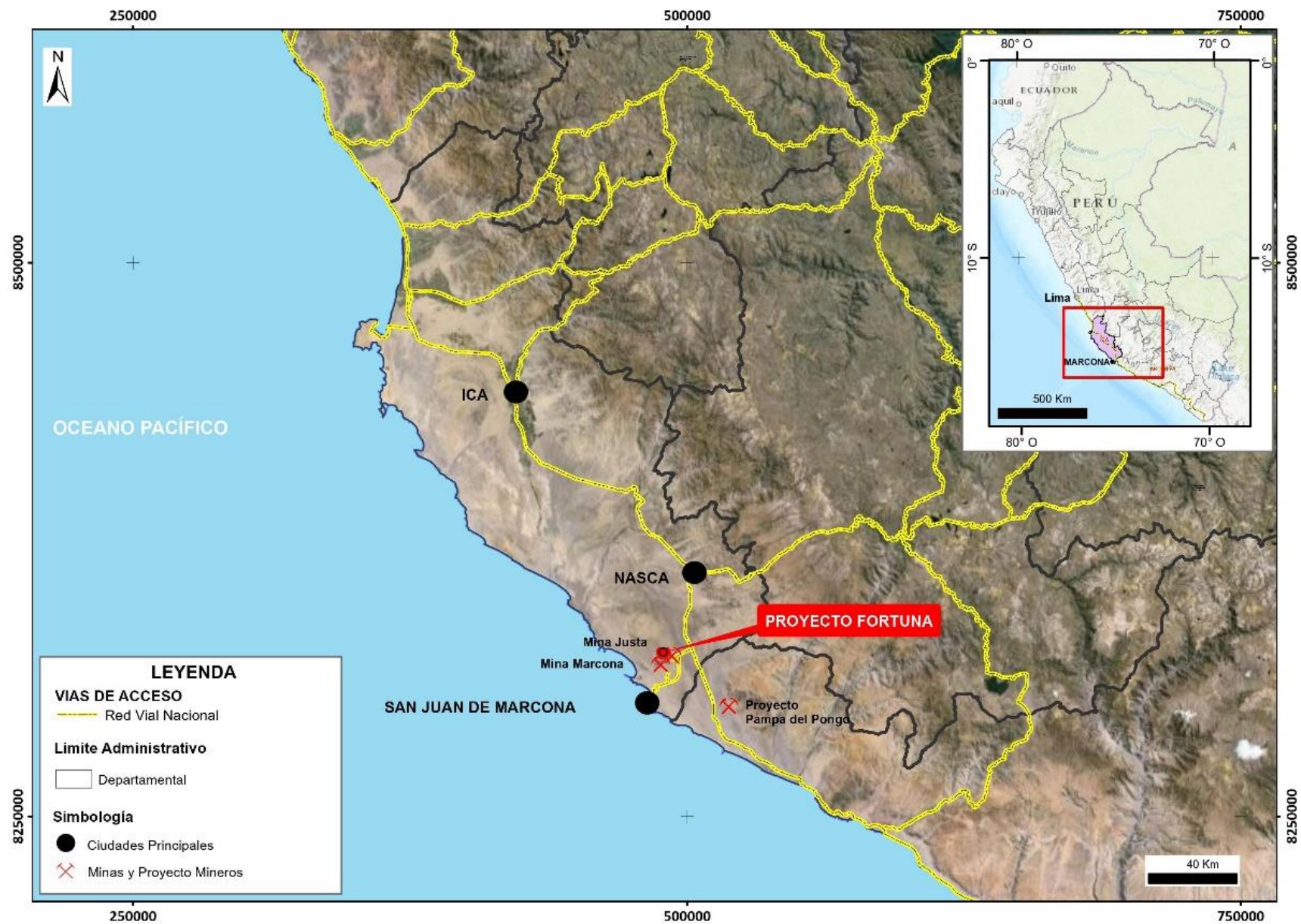


Figura 11. Ubicación del Proyecto Fortuna

### **3.2. Procedimientos**

#### **3.2.1. Etapa Preliminar de Gabinete.**

Esta etapa consistió en la búsqueda de información de tesis, libros, investigaciones y artículos científicos relacionados con el control de la calidad en el muestreo geoquímico para identificar oportunidades de mejora en el Protocolo de Aseguramiento y Control de la Calidad existente, además se realizó una revisión litológica, de alteración y mineralización para identificar dónde tomar las mejores muestras duplicadas y se insertarán los blancos, además se estudió a detalle los certificados de los estándares para comprender el análisis al que se someterán las muestras estudiadas.

#### **3.2.2. Etapa de Campo.**

De acuerdo con la revisión litológica, de alteración y mineralización se tomaron las muestras geoquímicas de los sondeos de manera sistemática y se insertaron las muestras de control necesarias para asegurar la precisión, exactitud y la ausencia de contaminación siguiendo el protocolo. Posteriormente, se enviaron estas muestras a laboratorio para ser analizadas por método de digestión vía agua regia y lectura mediante Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES) con las indicaciones siguientes: si excede el valor del límite por ICP se realizará lectura por Absorción Atómica (AA) o Volumetría (VOL).

#### **3.2.3. Etapa Final de Gabinete.**

Con los resultados analíticos geoquímicos de las muestras de control obtenidos por el laboratorio, se calcula el error relativo de la precisión y el sesgo de la exactitud mediante gráficos de dispersión y gráficos de control de Shewart para los elementos necesarios; adicionalmente, también se determina la posible contaminación si existiera.

### **3.3. Metodología de la Investigación**

#### **3.3.1. Enfoque de la Investigación**

El enfoque de la investigación es cualitativo-cuantitativo, ya que se califica y cuantifica el nivel de precisión y exactitud del muestreo geoquímico utilizando indicadores estadísticos como el error relativo y el sesgo respectivamente (Hernández et al., 2014).

### 3.3.2. Alcance de la Investigación

El alcance de la investigación es descriptivo-correlacional-explicativo, ya que busca describir las características del control de calidad en el muestreo geoquímico, para, de esta manera, correlacionar las variables de precisión y exactitud y explicar al identificar causas que influyen en la calidad del muestreo (Hernández et al., 2014).

### 3.3.3. Método de la Investigación

El método de investigación es deductivo-inductivo, ya que parte de teorías generales sobre el control de calidad en el muestreo geoquímico para formular hipótesis que luego se verifican con los datos, para después analizar los resultados y extraer conclusiones sobre la precisión y exactitud en el muestreo (Hernández et al., 2014).

### 3.3.4. Población de Estudio

Todas las muestras geoquímicas en el Proyecto Fortuna en un área de 9.0 Km<sup>2</sup>.

### 3.3.5. Muestra

Puntos de muestreo en el Proyecto Fortuna.

### 3.3.6. Unidad de Análisis

La unidad de análisis es la ley de Cu y Fe, que luego se utilizan para calcular el error relativo y el sesgo.

### 3.3.7. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

La primera etapa de la investigación consiste en la recopilación bibliográfica de estudios previos; posteriormente, se procederá con la toma muestras geoquímicas en los sondeos diamantinos de manera sistemática y su posterior envío a laboratorio para ser analizadas por método de digestión vía agua regia y lectura mediante Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES), si excede el valor del límite de detección determinado por el laboratorio se realizará el análisis por lectura Absorción Atómica (AA) o Volumetría (VOL).

### 3.3.8. Análisis e Interpretación de Datos

El análisis e interpretación de los datos se realizará en gabinete, para lo cual se tendrán los resultados analíticos geoquímicos de las muestras de control, con los que se procederá a calcular el error relativo de la precisión y el sesgo de la exactitud mediante gráficos y

hojas de cálculo en el software Microsoft Excel; además se realizarán los mapas en el software ArcGIS 10.5.

### **3.4. Unidades Morfogenéticas**

El área de estudio según su génesis es principalmente de origen eólico (Fotografía 1), es decir, producido por la acción del viento debido al ambiente árido del Proyecto Fortuna donde el viento es el principal agente geológico en la erosión, transporte y depositación de sedimentos (Fotografía 2); sin embargo, también se encuentran unidades morfogenéticas de relieve ígneo como los asociados al Batolito de la Costa (Fotografía 3).



Fotografía 1. Predominancia de unidades morfogenéticas eólicas debido al ambiente desértico.



Fotografía 2. Presencia de nebhkas o dunas obstaculizadas por vegetación, además de dunas.

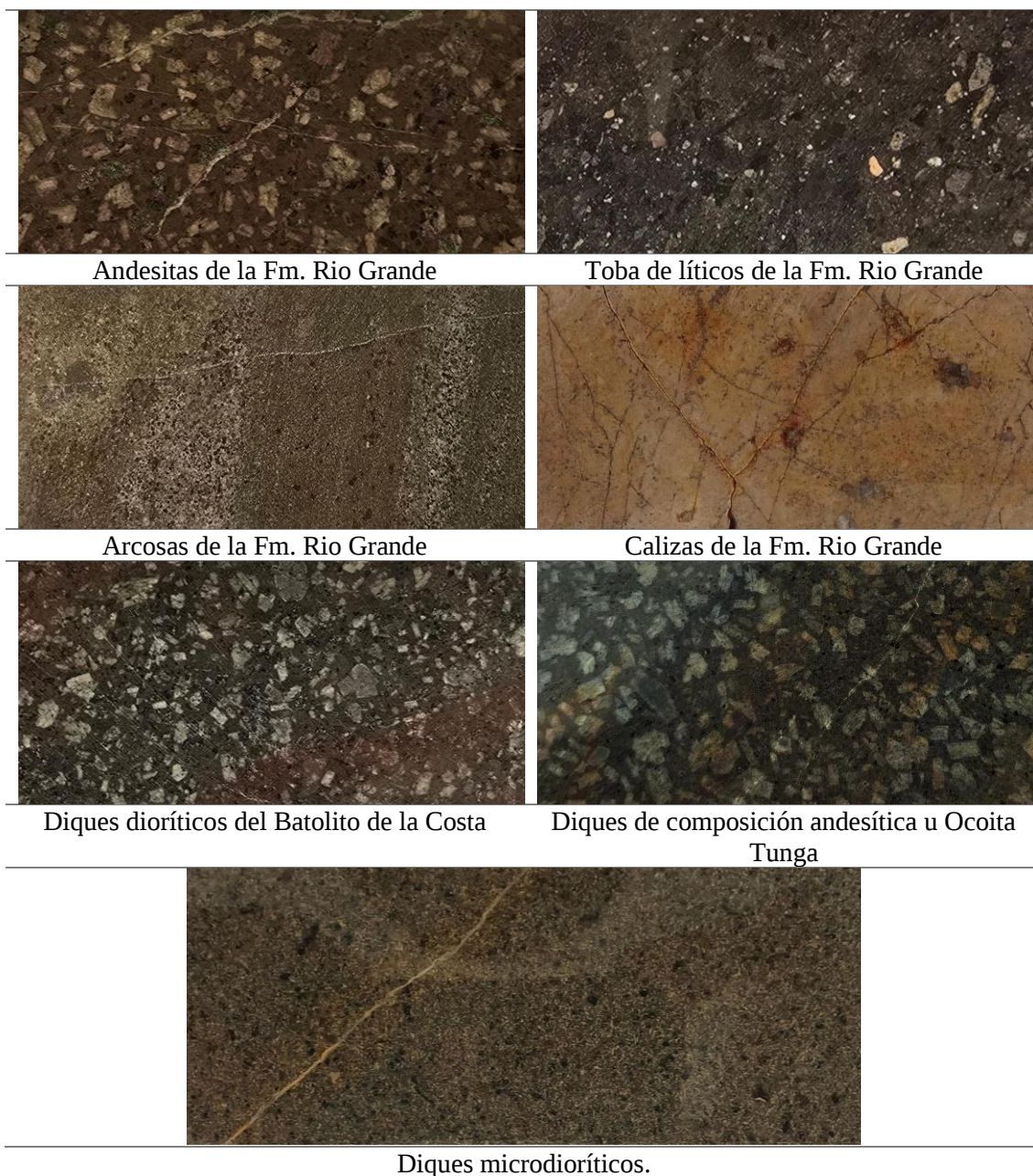


Fotografía 3. Campo de regolito que incluye depósitos eólicos y fragmentos de rocas volcanoclástica de la Formación Río Grande, además de relieve intrusivo relacionado al Batolito de la Costa.

### 3.5. Geología Local

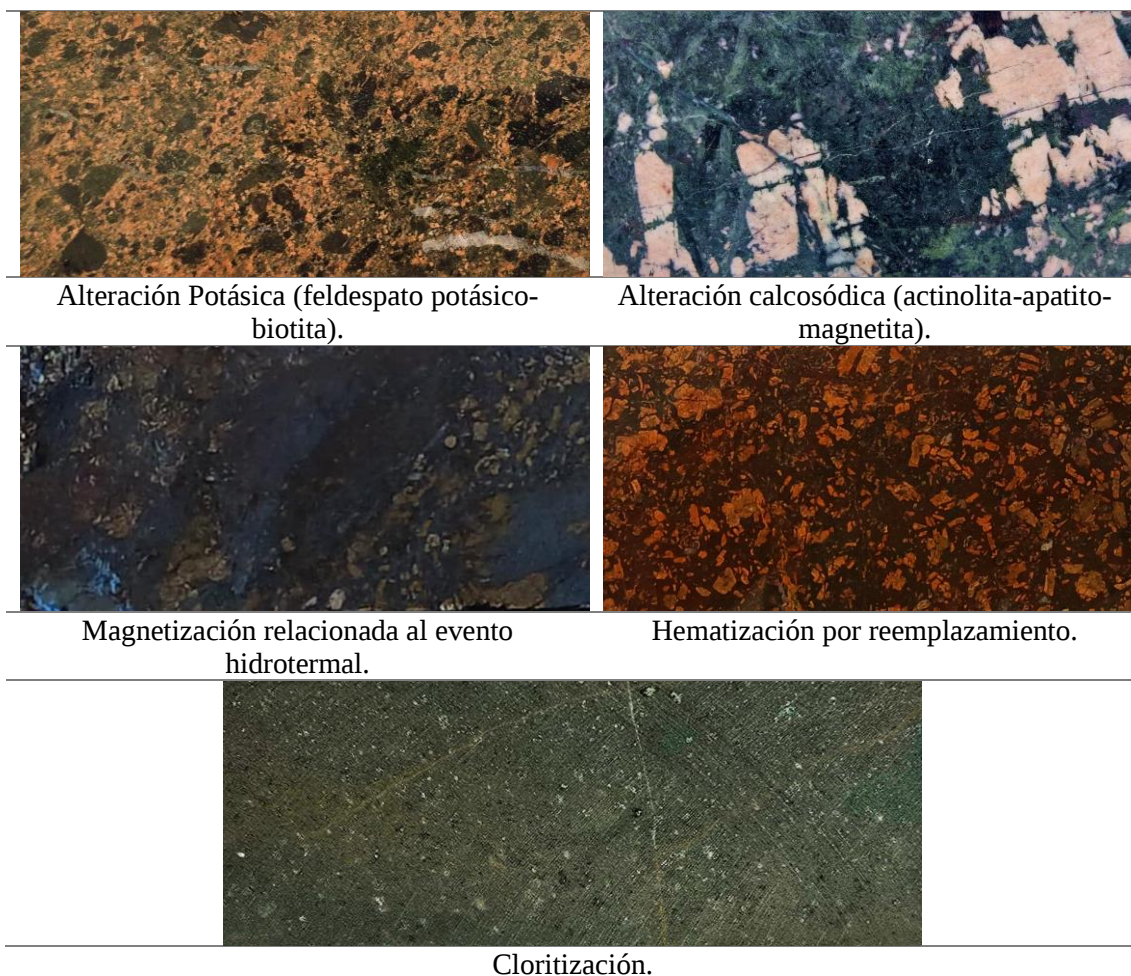
El Proyecto Fortuna está ubicado en el Cinturón Costero del Perú con tendencia Noroeste, donde la placa de Nazca se subduce debajo de la Placa Sudamericana formando un margen continental activo. Se reconocen rocas cámbricas de la Formación Marcona que contienen cuerpos económicos de hierro (magnetita), a la cual se superpone por discordancia erosional la formación volcanosedimentaria del Río Grande del Jurásico Medio a Cretácico Inferior, que se ha reconocido como metalotecto para depósitos tipo IOCG y las formaciones post mineral de Jahuay, Yauca y Pisco. La secuencia volcánico-sedimentaria se formó dentro de un arco volcánico, y en el sector sureste existen plutones del Batolito de la Costa que, a su vez, se encuentra intruida por diques de andesita porfirítica conocida como ocoita (109 Ma) (Chen, 2008) (Figura 12).

Estratigráficamente, el Proyecto Fortuna está ubicado en la Formación Río Grande que está intruida por diques de composición diorítica del Batolito de la Costa con rumbo NO-SE y diques andesíticos (ocoitas), y un evento tardío de diques microdioríticos con rumbo NE-SO (Fotografía 4).



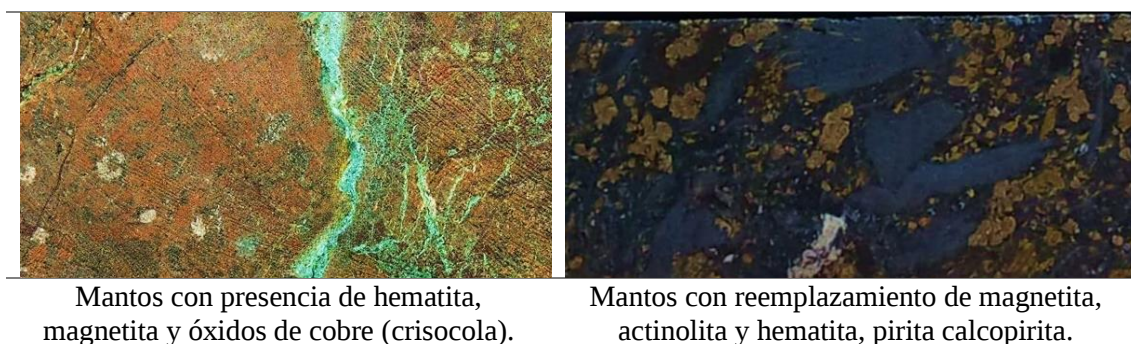
Fotografía 4. Litología en el Proyecto Fortuna.

Se han identificado eventos de alteración hidrotermal asociados a los mantos de magnetita con alteración calcosódica; sin embargo, también se identificaron alteración potásica, hematítica y cloritización que afectan principalmente a la roca caja (Fotografía 5).



Fotografía 5. Tipos de alteración en el Proyecto Fortuna.

La mineralización se desarrolla en mantos, vetillas y diseminado, compuesta por sulfuros (pirita y calcopirita), y óxidos de cobre (Fotografía 6). Para la edad de mineralización se toma como referencia a Mina Justa, es decir, aprox. 160-155 Ma (Moody, 2003).



Fotografía 6. Mineralización en el Proyecto Fortuna.

| COLUMNA ESTRATIGRÁFICA REGIONAL |                |                |                                                                         |                       |                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|---------------------------------|----------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|
| ERA                             | EDAD (Ma)      | PERIODO        | ÉPOCA                                                                   | FM.                   | REGISTRO LITOLÓGICO                                                                                                                                                                                          | DESCRIPCIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | EVENTOS INTRUSIVOS                                                                                           | EDAD DE MINERALIZACIÓN                                                                                                                                                                      |  |  |
| CENOZOICO                       |                | Cuaternario    | Holoceno                                                                | Cuaternario 100m.     | Q                                                                                                                                                                                                            | Q: depósitos eólicos, coluviales, aluviales, fluviales.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 | 2.58           |                |                                                                         |                       |                                                                                                                                                                                                              | Discordancia Erosional                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 | 5.33           | Neógeno        | Plioceno                                                                | Fm. Sencca 100m0      | VOLR_SE                                                                                                                                                                                                      | VCR_SE: Tobs de coloración blanca a gris rosácea de composición riolítica.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 |                |                | Mioceno                                                                 | Fm. Pisco 400m.       | SR_PI                                                                                                                                                                                                        | SR_PI: Grava, conglomerado, arenisca de color amarilla fosilífera y arenisca conchífera tobácea.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Ocoita Tunga? Complejo Bella Unión?                                                                          | Mina Justa Chen, 2008 Ar-Ar 99.1±0.94Ma Veta calcita-calcopirita Ar-Ar 101.5±0.7Ma Magnetita-pirita-microclina Ar-Ar 110.9±0.94Ma Actinolita Ar-Ar 103.7Ma Veta pirita-magnetita-microclina |  |  |
| MESOZOICO                       | 23.03          | 77.47 Ma hiato |                                                                         |                       |                                                                                                                                                                                                              | Discordancia Erosional                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 | 100.5          |                |                                                                         |                       |                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              | Batolito de la Costa INGGEMMET, 2014 U-PB 101.7±1.4Ma Diorita (zircón) Unidad Linga-Acari                                                                                                   |  |  |
|                                 |                | Cretácico      | Inferior (Aptiense, Albiense, Berriaciense, Valanginiense, Barremiense) | Fm. Copara 1000m.     | VOLR_CO                                                                                                                                                                                                      | VOLR_CO: Unidad volcánica, flujo andesítico de textura porfírica de coloración gris violeta. VCR_CO: Unidad volcanoclástica (lahar), fragmentos polimícticos de tamaños heterométricos, y matriz soportada. SR_CO: Unidad sedimentaria, conformada por arcosa y limolita rojiza.                                                                                                                                                                      | Vidal, 1990 K-Ar 109±4Ma Pórfido Dacita (roca total) Hierro Acari K-Ar 113±2Ma Diorita cuarzosa Huaricangana |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 |                |                |                                                                         |                       | SR_CO                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 |                |                |                                                                         | Fm. Yauca 300m        | HYP_BU                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 |                |                |                                                                         |                       | VCR_CO                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 |                | Jurásico       | Superior (Kimmeridgiense, Titoniense, Oxfordiense)                      | Fm. Jahuay 500m       | SR_CO                                                                                                                                                                                                        | SR_YA: Unidad sedimentaria, conformada por estratos delgados de arenisca cuarzosa, arenisca feldespática, lutita bituminosa gris oscura a rojiza y horizontes de caliza chert.                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 |                |                |                                                                         |                       | HYP                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 |                |                |                                                                         |                       | SR_YA                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 | 145.0          |                |                                                                         | Fm. Rio Grande 1500m. | ?                                                                                                                                                                                                            | VOLR_JA: Unidad volcanoclástica conformada por toba de líticos y toba de cristales. SR_JA: Unidad sedimentaria, arenisca cuarzosa intercalada con limolita gris en capas delgadas con horizontes de caliza gris azulada intercalada con flujos volcánicos.                                                                                                                                                                                            |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 |                |                |                                                                         |                       | VOLR_JA                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 |                |                |                                                                         |                       | VOLR_JA                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 | 157.3 ±1.0     | Jurásico       | Medio (Calloviense)                                                     | Fm. Rio Grande 1500m. | HYP?                                                                                                                                                                                                         | VOLR_RG: Unidad volcánica, flujos andesíticos de textura porfírica, amigdalóidea y fluidal. VCR_RG: Unidad volcanoclástica, toba de líticos, toba de cristales y brechas volcánicas andesíticas. SR_RG: Unidad sedimentaria, caliza, arenisca calcárea y arcosa de textura clástica con niveles de grano grueso y fino, en los niveles calcáreos presenta fósiles (gasterópodo-turritelas y bivalvos) intercalados con flujos de unidades volcánicas. |                                                                                                              | Mina Justa (160-155Ma) Moody, 2003                                                                                                                                                          |  |  |
|                                 |                |                |                                                                         |                       | VOLR_RG                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 |                |                |                                                                         |                       | UNDIFF                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 |                |                |                                                                         |                       | VCR_RG                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
| 163.5 ±1.0                      |                |                |                                                                         | OCO_TUN               | SR_MA: Unidad sedimentaria, caliza recristalizada, arenisca calcárea y arenisca cuarzosa. MR_MA: unidad metamórfica, hornfels, mármol dolomítico, cuarcita gris oscura, láminas de chert y esquistos verdes. | Batolito San Nicolás (444Ma-448Ma) Mamani, 2012                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Marcona 160±4-154±4 164-150Ma Injoque, 1998; Vidal, 1990                                                     |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 | VOLR_RG        |                |                                                                         |                       |                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 | SR_RG          |                |                                                                         |                       |                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 | HYP            |                |                                                                         |                       |                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
| 166.1 ±1.2                      | 324.3 Ma hiato |                | Medio (Calloviense)                                                     | Fm. Rio Grande 1500m. | VCR_RG                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 |                |                |                                                                         |                       | VOLR_RG                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
| PALEOZOICO                      | 485.4 ±1.9     | Cámbrico       | ?                                                                       | Fm. Marcona 1000m.    | SR_RG                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 |                |                |                                                                         |                       | SR_MA                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 | 541.0 ±1       |                |                                                                         |                       | MR_MA                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |
|                                 |                |                |                                                                         |                       | MDRT_DK                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                                                                             |  |  |

| LEYENDA                   |                              |                       |                             |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Unidades Estratigráficas  |                              | Rocas Intrusivas      | Mineralización              |
| Cuaternario               | Fm. Copara (Volcanoclástico) | Dique microdiorítico  | Unidad Hidrotermal (UNDIFF) |
| Fm. Sencca                | Fm. Yauca (Sedimentario)     | Intrusivo hipoabisal. |                             |
| Fm. Pisco                 | Fm. Yauca (Volcánico)        | Complejo Bella Unión  |                             |
| Fm. Copara (volcánico)    | Fm. Jahuay (Volcánico)       | Ocoitas               |                             |
| Fm. Copara (Sedimentario) | Fm. Jahuay (Sedimentario)    | Batolito de la Costa  |                             |
|                           |                              | Batolito San Nicolás  |                             |

Figura 12. Columna Estratigráfica Regional

Fuente: Marcobre, (2021).

### 3.6. Geología Estructural

El proyecto está controlado estructuralmente hacia el Este por el sistema andino (NO-SE) de fallas La Huaca de movimiento normal-dextral, hacia el Norte y al Sur se encuentra controlado por fallas del sistema Repetición (Repetición II y Fortuna) con una dirección NE-OSO con movimiento normal-dextral y buzando hacia el Sureste. Este último sistema es el que ha favorecido la inyección de fluidos hidrotermales ricos en Cu-Fe en el proyecto.

El sistema de falla Huaca (NO-SE), según el diagrama de diedros la dirección del esfuerzo compresivo principal ( $\sigma_1$ ) es N245°, el esfuerzo de distensión ( $\sigma_3$ ) tiene una dirección de N57° y el  $\sigma_2$  que está relacionada con la zona de apertura tiene una dirección de N150°. Mientras que el sistema de falla Repetición (NE-SO) según el diagrama de diedros la dirección del esfuerzo compresivo principal ( $\sigma_1$ ) es N325°, el esfuerzo de distensión ( $\sigma_3$ ) tiene una dirección de N140° y el  $\sigma_2$  que está relacionada con la zona de apertura tiene una dirección de N230° (Anexo N°03).

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Protocolo de Control de Calidad

El protocolo de control de calidad tiene como objetivo ayudar a detectar problemas en la toma de datos de manera temprana y ayuda a tomar acciones correctivas necesarias de manera rápida, esto ayuda a, probablemente, reducir costos y garantizar que solo se obtengan datos confiables.

De esta manera, en el Proyecto Fortuna, luego de establecer los objetivos del programa de muestreo geoquímico de los 10 sondajes (Tabla 7), se realiza el corte y muestreo de zonas prospectables con intervalos máximos de 2m (Figura 13), seguido de la preparación y análisis de las muestras, y finalmente se realiza el reporte y QA/QC de resultados.

Tabla 7. Resumen del programa de perforación del Proyecto Fortuna

| <b>Sondaje</b> | <b>Este (X)</b> | <b>Norte (Y)</b> | <b>Cota (Z)</b> | <b>Dip</b> | <b>Azimuth</b> | <b>Profundidad (m)</b> |
|----------------|-----------------|------------------|-----------------|------------|----------------|------------------------|
| For1           | 489690.00       | 8325364.00       | 777.00          | -90°       | 0°             | 300.00                 |
| For2           | 489836.00       | 8323574.00       | 792.00          | -90°       | 0°             | 300.00                 |
| For3           | 491083.00       | 8324510.00       | 773.00          | -90°       | 0°             | 300.00                 |
| For4           | 488765.00       | 8323665.00       | 818.00          | -90°       | 0°             | 300.00                 |
| For5           | 491111.00       | 8323007.00       | 779.00          | -90°       | 0°             | 300.00                 |
| For6           | 490355.00       | 8322510.00       | 772.00          | -90°       | 0°             | 300.00                 |
| For7           | 489687.00       | 8322533.00       | 760.00          | -90°       | 0°             | 300.00                 |
| For8           | 490859.00       | 8324162.00       | 759.00          | -90°       | 0°             | 300.00                 |
| For9           | 490702.00       | 8325260.00       | 780.00          | -90°       | 0°             | 300.00                 |
| For10          | 488811.00       | 8325190.00       | 774.00          | -90°       | 0°             | 300.00                 |

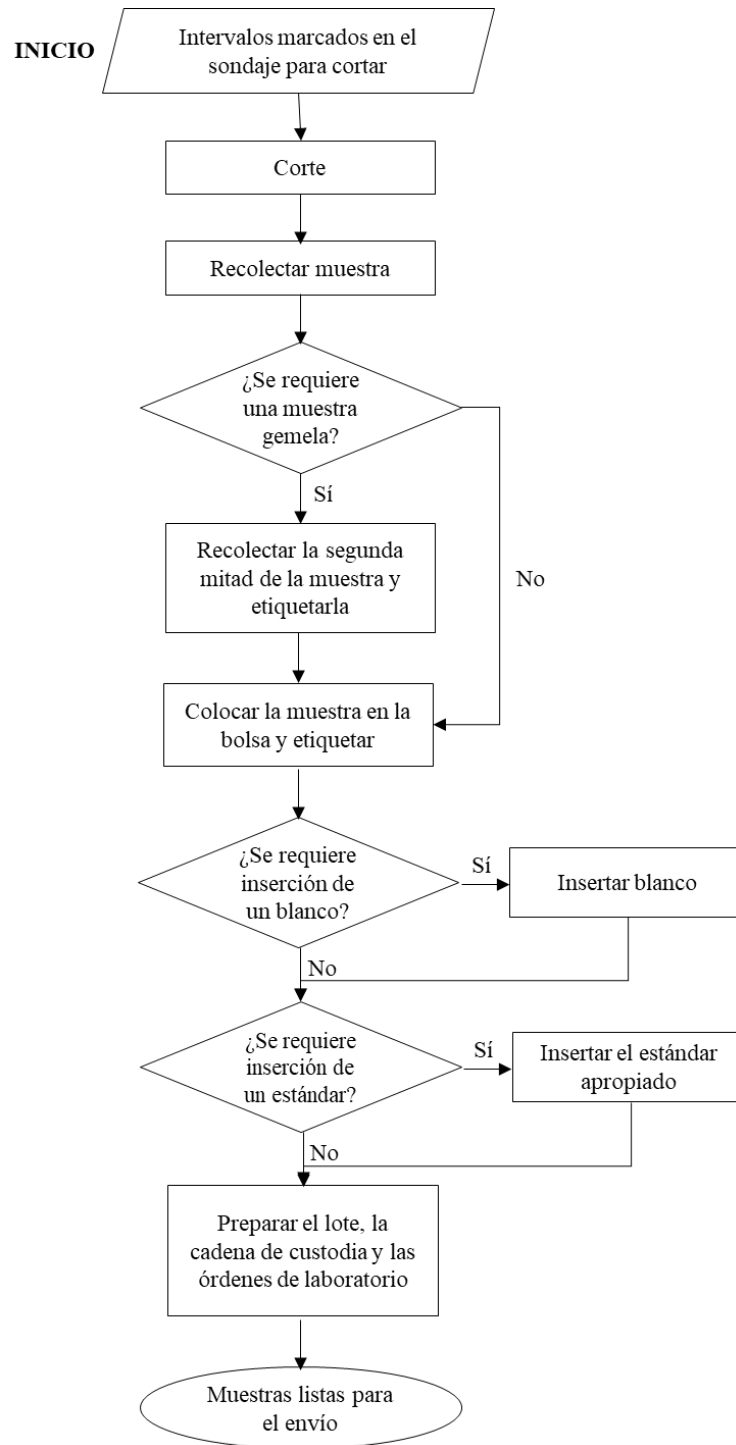


Figura 13. Flujograma del proceso de corte y muestreo en el Proyecto Fortuna.

La preparación y análisis de muestras en el Proyecto Fortuna se realizó en el laboratorio de SGS del Perú en la sede del Callao donde luego del pesado y secado se reduce la granulometría hasta malla 140 para luego ser analizadas químicamente (Figura 14).

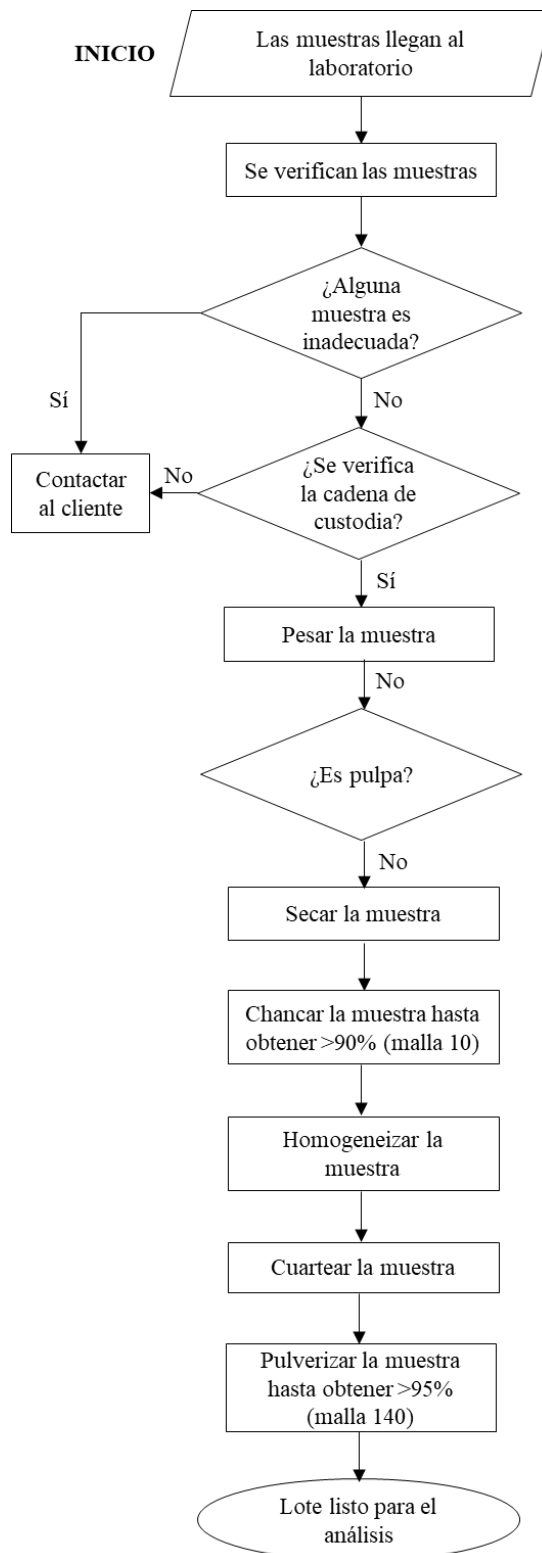


Figura 14. Flujograma del proceso de preparación de muestras en el Proyecto Fortuna.

Luego de la preparación, las muestras pasan por un proceso de digestión por agua regia y lectura ICP-OES reportando 39 elementos; sin embargo, se reanaliza una lectura por AA

(absorción atómica si excede el límite de detección del Cu y por VOL (método volumétrico) si excede el límite del Fe (Figura 15).

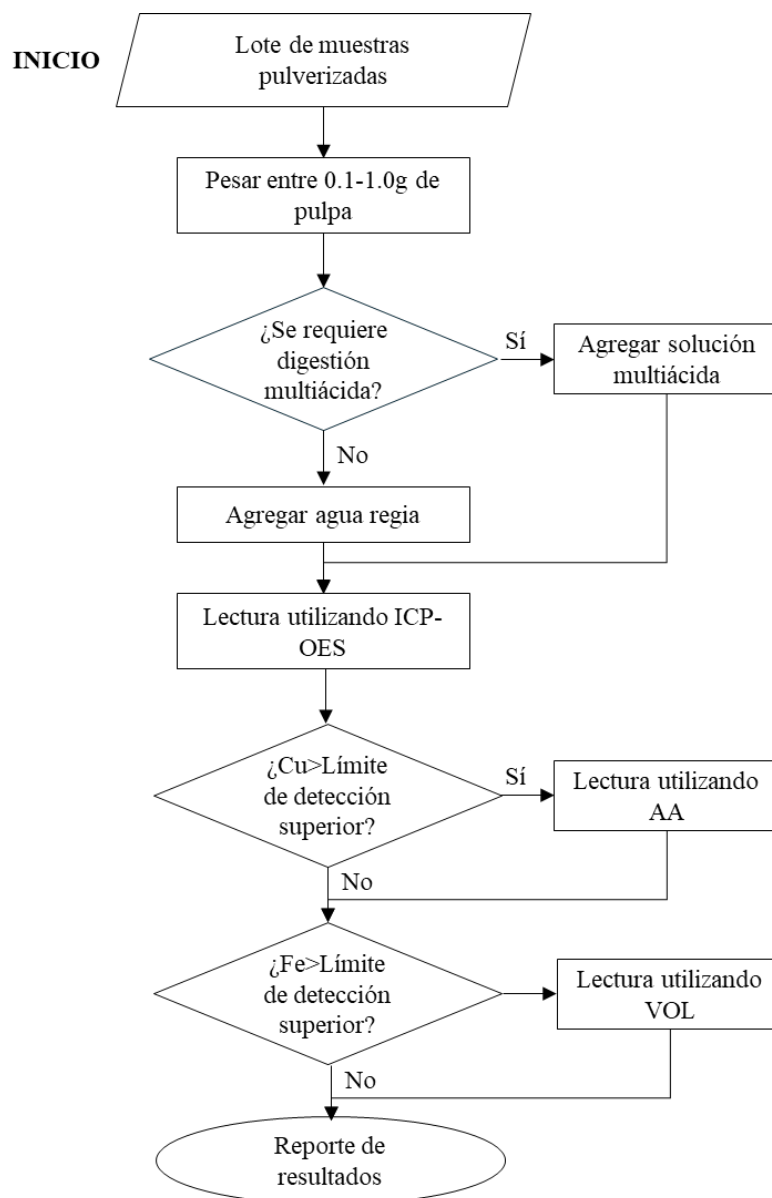


Figura 15. Flujograma del proceso de análisis de muestras en el Proyecto Fortuna.

Finalmente, se realiza la el QA/QC de las muestras control utilizando gráficos de control de Shewart para los estándares y los blancos, y diagramas de dispersión para los duplicados, para de esta manera analizar la exactitud, contaminación y precisión respectivamente (Figura 16).

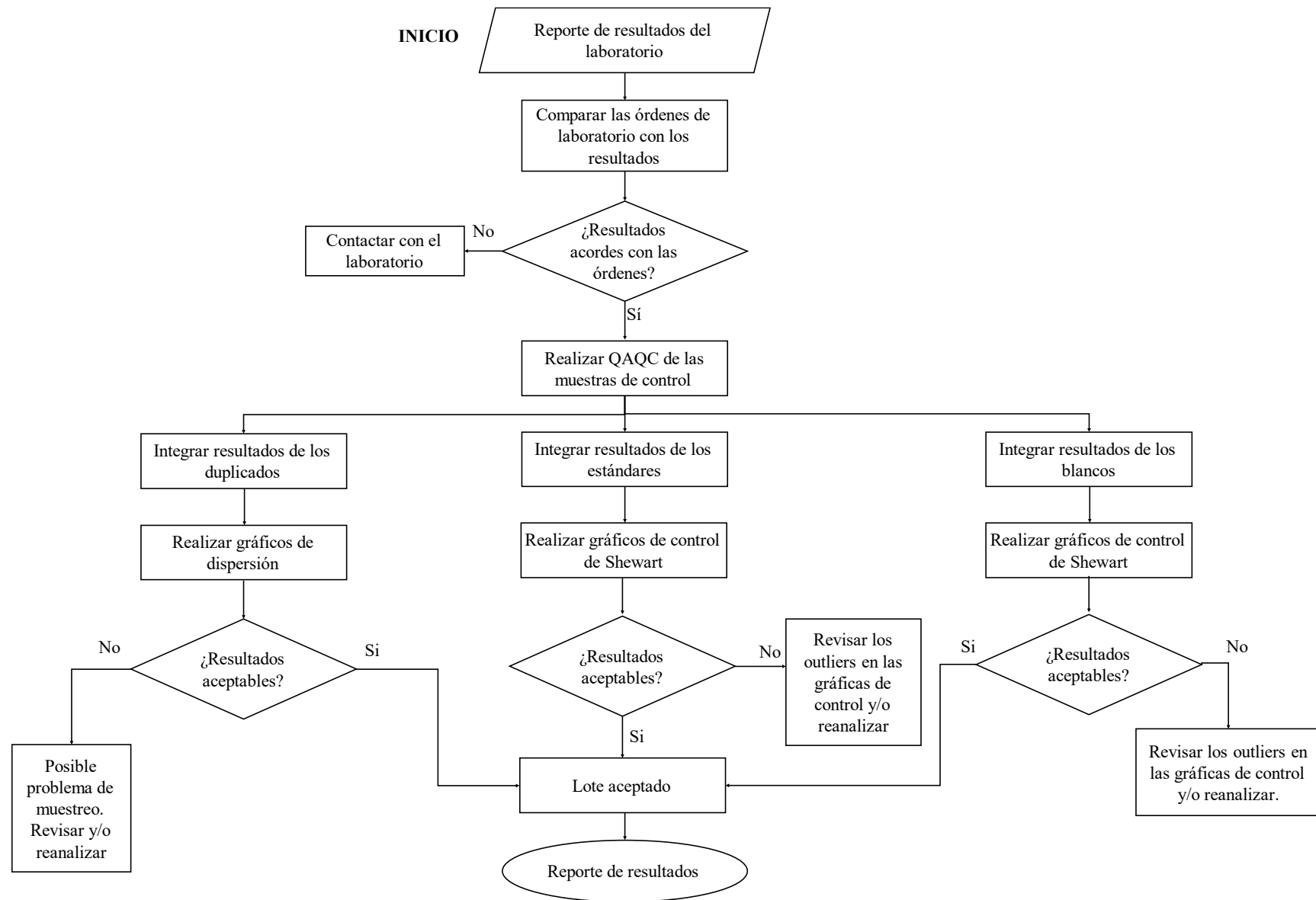


Figura 16. Flujograma del proceso de interpretación de QA/QC en el Proyecto Fortuna.

## 4.2. Ratio de Inserción de Muestras de Control

Considerando las buenas prácticas de muestreo, se siguieron las recomendaciones de Simon (2011) para así asegurar que el laboratorio realice los trabajos con los estándares más altos de calidad bajo las normas internacionales, por lo que, durante la campaña de perforación en el Proyecto Fortuna en los diez sondeos la tasa de inserción fue de 17.3%, que es superior a la recomendada para la industria. (Tabla 8 y Tabla 9).

Tabla 8. Comparación entre la tasa de inserción recomendada y la tasa de inserción en el Proyecto Fortuna

|                   |                        | Tasa de Inserción<br>(Simon, 2011) | Tasa de Inserción<br>(Proyecto Fortuna) | Nro. de<br>muestras |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------|
| <b>Estándar</b>   | Material de referencia | 6.0%                               | 5.6%                                    | 50                  |
| <b>Duplicados</b> | Muestras gemelas       | 2.0%                               | 2.9%                                    | 26                  |
|                   | Duplicado grueso       | 2.0%                               | 2.1%                                    | 19                  |
|                   | Duplicado fino         | 2.0%                               | 2.1%                                    | 19                  |
| <b>Blancos</b>    | Blanco grueso          | 2.0%                               | 2.3%                                    | 21                  |
|                   | Blanco fino            | 2.0%                               | 2.3%                                    | 21                  |
| <b>Total*</b>     |                        | 16.0%                              | 17.3%                                   | 156                 |

\*De un total de 900 muestras originales

Siguiendo el protocolo de muestreo para mantener la calidad de los datos geológicos que van a respaldar la estimación de recursos, se realizó el trabajo de la siguiente manera:

- Estándar o materiales de referencia: la inserción fue de 5.6% y se utilizaron tres tipos de estándares que cubren el umbral de ley alta, media y baja.
- Muestras gemelas: la inserción fue de 2.9% y mide la precisión del muestreo de la línea de corte establecida por el geólogo.
- Duplicado grueso: la inserción fue de 2.1% y evalúa la precisión del submuestreo, se toma durante la precisión inmediatamente después del chancado secundario y es obtenido mediante el cuarteador rotatorio.
- Duplicado fino o de pulpa: la inserción fue de 2.1% y evalúa la precisión del análisis, consiste en una segunda división durante la pulverización de la muestra.
- Blanco grueso: la inserción es de 2.3% y es un material estéril de ¼” que evalúa la contaminación durante el chancado.
- Blanco fino: la inserción fue de 2.3% y es un material estéril de 105µm que evalúa la contaminación durante la pulverización.

Por sondeos se realizó, también, el control de la tasa de inserción y se determinó que para todos los casos se obtuvo un porcentaje mayor al recomendado de 16% (Tabla 9).

Tabla 9. Tasa de inserción por sondeo en el Proyecto Fortuna

| Sondeo | Muestras originales | Número de estándares |           |          | Número de duplicados |                    |                  | Número de blancos |               | Ratio de inserción (%) |
|--------|---------------------|----------------------|-----------|----------|----------------------|--------------------|------------------|-------------------|---------------|------------------------|
|        |                     | Ley baja             | Ley media | Ley alta | Muestras gemelas     | Duplicados gruesos | Duplicados finos | Blancos Gruesos   | Blancos finos |                        |
| For1   | 85                  | 1                    | 2         | 0        | 5                    | 2                  | 2                | 1                 | 1             | 16.5                   |
| For2   | 88                  | 3                    | 4         | 0        | 1                    | 2                  | 2                | 3                 | 3             | 20.5                   |
| For3   | 97                  | 2                    | 2         | 0        | 2                    | 2                  | 2                | 3                 | 3             | 16.5                   |
| For4   | 93                  | 3                    | 1         | 0        | 2                    | 2                  | 2                | 3                 | 3             | 17.2                   |
| For5   | 86                  | 2                    | 2         | 0        | 2                    | 2                  | 2                | 2                 | 2             | 16.3                   |
| For6   | 92                  | 1                    | 3         | 1        | 4                    | 2                  | 2                | 1                 | 1             | 16.3                   |
| For7   | 98                  | 1                    | 4         | 1        | 4                    | 2                  | 2                | 1                 | 1             | 16.3                   |
| For8   | 84                  | 3                    | 4         | 1        | 1                    | 1                  | 1                | 3                 | 3             | 20.2                   |
| For9   | 82                  | 1                    | 2         | 0        | 4                    | 2                  | 2                | 1                 | 1             | 15.9                   |
| For10  | 95                  | 2                    | 3         | 1        | 1                    | 2                  | 2                | 3                 | 3             | 17.9                   |
| Total  | 900                 | 19                   | 27        | 4        | 26                   | 19                 | 19               | 21                | 21            | 16.5                   |

### 4.3. Control de la Precisión

La evaluación de la precisión en las diferentes partes del proceso de muestreo, preparación y análisis de las muestras se realiza utilizando tres tipos de duplicados: muestras gemelas, duplicados gruesos y duplicados finos o de pulpa, respectivamente; la aceptación de los valores se mide con el error relativo; es decir, se considera aceptable el 30% en muestras gemelas, 20% en duplicados gruesos y 10% en duplicados de pulpa. El método utilizado para calcular la precisión fue el Método Hiperbólico (Simon, 2004) que considera el efecto de distorsión provocado por la baja precisión en los valores cercanos al límite de detección para el Cu, Fe y Ag, que fueron 0.00005%, 0.01% y 0.1% respectivamente por el método ICP.

Tabla 10. Parámetros utilizados en el método hiperbólico para el cálculo de la precisión en los duplicados

| Valor    | Muestra Gemela |      | Duplicado grueso |      | Duplicado fino |      |
|----------|----------------|------|------------------|------|----------------|------|
|          | Cu             | Fe   | Cu               | Fe   | Cu             | Fe   |
| <i>m</i> | 1.35           | 1.35 | 1.22             | 1.22 | 1.11           | 1.11 |
| <i>b</i> | 0.0005         | 0.10 | 0.00025          | 0.05 | 0.00015        | 0.03 |

Según la evaluación del error relativo en los duplicados, los tres tipos están por debajo del límite máximo, es decir, son aceptables y cumplen con los parámetros establecidos en la industria.

Tabla 11. Resumen de resultados de los duplicados de Cu utilizados en la perforación del Proyecto Fortuna

| Tipo de Duplicado | Número de datos | Val Atípico | Error Relativo | R <sup>2</sup> |
|-------------------|-----------------|-------------|----------------|----------------|
| Muestra Gemela    | 26              | 1           | 3.8%           | 0.9767         |
| Duplicado Grueso  | 19              | 0           | 0.0%           | 0.9993         |
| Duplicado Fino    | 19              | 0           | 0.0%           | 0.9997         |

Tabla 12. Resumen de resultados de los duplicados de Fe utilizados en la perforación del Proyecto Fortuna

| Tipo de Duplicado | Número de datos | Val Atípico | Error Relativo | R <sup>2</sup> |
|-------------------|-----------------|-------------|----------------|----------------|
| Muestra Gemela    | 26              | 0           | 0.0%           | 0.9892         |
| Duplicado Grueso  | 19              | 0           | 0.0%           | 0.9978         |
| Duplicado Fino    | 19              | 0           | 0.0%           | 0.9996         |

#### 4.3.1. Muestras Gemelas

##### 4.3.1.1. Análisis del Cobre

Se tomaron 26 muestras gemelas, estadísticamente las medidas de tendencia central de las muestras originales como de las muestras gemelas son similares, aunque, hay algunas diferencias en el tercer cuartil y el valor máximo; sin embargo, en la gráfica de distribución las poblaciones se comportan de manera parecida (Tabla 13 y Gráfico 1).

Tabla 13. Estadísticas básicas de las muestras originales y gemelas para el cobre

| Estadísticas        | Muestra original | Muestra gemela |
|---------------------|------------------|----------------|
| Número              | 26               | 26             |
| Media               | 0.0237           | 0.0236         |
| Mediana             | 0.0088           | 0.0094         |
| Q1                  | 0.0024           | 0.0024         |
| Q3                  | 0.0237           | 0.0257         |
| Mínimo              | 0.0003           | 0.0002         |
| Máximo              | 0.1490           | 0.1601         |
| Desviación Estándar | 0.0362           | 0.0356         |
| Varianza            | 0.0013           | 0.0013         |

La diferencia de la desviación estándar se puede interpretar como que los datos de las muestras gemelas están más concentrados alrededor de la media que las muestras

originales, sin embargo, esta diferencia es mínima. Mientras que la varianza al ser idéntica sugiere que la dispersión es la misma en ambos casos, por lo que la variabilidad global es similar.

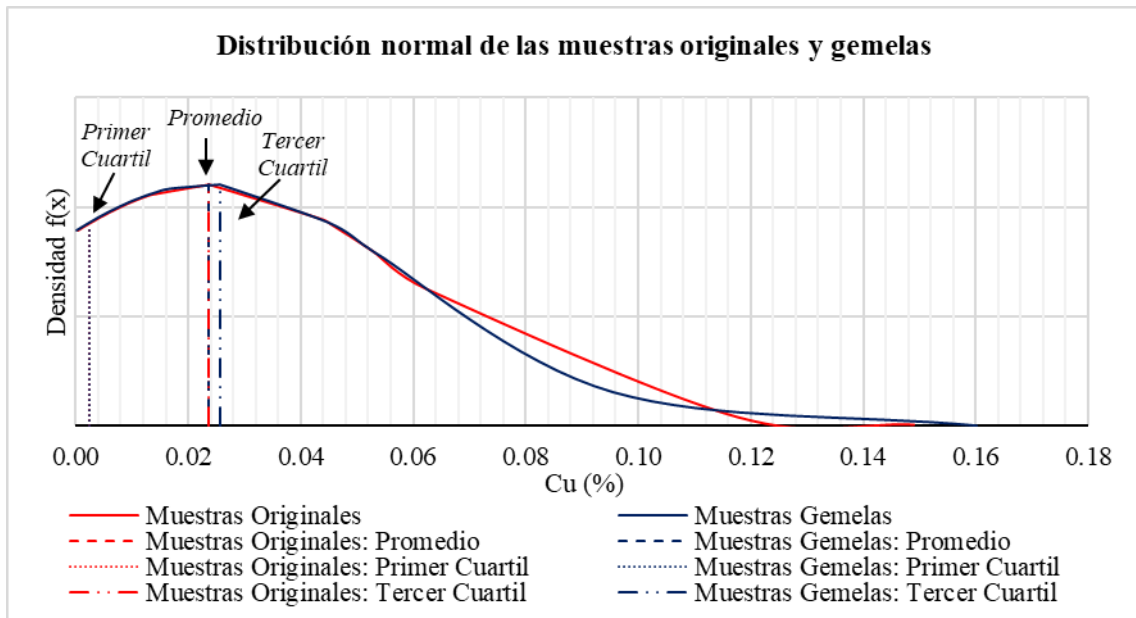


Gráfico 1. Distribución normal de las muestras originales y gemelas para el cobre

En las muestras gemelas la precisión fue aceptable debido a que el error relativo fue de 3.8%, es decir, de los 26 valores, 1 valor se encuentra por encima del valor límite calculado mediante el Método de la Hipérbola (Simon, 2004) para los resultados de Cu; sin embargo, este valor se acepta debido a la variabilidad geológica del depósito que es inherente al muestreo primario (Tabla 14, Gráfico 2 y Gráfico 3).

Tabla 14. Análisis de los resultados de las muestras originales con las muestras gemelas para el cobre

| Sondaje | Desde (m) | Hasta (m) | Prof. (m) | Muestra original | Cu (%) | Muestra gemela | Cu (%) | Min (Cu%) | Máx (Cu%) | Valor límite | Valor atípico |
|---------|-----------|-----------|-----------|------------------|--------|----------------|--------|-----------|-----------|--------------|---------------|
| For1    | 50.00     | 52.00     | 2.00      | 309877           | 0.0621 | 309878         | 0.0531 | 0.0531    | 0.0621    | 0.0717       | No            |
| For1    | 94.00     | 96.00     | 2.00      | 309906           | 0.0232 | 309907         | 0.0258 | 0.0232    | 0.0258    | 0.0314       | No            |
| For1    | 148.00    | 150.00    | 2.00      | 309941           | 0.0117 | 309942         | 0.0168 | 0.0117    | 0.0168    | 0.0158       | Si            |
| For1    | 177.00    | 179.00    | 2.00      | 309959           | 0.0529 | 309960         | 0.0512 | 0.0512    | 0.0529    | 0.0691       | No            |
| For1    | 250.00    | 252.00    | 2.00      | 310002           | 0.0045 | 310003         | 0.0051 | 0.0045    | 0.0051    | 0.0061       | No            |
| For2    | 294.00    | 296.00    | 2.00      | 310031           | 0.0057 | 310032         | 0.0053 | 0.0053    | 0.0057    | 0.0071       | No            |
| For3    | 240.00    | 242.00    | 2.00      | 310062           | 0.0006 | 310063         | 0.0006 | 0.0006    | 0.0006    | 0.0010       | No            |
| For3    | 284.00    | 286.00    | 2.00      | 310090           | 0.0020 | 310091         | 0.0021 | 0.0020    | 0.0021    | 0.0027       | No            |
| For4    | 240.00    | 242.00    | 2.00      | 310125           | 0.0010 | 310126         | 0.0009 | 0.0009    | 0.0010    | 0.0013       | No            |
| For4    | 263.50    | 265.10    | 1.60      | 310139           | 0.1490 | 310137         | 0.1601 | 0.1490    | 0.1601    | 0.2011       | No            |
| For5    | 92.00     | 94.00     | 2.00      | 310182           | 0.0037 | 310178         | 0.0040 | 0.0037    | 0.0040    | 0.0051       | No            |
| For5    | 196.00    | 198.00    | 2.00      | 310248           | 0.0018 | 310249         | 0.0017 | 0.0017    | 0.0018    | 0.0023       | No            |
| For6    | 142.00    | 144.00    | 2.00      | 310275           | 0.0015 | 310274         | 0.0016 | 0.0015    | 0.0016    | 0.0021       | No            |
| For6    | 194.30    | 196.00    | 1.70      | 310329           | 0.0239 | 310328         | 0.0255 | 0.0239    | 0.0255    | 0.0323       | No            |
| For6    | 256.00    | 258.00    | 2.00      | 310354           | 0.0124 | 310353         | 0.0141 | 0.0124    | 0.0141    | 0.0168       | No            |
| For6    | 292.00    | 294.00    | 2.00      | 310385           | 0.0082 | 310384         | 0.0092 | 0.0082    | 0.0092    | 0.0110       | No            |
| For7    | 56.00     | 58.00     | 2.00      | 310426           | 0.0112 | 310427         | 0.0103 | 0.0103    | 0.0112    | 0.0139       | No            |
| For7    | 134.00    | 136.00    | 2.00      | 310521           | 0.0452 | 310522         | 0.0525 | 0.0452    | 0.0525    | 0.0610       | No            |
| For7    | 226.00    | 228.00    | 2.00      | 310566           | 0.0058 | 310567         | 0.0062 | 0.0058    | 0.0062    | 0.0079       | No            |
| For7    | 246.00    | 248.00    | 2.00      | 310592           | 0.0045 | 310593         | 0.0036 | 0.0036    | 0.0045    | 0.0049       | No            |
| For8    | 206.00    | 208.00    | 2.00      | 310629           | 0.0003 | 310630         | 0.0002 | 0.0002    | 0.0003    | 0.0006       | No            |
| For9    | 64.00     | 66.00     | 2.00      | 310693           | 0.0095 | 310694         | 0.0097 | 0.0095    | 0.0097    | 0.0128       | No            |
| For9    | 110.00    | 112.00    | 2.00      | 310723           | 0.0015 | 310724         | 0.0011 | 0.0011    | 0.0015    | 0.0016       | No            |
| For9    | 154.00    | 156.00    | 2.00      | 310751           | 0.0439 | 310752         | 0.0450 | 0.0439    | 0.0450    | 0.0592       | No            |
| For9    | 218.00    | 220.00    | 2.00      | 310798           | 0.1176 | 310799         | 0.0955 | 0.0955    | 0.1176    | 0.1289       | No            |
| For10   | 210.00    | 212.00    | 2.00      | 310855           | 0.0133 | 310856         | 0.0126 | 0.0126    | 0.0133    | 0.0169       | No            |

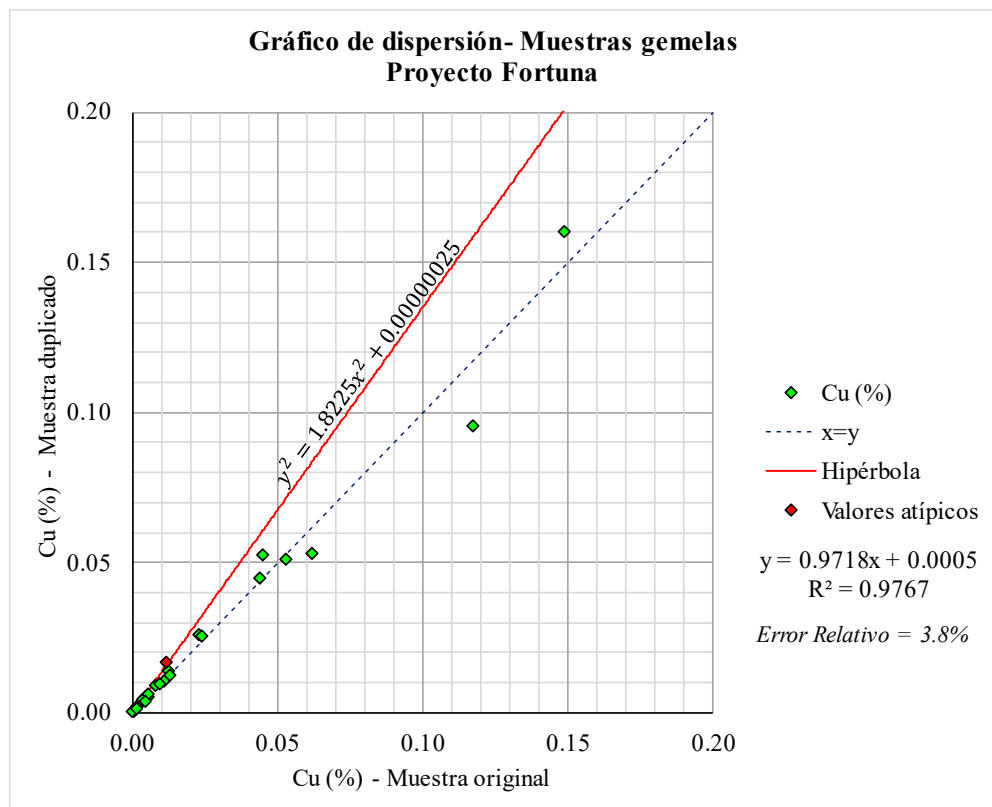


Gráfico 2. Gráfico de dispersión de las muestras originales y gemelas para el cobre.

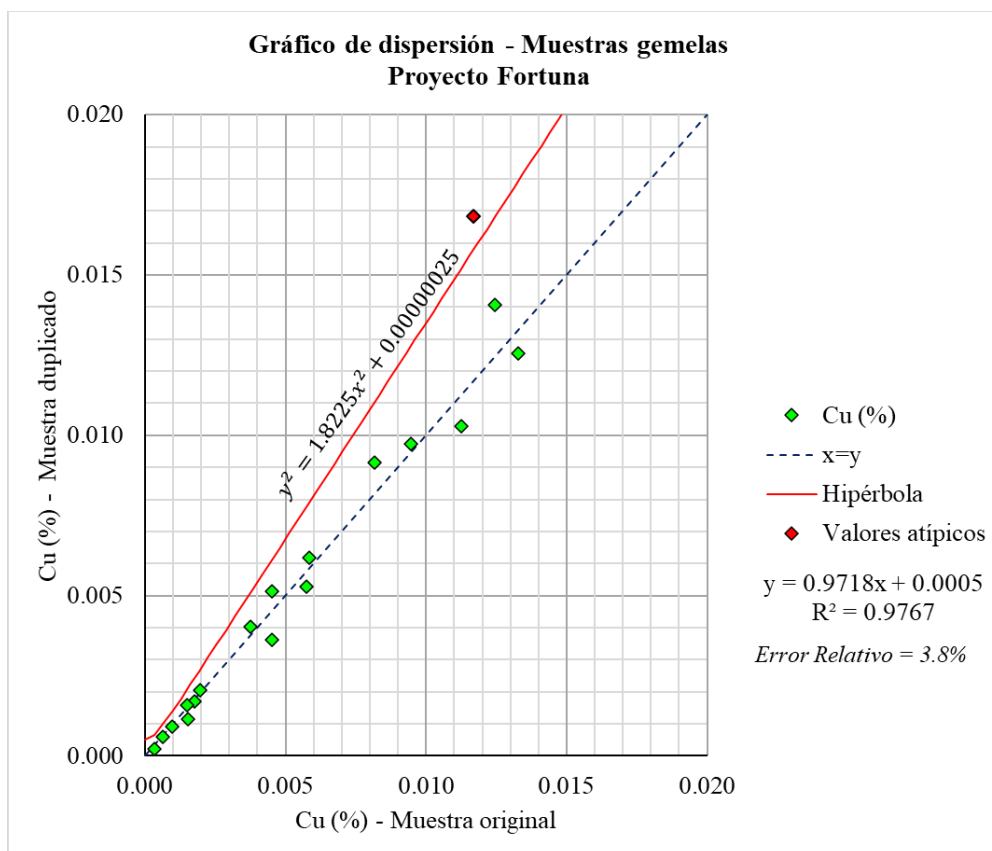


Gráfico 3. Gráfico de dispersión de las muestras originales y gemelas con énfasis en los valores bajos para el cobre.

#### 4.3.1.2. Análisis del Hierro

Se tomaron 26 muestras gemelas, estadísticamente las medidas de tendencia central de las muestras originales son ligeramente mayores a las muestras gemelas indicando valores más altos; además, en la gráfica de distribución, las poblaciones muestran algunas diferencias en medidas de dispersión y ubicación central de datos. (Tabla 15 y Gráfico 4).

Tabla 15. Estadísticas básicas de las muestras originales y gemelas para el hierro

| <b>Estadísticas</b> | <b>Muestra original</b> | <b>Muestra gemela</b> |
|---------------------|-------------------------|-----------------------|
| Número              | 26                      | 26                    |
| Media               | 6.98                    | 6.79                  |
| Mediana             | 6.08                    | 5.74                  |
| Q1                  | 4.19                    | 4.18                  |
| Q3                  | 7.95                    | 8.26                  |
| Mínimo              | 2.00                    | 1.88                  |
| Máximo              | 27.35                   | 25.93                 |
| Desviación Estándar | 4.72                    | 4.47                  |
| Varianza            | 22.26                   | 19.95                 |

La diferencia de la desviación estándar se puede interpretar como que los datos de las muestras originales están más dispersos por lo que la variabilidad es mayor, mientras que los datos de las muestras gemelas tienden a estar más agrupados. La diferencia en la varianza confirma la dispersión mayor de las muestras originales al tener una distribución más heterogénea, es decir, con valores ligeramente más altos.

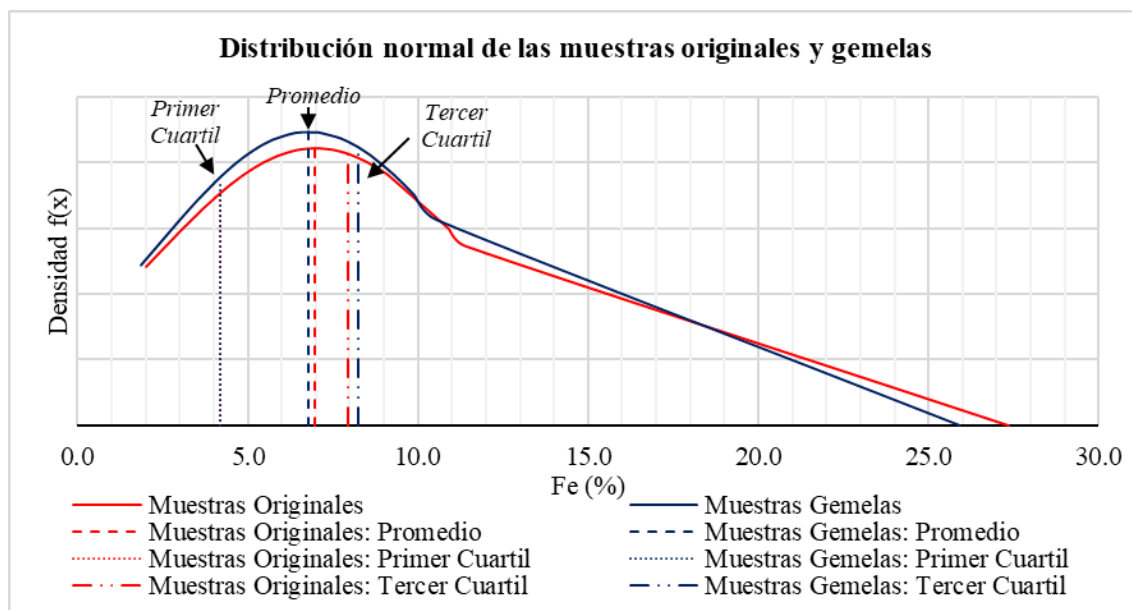


Gráfico 4. Distribución normal de las muestras originales y gemelas para el hierro

En las muestras gemelas la precisión fue aceptable debido a que el error relativo fue de 0%, es decir, los 26 valores se encuentran por debajo del valor límite calculado mediante el Método de la Hipérbola (Simon, 2004) para los resultados de Fe (Tabla 16, Gráfico 5 y Gráfico 6).

Tabla 16. Análisis de los resultados de las muestras originales con las muestras gemelas para el hierro

| <b>Sondaje</b> | <b>Desde (m)</b> | <b>Hasta (m)</b> | <b>Prof. (m)</b> | <b>Muestra original</b> | <b>Fe (%)</b> | <b>Muestra gemela</b> | <b>Fe (%)</b> | <b>Min (Fe%)</b> | <b>Máx (Fe%)</b> | <b>Valor límite</b> | <b>Valor atípico</b> |
|----------------|------------------|------------------|------------------|-------------------------|---------------|-----------------------|---------------|------------------|------------------|---------------------|----------------------|
| For1           | 50.00            | 52.00            | 2.00             | 309877                  | 10.89         | 309878                | 10.56         | 10.56            | 10.89            | 14.26               | No                   |
| For1           | 94.00            | 96.00            | 2.00             | 309906                  | 9.14          | 309907                | 9.30          | 9.14             | 9.30             | 12.34               | No                   |
| For1           | 148.00           | 150.00           | 2.00             | 309941                  | 8.42          | 309942                | 8.68          | 8.42             | 8.68             | 11.37               | No                   |
| For1           | 177.00           | 179.00           | 2.00             | 309959                  | 8.95          | 309960                | 8.55          | 8.55             | 8.95             | 11.54               | No                   |
| For1           | 250.00           | 252.00           | 2.00             | 310002                  | 5.89          | 310003                | 5.75          | 5.75             | 5.89             | 7.76                | No                   |
| For2           | 294.00           | 296.00           | 2.00             | 310031                  | 3.16          | 310032                | 3.12          | 3.12             | 3.16             | 4.21                | No                   |
| For3           | 240.00           | 242.00           | 2.00             | 310062                  | 4.34          | 310063                | 4.92          | 4.34             | 4.92             | 5.86                | No                   |
| For3           | 284.00           | 286.00           | 2.00             | 310090                  | 2.00          | 310091                | 1.88          | 1.88             | 2.00             | 2.54                | No                   |
| For4           | 240.00           | 242.00           | 2.00             | 310125                  | 3.63          | 310126                | 3.42          | 3.42             | 3.63             | 4.62                | No                   |
| For4           | 263.50           | 265.10           | 1.60             | 310139                  | 11.38         | 310137                | 9.91          | 9.91             | 11.38            | 13.38               | No                   |
| For5           | 92.00            | 94.00            | 2.00             | 310182                  | 2.92          | 310178                | 3.04          | 2.92             | 3.04             | 3.94                | No                   |
| For5           | 196.00           | 198.00           | 2.00             | 310248                  | 4.67          | 310249                | 4.64          | 4.64             | 4.67             | 6.26                | No                   |
| For6           | 142.00           | 144.00           | 2.00             | 310275                  | 4.14          | 310274                | 4.35          | 4.14             | 4.35             | 5.59                | No                   |
| For6           | 194.30           | 196.00           | 1.70             | 310329                  | 3.65          | 310328                | 3.57          | 3.57             | 3.65             | 4.82                | No                   |
| For6           | 256.00           | 258.00           | 2.00             | 310354                  | 5.42          | 310353                | 5.72          | 5.42             | 5.72             | 7.32                | No                   |
| For6           | 292.00           | 294.00           | 2.00             | 310385                  | 5.01          | 310384                | 4.08          | 4.08             | 5.01             | 5.51                | No                   |
| For7           | 56.00            | 58.00            | 2.00             | 310426                  | 5.84          | 310427                | 4.84          | 4.84             | 5.84             | 6.53                | No                   |
| For7           | 134.00           | 136.00           | 2.00             | 310521                  | 7.58          | 310522                | 8.29          | 7.58             | 8.29             | 10.23               | No                   |
| For7           | 226.00           | 228.00           | 2.00             | 310566                  | 8.00          | 310567                | 8.18          | 8.00             | 8.18             | 10.80               | No                   |
| For7           | 246.00           | 248.00           | 2.00             | 310592                  | 6.55          | 310593                | 6.42          | 6.42             | 6.55             | 8.67                | No                   |
| For8           | 206.00           | 208.00           | 2.00             | 310629                  | 6.99          | 310630                | 7.09          | 6.99             | 7.09             | 9.44                | No                   |
| For9           | 64.00            | 66.00            | 2.00             | 310693                  | 4.09          | 310694                | 4.12          | 4.09             | 4.12             | 5.52                | No                   |
| For9           | 110.00           | 112.00           | 2.00             | 310723                  | 6.27          | 310724                | 5.34          | 5.34             | 6.27             | 7.21                | No                   |
| For9           | 154.00           | 156.00           | 2.00             | 310751                  | 7.43          | 310752                | 7.11          | 7.11             | 7.43             | 9.60                | No                   |
| For9           | 218.00           | 220.00           | 2.00             | 310798                  | 27.35         | 310799                | 25.93         | 25.93            | 27.35            | 35.01               | No                   |
| For10          | 210.00           | 212.00           | 2.00             | 310855                  | 7.78          | 310856                | 7.73          | 7.73             | 7.78             | 10.44               | No                   |

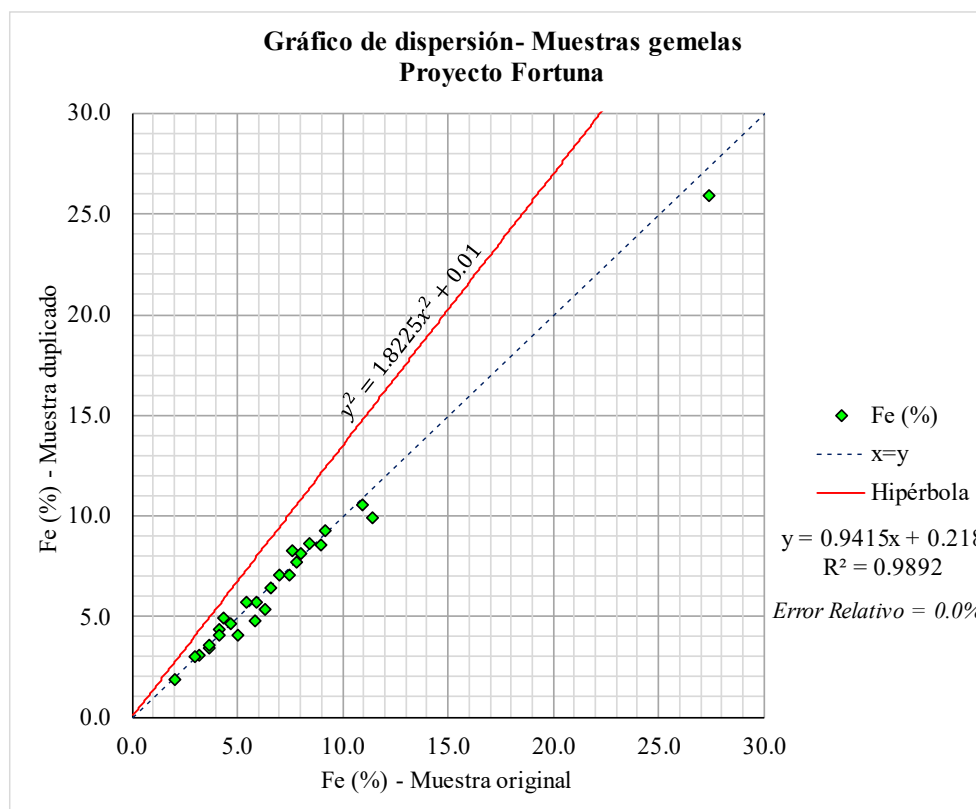


Gráfico 5. Gráfico de dispersión de las muestras originales y gemelas para el hierro.

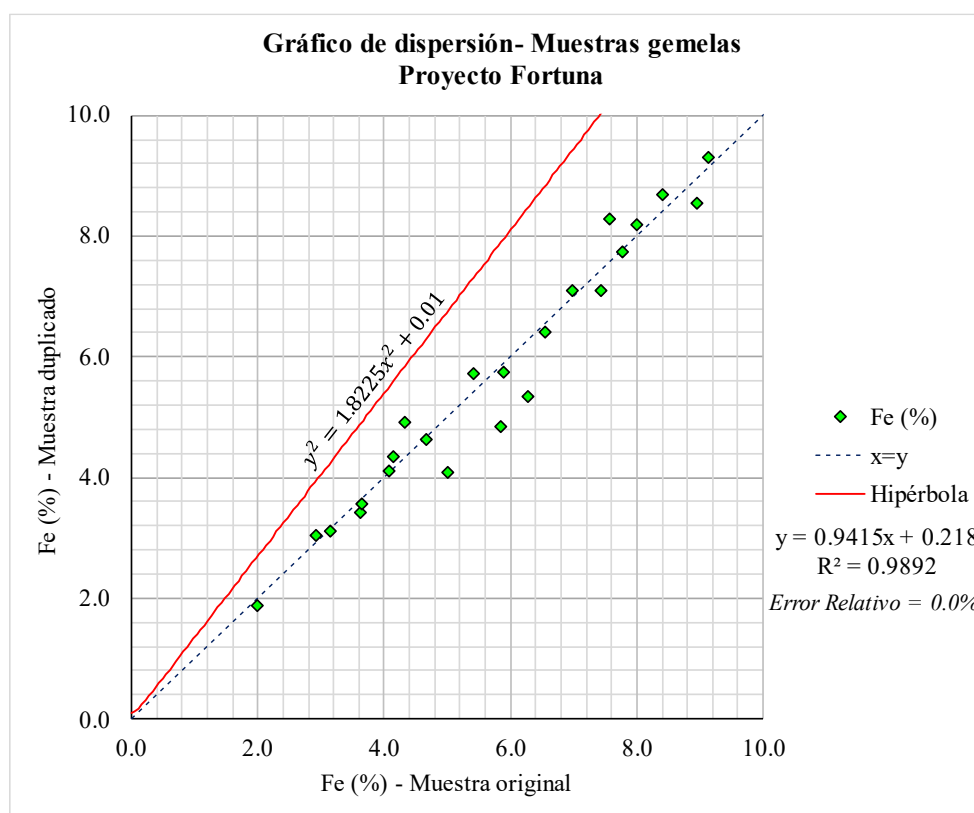


Gráfico 6. Gráfico de dispersión de las muestras originales y gemelas con énfasis en los valores bajos para el hierro.

#### 4.3.2. Duplicados Gruesos

##### 4.3.2.1. Análisis del Cobre

Se tomaron 19 duplicados gruesos, estadísticamente las medidas de tendencia central de las muestras originales como de los duplicados gruesos son similares, aunque, hay ligeras diferencias en la mediana y los cuartiles; sin embargo, en la gráfica de distribución las poblaciones se comportan de manera parecida. (Tabla 17 y Gráfico 7).

Tabla 17. Estadísticas básicas de las muestras originales y duplicados gruesos para el cobre

| <b>Estadísticas</b> | <b>Muestra original</b> | <b>Duplicado grueso</b> |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| Número              | 19                      | 19                      |
| Media               | 0.0221                  | 0.0221                  |
| Mediana             | 0.0146                  | 0.0142                  |
| Q1                  | 0.0062                  | 0.0058                  |
| Q3                  | 0.0349                  | 0.0357                  |
| Mínimo              | 0.0008                  | 0.0008                  |
| Máximo              | 0.0959                  | 0.0945                  |
| Desviación Estándar | 0.0229                  | 0.0228                  |
| Varianza            | 0.0005                  | 0.0005                  |

La desviación estándar y varianza son idénticas, lo que sugiere que la dispersión de los datos es consistente entre ambas poblaciones.

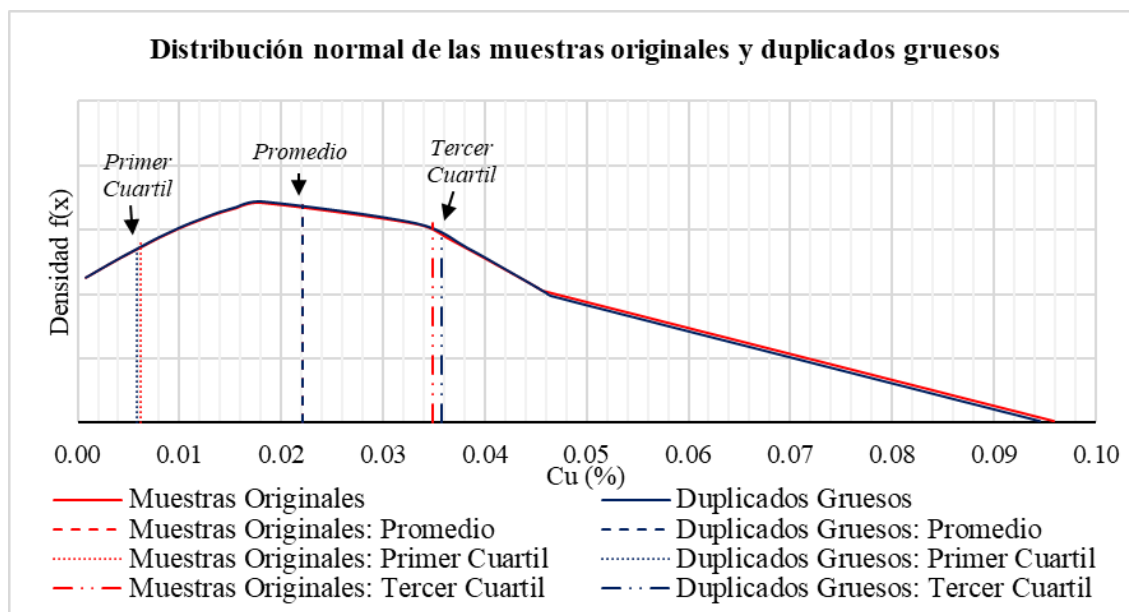


Gráfico 7. Distribución normal de las muestras originales y duplicados gruesos para el cobre

En los duplicados gruesos la precisión fue aceptable debido a que el error relativo fue de 0%, es decir, los 19 valores se encuentran por debajo del valor límite calculado mediante el Método de la Hipérbola (Simon, 2004) para los resultados de Cu (Tabla 18, Gráfico 8 y Gráfico 9).

Tabla 18. Análisis de los resultados de las muestras originales con los duplicados gruesos para el cobre

| Sondaje | Desde (m) | Hasta (m) | Prof. (m) | Muestra original | Cu (%) | Duplicado grueso | Cu (%) | Min (Cu%) | Máx (Cu%) | Valor límite | Valor atípico |
|---------|-----------|-----------|-----------|------------------|--------|------------------|--------|-----------|-----------|--------------|---------------|
| For1    | 56.00     | 58.00     | 2.00      | 309881           | 0.0455 | 309884           | 0.0459 | 0.0455    | 0.0459    | 0.0555       | No            |
| For1    | 185.00    | 187.00    | 2.00      | 309964           | 0.0045 | 309967           | 0.0043 | 0.0043    | 0.0045    | 0.0052       | No            |
| For2    | 224.00    | 226.00    | 2.00      | 310052           | 0.0078 | 310055           | 0.0073 | 0.0073    | 0.0078    | 0.0089       | No            |
| For2    | 270.00    | 272.00    | 2.00      | 310082           | 0.0026 | 310084           | 0.0026 | 0.0026    | 0.0026    | 0.0032       | No            |
| For3    | 76.00     | 78.00     | 2.00      | 310170           | 0.0180 | 310171           | 0.0181 | 0.0180    | 0.0181    | 0.0219       | No            |
| For3    | 224.00    | 226.00    | 2.00      | 310264           | 0.0008 | 310263           | 0.0008 | 0.0008    | 0.0008    | 0.0010       | No            |
| For4    | 201.60    | 203.10    | 1.50      | 310319           | 0.0457 | 310318           | 0.0465 | 0.0457    | 0.0465    | 0.0557       | No            |
| For4    | 250.20    | 251.00    | 0.80      | 310420           | 0.0332 | 310421           | 0.0332 | 0.0332    | 0.0332    | 0.0405       | No            |
| For5    | 169.00    | 171.00    | 2.00      | 310436           | 0.0153 | 310437           | 0.0152 | 0.0152    | 0.0153    | 0.0186       | No            |
| For5    | 211.50    | 213.30    | 1.80      | 310468           | 0.0083 | 310469           | 0.0080 | 0.0080    | 0.0083    | 0.0098       | No            |
| For6    | 26.00     | 28.00     | 2.00      | 310480           | 0.0043 | 310481           | 0.0043 | 0.0043    | 0.0043    | 0.0052       | No            |
| For6    | 56.00     | 57.00     | 1.00      | 310534           | 0.0443 | 310535           | 0.0436 | 0.0436    | 0.0443    | 0.0532       | No            |
| For7    | 128.00    | 130.00    | 2.00      | 310581           | 0.0106 | 310582           | 0.0106 | 0.0106    | 0.0106    | 0.0129       | No            |
| For7    | 182.00    | 184.00    | 2.00      | 310615           | 0.0136 | 310616           | 0.0137 | 0.0136    | 0.0137    | 0.0166       | No            |
| For8    | 56.00     | 58.00     | 2.00      | 310688           | 0.0146 | 310689           | 0.0142 | 0.0142    | 0.0146    | 0.0173       | No            |
| For9    | 130.00    | 132.00    | 2.00      | 310736           | 0.0155 | 310739           | 0.0155 | 0.0155    | 0.0155    | 0.0189       | No            |
| For9    | 232.00    | 234.00    | 2.00      | 310807           | 0.0366 | 310809           | 0.0382 | 0.0366    | 0.0382    | 0.0447       | No            |
| For10   | 194.00    | 196.00    | 2.00      | 310845           | 0.0030 | 310848           | 0.0030 | 0.0030    | 0.0030    | 0.0036       | No            |
| For10   | 258.00    | 259.90    | 1.90      | 310886           | 0.0959 | 310888           | 0.0945 | 0.0945    | 0.0959    | 0.1152       | No            |

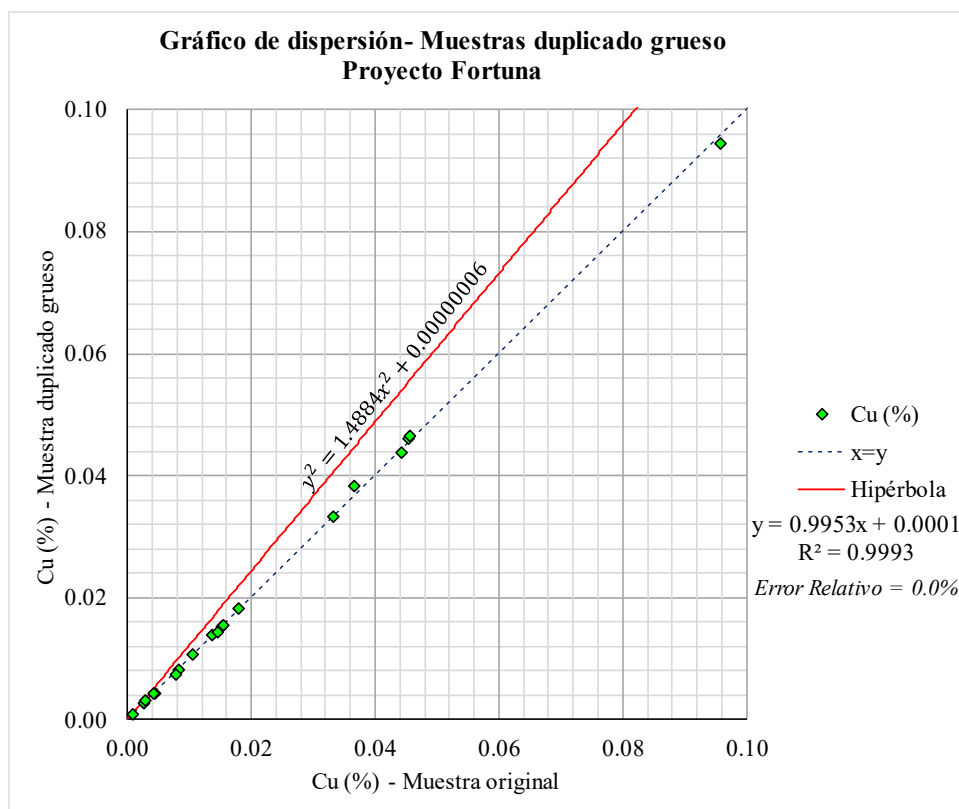


Gráfico 8. Gráfico de dispersión de las muestras originales y duplicados gruesos para el cobre.

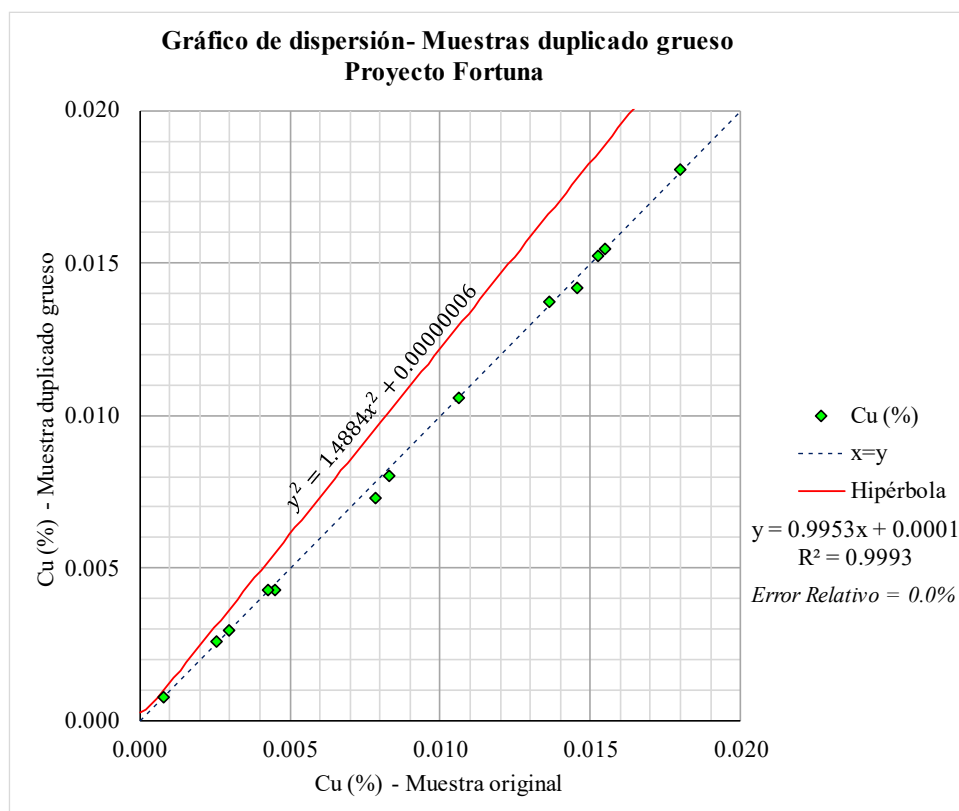


Gráfico 9. Gráfico de dispersión de las muestras originales y duplicados gruesos con énfasis en los valores bajos para el cobre.

#### 4.3.2.2. Análisis del Hierro

Se tomaron 19 duplicados gruesos, estadísticamente las medidas de tendencia central de las muestras originales como de los duplicados gruesos son similares, aunque, hay ligeras diferencias en la mediana y los cuartiles; sin embargo, en la gráfica de distribución las poblaciones se comportan de manera parecida. (Tabla 19 y Gráfico 10).

Tabla 19. Estadísticas básicas de las muestras originales y duplicados gruesos para el hierro

| Estadísticas        | Muestra original | Duplicado grueso |
|---------------------|------------------|------------------|
| Número              | 19               | 19               |
| Media               | 8.18             | 8.14             |
| Mediana             | 7.36             | 7.15             |
| Q1                  | 5.05             | 5.05             |
| Q3                  | 10.37            | 10.33            |
| Mínimo              | 3.12             | 3.17             |
| Máximo              | 21.10            | 20.99            |
| Desviación Estándar | 4.35             | 4.35             |
| Varianza            | 18.95            | 18.96            |

La desviación estándar y varianza son idénticas, lo que sugiere que la dispersión de los datos es consistente entre ambas poblaciones.

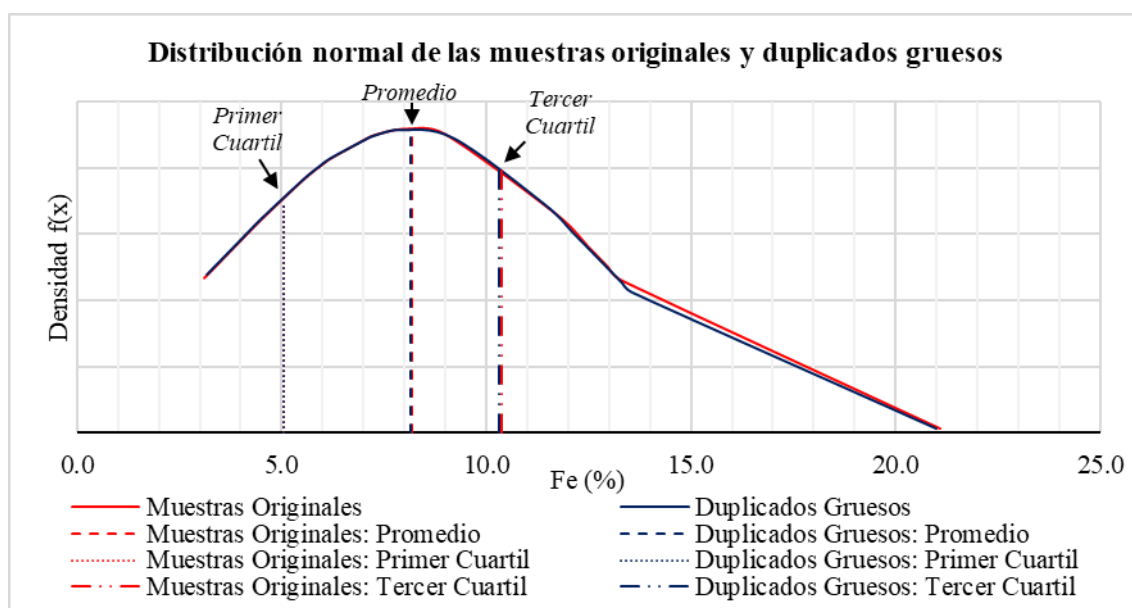


Gráfico 10. Distribución normal de las muestras originales y duplicados gruesos para el hierro

En los duplicados gruesos la precisión fue aceptable debido a que el error relativo fue de 0%, es decir, los 19 valores se encuentran por debajo del valor límite calculado mediante el Método de la Hipérbola (Simon, 2004) para los resultados de Fe (Tabla 20, Gráfico 11 y Gráfico 12).

Tabla 20. Análisis de los resultados de las muestras originales con los duplicados gruesos para el hierro

| Sondaje | Desde (m) | Hasta (m) | Prof. (m) | Muestra original | Fe (%) | Duplicado grueso | Fe (%) | Min (Fe%) | Máx (Fe%) | Valor límite | Valor atípico |
|---------|-----------|-----------|-----------|------------------|--------|------------------|--------|-----------|-----------|--------------|---------------|
| For1    | 56.00     | 58.00     | 2.00      | 309881           | 13.29  | 309884           | 13.31  | 13.29     | 13.31     | 16.21        | No            |
| For1    | 185.00    | 187.00    | 2.00      | 309964           | 6.07   | 309967           | 5.89   | 5.89      | 6.07      | 7.19         | No            |
| For2    | 224.00    | 226.00    | 2.00      | 310052           | 8.09   | 310055           | 7.91   | 7.91      | 8.09      | 9.65         | No            |
| For2    | 270.00    | 272.00    | 2.00      | 310082           | 5.57   | 310084           | 5.56   | 5.56      | 5.57      | 6.78         | No            |
| For3    | 76.00     | 78.00     | 2.00      | 310170           | 7.36   | 310171           | 7.43   | 7.36      | 7.43      | 8.98         | No            |
| For3    | 224.00    | 226.00    | 2.00      | 310264           | 3.31   | 310263           | 3.25   | 3.25      | 3.31      | 3.97         | No            |
| For4    | 201.60    | 203.10    | 1.50      | 310319           | 21.10  | 310318           | 20.99  | 20.99     | 21.10     | 25.61        | No            |
| For4    | 250.20    | 251.00    | 0.80      | 310420           | 6.19   | 310421           | 6.20   | 6.19      | 6.20      | 7.55         | No            |
| For5    | 169.00    | 171.00    | 2.00      | 310436           | 4.53   | 310437           | 4.53   | 4.53      | 4.53      | 5.53         | No            |
| For5    | 211.50    | 213.30    | 1.80      | 310468           | 3.12   | 310469           | 3.17   | 3.12      | 3.17      | 3.81         | No            |
| For6    | 26.00     | 28.00     | 2.00      | 310480           | 7.50   | 310481           | 7.15   | 7.15      | 7.50      | 8.72         | No            |
| For6    | 56.00     | 57.00     | 1.00      | 310534           | 4.12   | 310535           | 4.21   | 4.12      | 4.21      | 5.03         | No            |
| For7    | 128.00    | 130.00    | 2.00      | 310581           | 7.54   | 310582           | 7.33   | 7.33      | 7.54      | 8.94         | No            |
| For7    | 182.00    | 184.00    | 2.00      | 310615           | 7.16   | 310616           | 7.15   | 7.15      | 7.16      | 8.72         | No            |
| For8    | 56.00     | 58.00     | 2.00      | 310688           | 4.30   | 310689           | 4.22   | 4.22      | 4.30      | 5.15         | No            |
| For9    | 130.00    | 132.00    | 2.00      | 310736           | 9.00   | 310739           | 9.21   | 9.00      | 9.21      | 10.98        | No            |
| For9    | 232.00    | 234.00    | 2.00      | 310807           | 12.99  | 310809           | 13.54  | 12.99     | 13.54     | 15.85        | No            |
| For10   | 194.00    | 196.00    | 2.00      | 310845           | 11.73  | 310848           | 11.44  | 11.44     | 11.73     | 13.96        | No            |
| For10   | 258.00    | 259.90    | 1.90      | 310886           | 12.50  | 310888           | 12.16  | 12.16     | 12.50     | 14.84        | No            |

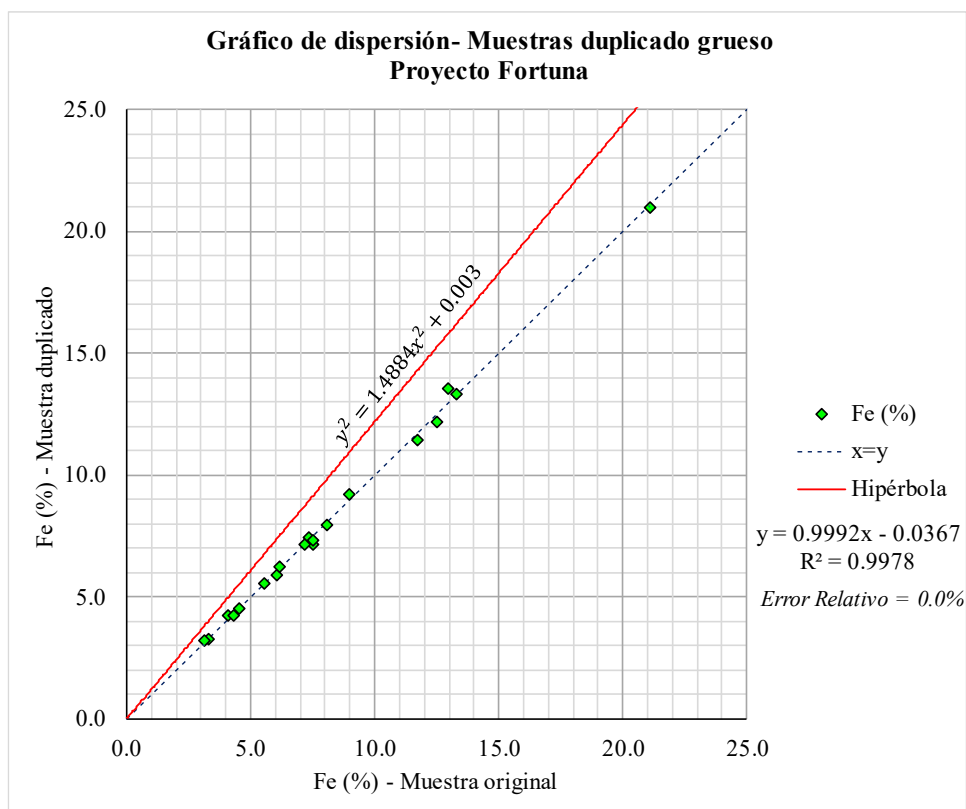


Gráfico 11. Gráfico de dispersión de las muestras originales y duplicados gruesos para el hierro.

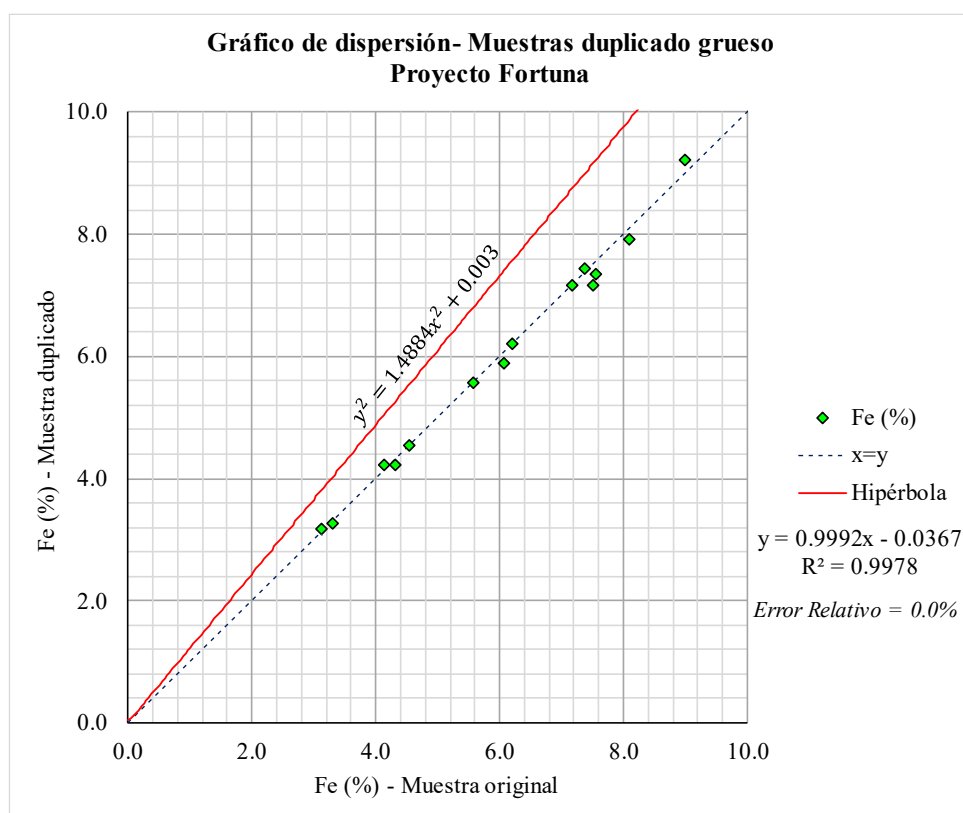


Gráfico 12. Gráfico de dispersión de las muestras originales y duplicados gruesos con énfasis en los valores bajos para el hierro.

### 4.3.3. Duplicados Finos

#### 4.3.3.1. Análisis del Cobre

Se tomaron 19 duplicados finos, estadísticamente las medidas de tendencia central de las muestras originales como de los duplicados finos son similares, aunque, hay ligeras diferencias en la media y los cuartiles; sin embargo, en la gráfica de distribución las poblaciones se comportan de manera parecida (Tabla 21 y Gráfico 13).

Tabla 21. Estadísticas básicas de las muestras originales y duplicados finos para el cobre

| <b>Estadísticas</b> | <b>Muestra original</b> | <b>Duplicado fino</b> |
|---------------------|-------------------------|-----------------------|
| Número              | 19                      | 19                    |
| Media               | 0.0241                  | 0.0240                |
| Mediana             | 0.0054                  | 0.0054                |
| Q1                  | 0.0019                  | 0.0019                |
| Q3                  | 0.0245                  | 0.0240                |
| Mínimo              | 0.0004                  | 0.0004                |
| Máximo              | 0.1337                  | 0.1351                |
| Desviación Estándar | 0.0375                  | 0.0376                |
| Varianza            | 0.0014                  | 0.0014                |

La desviación estándar y varianza son idénticas, lo que sugiere que la dispersión de los datos es consistente entre ambas poblaciones.

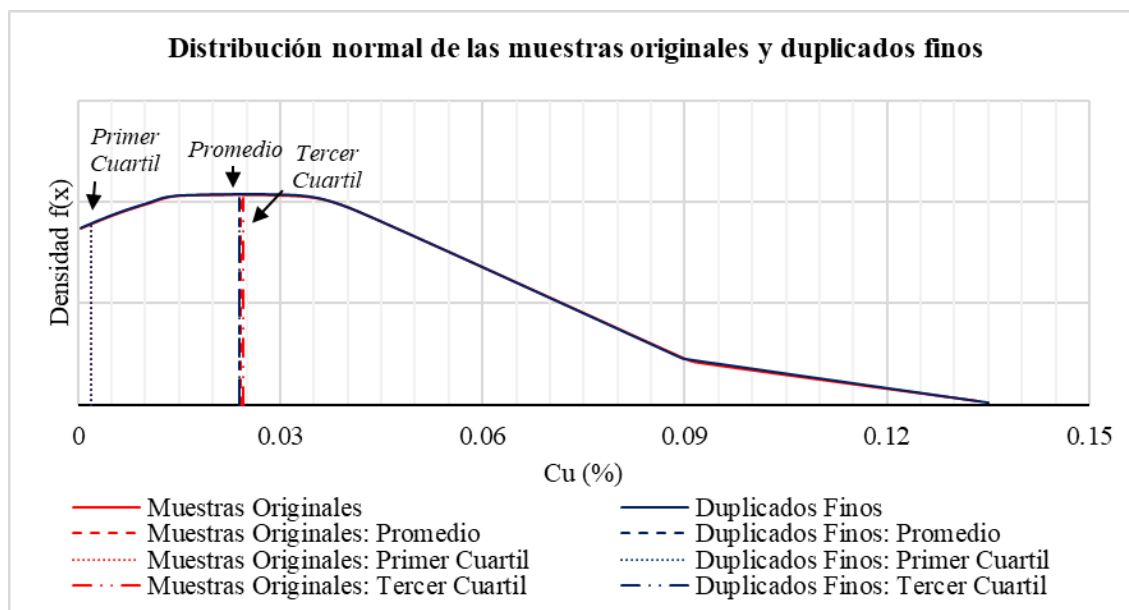


Gráfico 13. Distribución normal de las muestras originales y duplicados gruesos para el cobre.

En los duplicados finos la precisión fue aceptable debido a que el error relativo fue de 0%, es decir, los 19 valores se encuentran por debajo del valor límite calculado mediante el Método de la Hipérbola (Simon, 2004) para los resultados de Cu (Tabla 22, Gráfico 14 y Gráfico 15).

Tabla 22. Análisis de los resultados de las muestras originales con los duplicados finos para el cobre

| Sondaje | Desde (m) | Hasta (m) | Prof. (m) | Muestra original | Cu (%) | Duplicado fino | Cu (%) | Min (Cu%) | Máx (Cu%) | Valor límite | Valor atípico |
|---------|-----------|-----------|-----------|------------------|--------|----------------|--------|-----------|-----------|--------------|---------------|
| For1    | 22.00     | 24.00     | 2.00      | 309859           | 0.0049 | 309862         | 0.0047 | 0.0047    | 0.0049    | 0.0052       | No            |
| For1    | 122.00    | 124.00    | 2.00      | 309925           | 0.0414 | 309929         | 0.0416 | 0.0414    | 0.0416    | 0.0460       | No            |
| For2    | 180.00    | 182.00    | 2.00      | 310023           | 0.0032 | 310026         | 0.0032 | 0.0032    | 0.0032    | 0.0035       | No            |
| For2    | 247.00    | 249.00    | 2.00      | 310067           | 0.0004 | 310068         | 0.0004 | 0.0004    | 0.0004    | 0.0004       | No            |
| For3    | 14.00     | 16.00     | 2.00      | 310110           | 0.0011 | 310113         | 0.0011 | 0.0011    | 0.0011    | 0.0012       | No            |
| For3    | 136.60    | 138.60    | 2.00      | 310148           | 0.0895 | 310147         | 0.0896 | 0.0895    | 0.0896    | 0.0994       | No            |
| For4    | 156.00    | 158.00    | 2.00      | 310222           | 0.0014 | 310221         | 0.0014 | 0.0014    | 0.0014    | 0.0015       | No            |
| For4    | 262.00    | 263.50    | 1.50      | 310292           | 0.0070 | 310291         | 0.0073 | 0.0070    | 0.0073    | 0.0078       | No            |
| For5    | 244.00    | 246.00    | 2.00      | 310345           | 0.0029 | 310346         | 0.0027 | 0.0027    | 0.0029    | 0.0030       | No            |
| For5    | 291.00    | 293.00    | 2.00      | 310378           | 0.0339 | 310377         | 0.0333 | 0.0333    | 0.0339    | 0.0370       | No            |
| For6    | 114.00    | 116.00    | 2.00      | 310393           | 0.0054 | 310394         | 0.0054 | 0.0054    | 0.0054    | 0.0060       | No            |
| For6    | 214.65    | 216.00    | 1.35      | 310471           | 0.0107 | 310472         | 0.0104 | 0.0104    | 0.0107    | 0.0116       | No            |
| For7    | 160.00    | 162.00    | 2.00      | 310601           | 0.0009 | 310602         | 0.0009 | 0.0009    | 0.0009    | 0.0010       | No            |
| For7    | 214.00    | 216.00    | 2.00      | 310634           | 0.0019 | 310635         | 0.0019 | 0.0019    | 0.0019    | 0.0021       | No            |
| For8    | 236.00    | 238.00    | 2.00      | 310648           | 0.0103 | 310649         | 0.0104 | 0.0103    | 0.0104    | 0.0114       | No            |
| For9    | 94.20     | 96.10     | 1.90      | 310714           | 0.0921 | 310717         | 0.0898 | 0.0898    | 0.0921    | 0.0997       | No            |
| For9    | 188.70    | 190.15    | 1.45      | 310777           | 0.1337 | 310780         | 0.1351 | 0.1337    | 0.1351    | 0.1484       | No            |
| For10   | 164.00    | 166.00    | 2.00      | 310827           | 0.0020 | 310831         | 0.0020 | 0.0020    | 0.0020    | 0.0022       | No            |
| For10   | 218.00    | 220.00    | 2.00      | 310862           | 0.0152 | 310867         | 0.0148 | 0.0148    | 0.0152    | 0.0164       | No            |

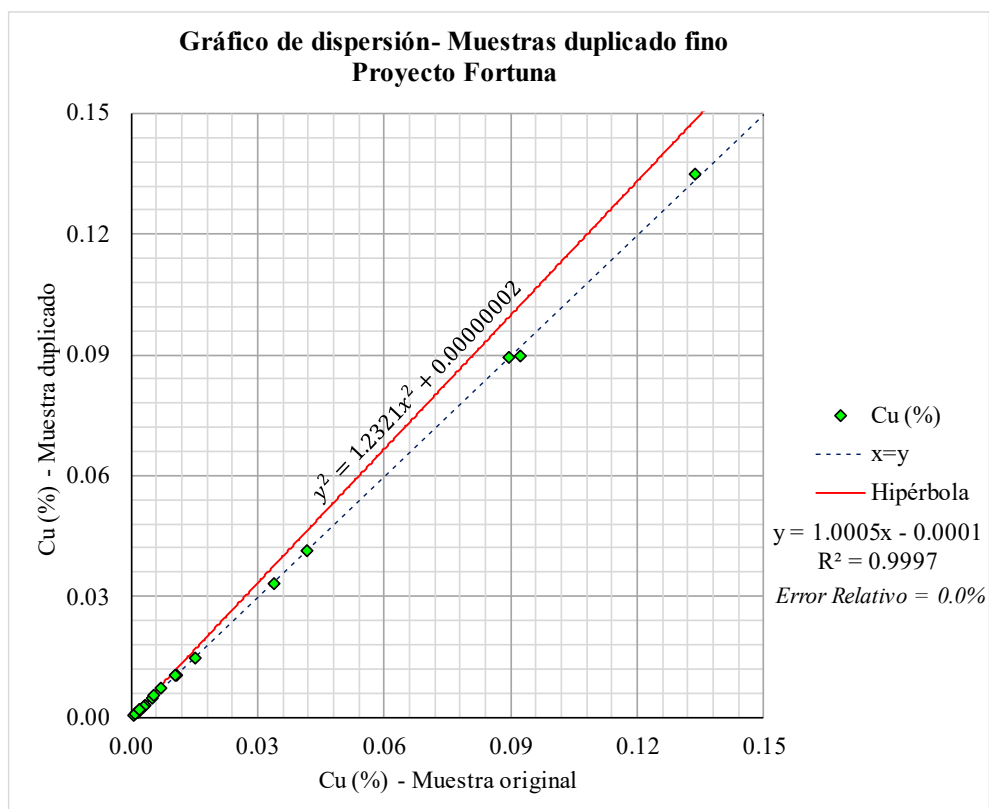


Gráfico 14. Gráfico de dispersión de las muestras originales y duplicados finos para el cobre.

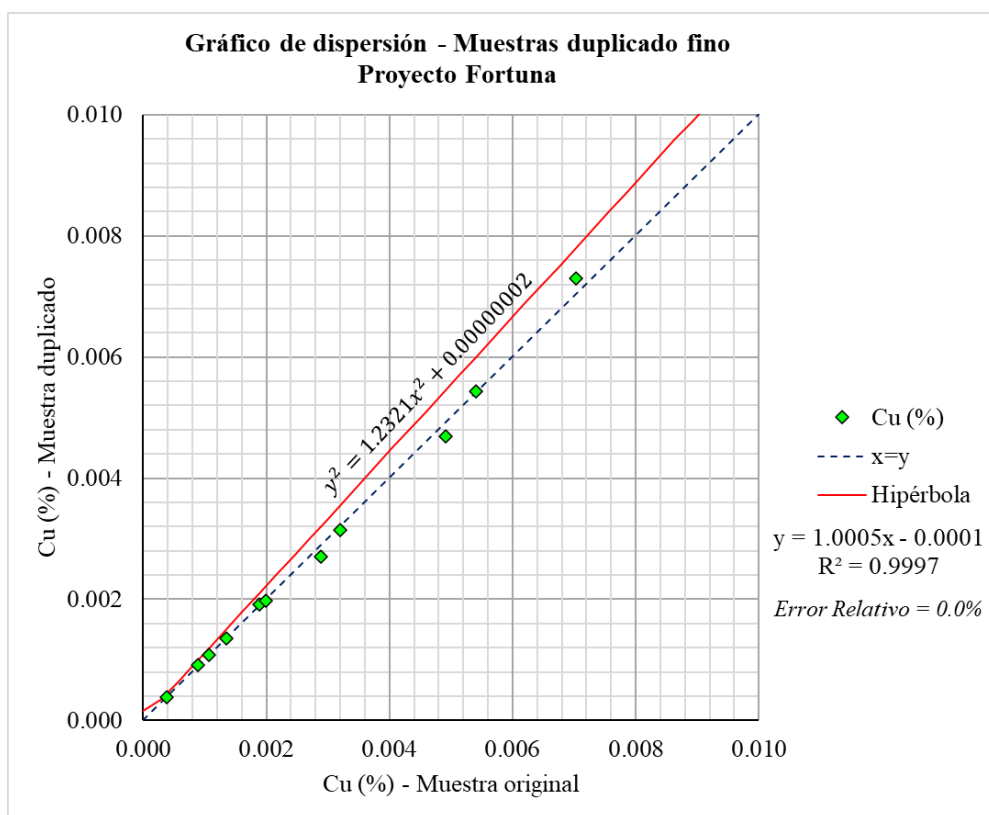


Gráfico 15. Gráfico de dispersión de las muestras originales y duplicados finos con énfasis en los valores bajos para el cobre.

#### 4.3.3.2. Análisis del Hierro

Se tomaron 19 duplicados finos, estadísticamente las medidas de tendencia central de las muestras originales como de los duplicados finos son similares, aunque, hay ligeras diferencias; sin embargo, en la gráfica de distribución las poblaciones se comportan de manera parecida (Tabla 23y Gráfico 16).

Tabla 23. Estadísticas básicas de las muestras originales y duplicados finos para el hierro

| Estadísticas        | Muestra original | Duplicado fino |
|---------------------|------------------|----------------|
| Número              | 19               | 19             |
| Media               | 8.47             | 8.50           |
| Mediana             | 5.01             | 4.90           |
| Q1                  | 4.23             | 4.22           |
| Q3                  | 8.02             | 8.18           |
| Mínimo              | 2.26             | 2.25           |
| Máximo              | 54.84            | 54.51          |
| Desviación Estándar | 11.17            | 11.10          |
| Varianza            | 124.83           | 123.24         |

La desviación estándar y varianza son idénticas, lo que sugiere que la dispersión de los datos es consistente entre ambas poblaciones.

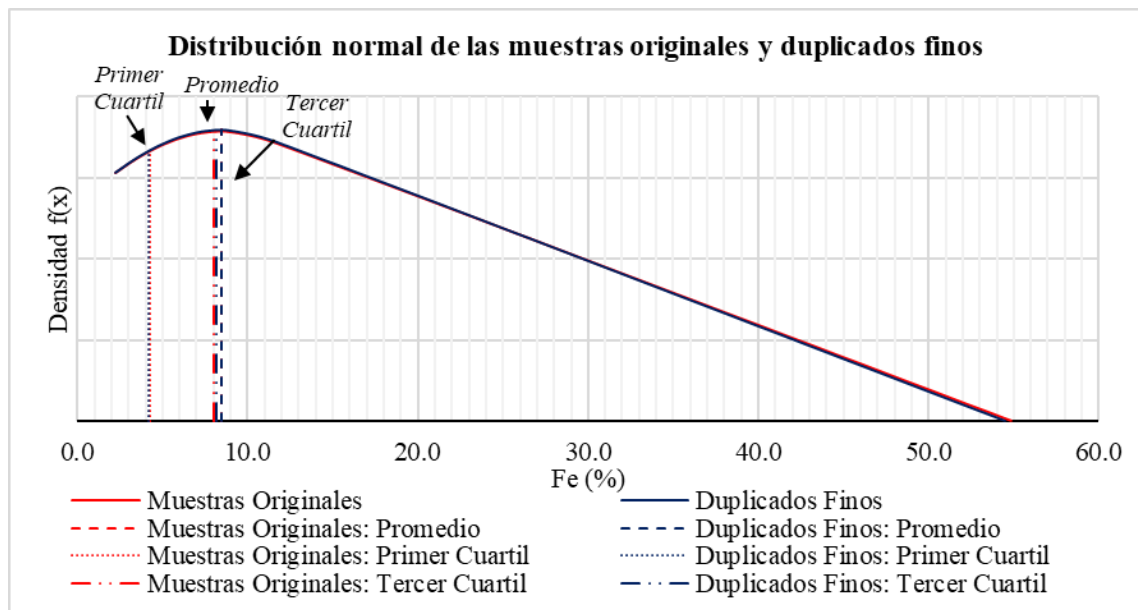


Gráfico 16. Distribución normal de las muestras originales y duplicados finos

En los duplicados finos la precisión fue aceptable debido a que el error relativo fue de 0%, es decir, los 19 valores se encuentran por debajo del valor límite calculado mediante el Método de la Hipérbola (Simon, 2004) para los resultados de Fe (Tabla 24, Gráfico 17 y Gráfico 18).

Tabla 24. Análisis de los resultados de las muestras originales con los duplicados finos para el hierro

| Sondaje | Desde (m) | Hasta (m) | Prof. (m) | Muestra original | Fe (%) | Muestra gemela | Fe (%) | Min (Fe%) | Máx (Fe%) | Valor límite | Valor atípico |
|---------|-----------|-----------|-----------|------------------|--------|----------------|--------|-----------|-----------|--------------|---------------|
| For1    | 22.00     | 24.00     | 2.00      | 309859           | 8.43   | 309862         | 8.29   | 8.29      | 8.43      | 9.20         | No            |
| For1    | 122.00    | 124.00    | 2.00      | 309925           | 8.78   | 309929         | 8.76   | 8.76      | 8.78      | 9.72         | No            |
| For2    | 180.00    | 182.00    | 2.00      | 310023           | 3.00   | 310026         | 3.00   | 3.00      | 3.00      | 3.33         | No            |
| For2    | 247.00    | 249.00    | 2.00      | 310067           | 4.95   | 310068         | 4.86   | 4.86      | 4.95      | 5.39         | No            |
| For3    | 14.00     | 16.00     | 2.00      | 310110           | 3.76   | 310113         | 3.80   | 3.76      | 3.80      | 4.17         | No            |
| For3    | 136.60    | 138.60    | 2.00      | 310148           | 11.60  | 310147         | 11.75  | 11.60     | 11.75     | 12.88        | No            |
| For4    | 156.00    | 158.00    | 2.00      | 310222           | 4.89   | 310221         | 4.89   | 4.89      | 4.89      | 5.43         | No            |
| For4    | 262.00    | 263.50    | 1.50      | 310292           | 5.01   | 310291         | 4.90   | 4.90      | 5.01      | 5.44         | No            |
| For5    | 244.00    | 246.00    | 2.00      | 310345           | 2.26   | 310346         | 2.25   | 2.25      | 2.26      | 2.50         | No            |
| For5    | 291.00    | 293.00    | 2.00      | 310378           | 3.61   | 310377         | 3.62   | 3.61      | 3.62      | 4.01         | No            |
| For6    | 114.00    | 116.00    | 2.00      | 310393           | 4.61   | 310394         | 4.82   | 4.61      | 4.82      | 5.12         | No            |
| For6    | 214.65    | 216.00    | 1.35      | 310471           | 4.33   | 310472         | 4.33   | 4.33      | 4.33      | 4.81         | No            |
| For7    | 160.00    | 162.00    | 2.00      | 310601           | 8.03   | 310602         | 8.06   | 8.03      | 8.06      | 8.91         | No            |
| For7    | 214.00    | 216.00    | 2.00      | 310634           | 8.00   | 310635         | 7.95   | 7.95      | 8.00      | 8.82         | No            |
| For8    | 236.00    | 238.00    | 2.00      | 310648           | 6.94   | 310649         | 7.12   | 6.94      | 7.12      | 7.70         | No            |
| For9    | 94.20     | 96.10     | 1.90      | 310714           | 6.03   | 310717         | 5.90   | 5.90      | 6.03      | 6.55         | No            |
| For9    | 188.70    | 190.15    | 1.45      | 310777           | 54.84  | 310780         | 54.51  | 54.51     | 54.84     | 60.51        | No            |
| For10   | 164.00    | 166.00    | 2.00      | 310827           | 7.68   | 310831         | 8.50   | 7.68      | 8.50      | 8.52         | No            |
| For10   | 218.00    | 220.00    | 2.00      | 310862           | 4.12   | 310867         | 4.10   | 4.10      | 4.12      | 4.55         | No            |

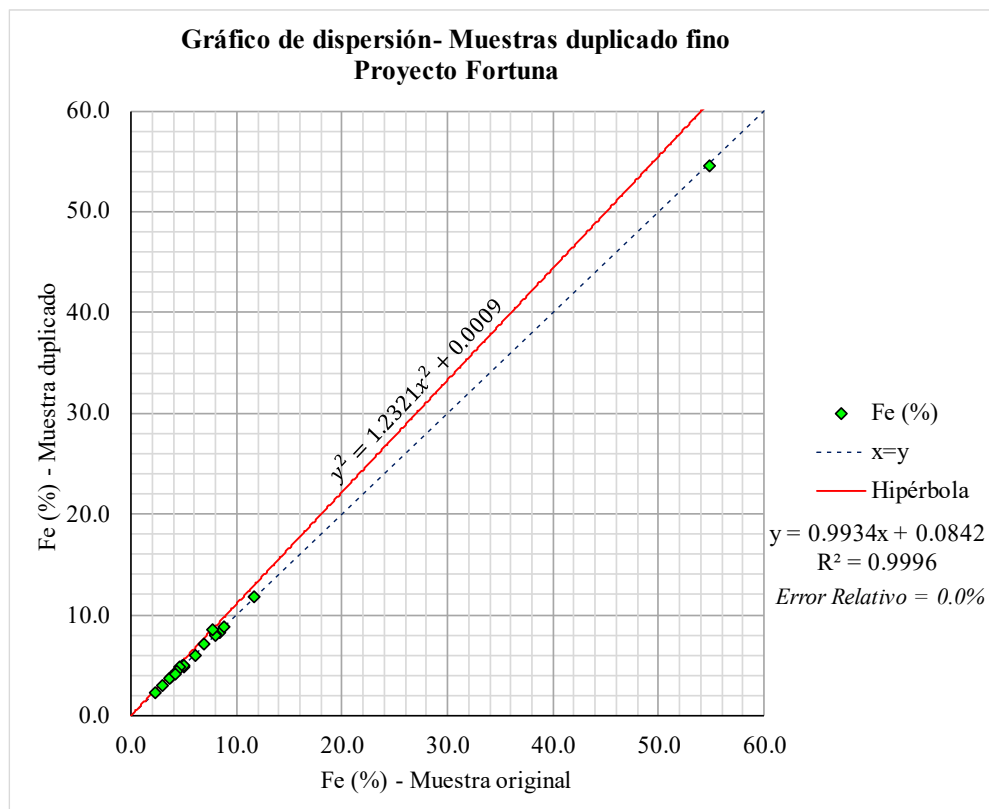


Gráfico 17. Gráfico de dispersión de las muestras originales y duplicados finos para el hierro.

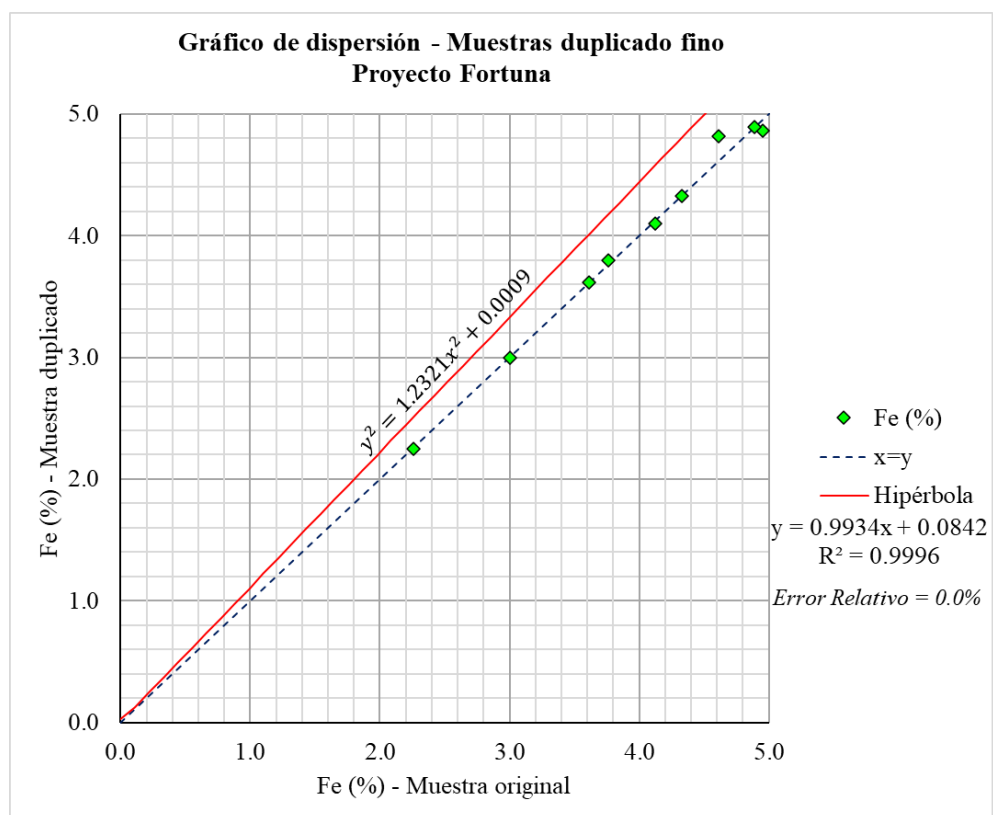


Gráfico 18. Gráfico de dispersión de las muestras originales y duplicados finos con énfasis en los valores bajos para el hierro.

#### 4.4. Control de la Exactitud

La evaluación de la exactitud en las diferentes partes del proceso de muestreo, preparación y análisis de las muestras se realiza a través del resultado de los análisis de los estándares o materiales de referencia, la aceptación de los valores se mide con el sesgo que es comúnmente calificado según los siguientes rangos:  $\pm 5\%$  es bueno,  $\pm 10\% < \pm 5\%$  es cuestionable y  $< \pm 10$  es inaceptable; adicionalmente, se calcula el coeficiente de variación que no debe exceder el 5% para obtener una buena precisión analítica.

El método utilizado para calcular la exactitud fue usando el gráfico de Shewart considerando para los cálculos la media de los valores obtenidos; de esta manera, durante la perforación del Proyecto Fortuna se utilizaron tres tipos de estándares: ley baja, ley media y ley alta (Tabla 25).

Tabla 25. Relación de estándares utilizados durante el periodo de evaluación de la exactitud.

| Estándar  | Elemento | Mejor valor |
|-----------|----------|-------------|
|           |          | Cu (%)      |
| Ley baja  | Cu       | 0.324       |
| Ley media | Cu       | 0.571       |
| Ley alta  | Cu       | 1.290       |

Según la evaluación de sesgo del material de referencia, los tres tipos están por debajo del 5%, es decir, son aceptables, además de que el coeficiente de variación cumple también con los parámetros establecidos en la industria.

Tabla 26. Resumen de resultados de los estándares utilizados en la perforación del Proyecto Fortuna

| Estándar  | Elemento | Unidad | Mejor valor (MV) | Media ( $\bar{x}$ ) | Desv. Estd. | Nro. datos | Sesgo (%) | CV (%) |
|-----------|----------|--------|------------------|---------------------|-------------|------------|-----------|--------|
| Ley baja  | Cu       | %      | 0.324            | 0.326               | 0.004       | 19         | 0.55      | 1.38   |
| Ley media | Cu       | %      | 0.571            | 0.575               | 0.006       | 27         | 0.71      | 1.06   |
| Ley alta  | Cu       | %      | 1.290            | 1.278               | 0.022       | 4          | -0.97     | 1.74   |

#### 4.4.1. Análisis del Estándar de Ley Baja

Se utilizaron 19 estándares de ley baja, el sesgo positivo de 0.55% indica que las muestras están distribuidas ligeramente asimétricamente hacia valores altos; es decir, que hay valores más altos que la media; aunque, el coeficiente de variación bajo de 1.34% indica que la variabilidad de los datos es baja con relación con la media; es decir, que los datos están relativamente cerca a la media y no hay una gran dispersión.

Tabla 27. Estadísticas básicas del estándar de ley baja para el cobre

| Estadísticas        | Estándar de ley baja – Cu (%) |
|---------------------|-------------------------------|
| Número              | 19                            |
| Media               | 0.3258                        |
| Mediana             | 0.3258                        |
| Q1                  | 0.3237                        |
| Q3                  | 0.3287                        |
| Mínimo              | 0.3154                        |
| Máximo              | 0.3329                        |
| Desviación Estándar | 0.0044                        |
| Varianza            | 0.00002                       |
| Sesgo               | 0.55%                         |
| Coef. Variación     | 1.34%                         |

En este estándar, la exactitud es aceptable debido a que el sesgo es menor al 5% y el coeficiente de variación es bajo; sin embargo, se observa que un valor está ligeramente al límite del valor aceptable ( $\bar{x}$ -2SD) pero, por ser un valor único no se considera como atípico, además, según el gráfico control se evidencia que la media de los datos es ligeramente mayor que el mejor valor certificado (Tabla 28 y Gráfico 19).

Tabla 28. Resultados de Cu para el estándar de ley baja.

| Sondaje | Cu (%) | $\bar{x}$ | $\bar{x}-3SD$ | $\bar{x}-2DS$ | $\bar{x}+2SD$ | $\bar{x}+3DS$ | Valor atípico |
|---------|--------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| For1    | 0.3227 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For2    | 0.3236 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For2    | 0.3258 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For2    | 0.3237 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For3    | 0.3274 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For3    | 0.3269 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For4    | 0.3253 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For4    | 0.3214 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For4    | 0.3279 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For5    | 0.3179 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For5    | 0.3154 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For6    | 0.3246 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For7    | 0.3249 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For8    | 0.3306 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For8    | 0.3295 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For8    | 0.3302 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For9    | 0.3277 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For10   | 0.3329 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |
| For10   | 0.3315 | 0.3258    | 0.3127        | 0.3170        | 0.3345        | 0.3389        | No            |

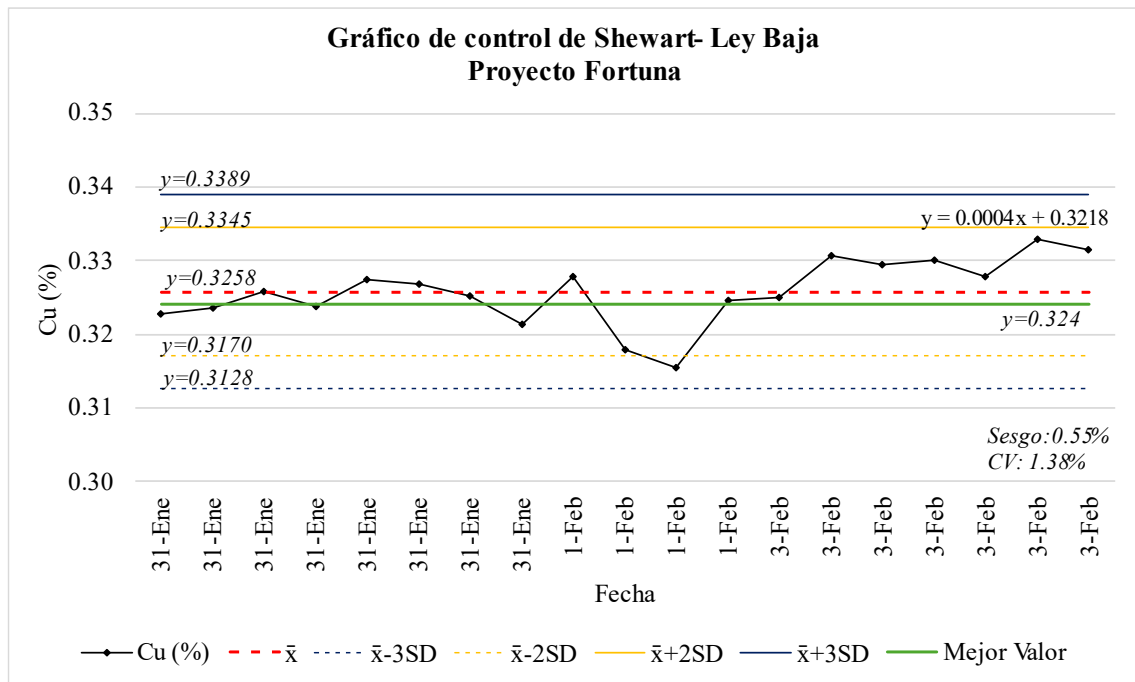


Gráfico 19. Gráfico de control de Shewart para control de ley baja de cobre.

#### 4.4.2. Análisis del Estándar de Ley Media

Se utilizaron 27 estándares de ley media, el sesgo positivo de 0.71% indica que las muestras están distribuidas ligeramente asimétricamente hacia valores altos; es decir, que hay valores más altos que la media; aunque, el coeficiente de variación bajo de 1.04% indica que la variabilidad de los datos es baja con relación con la media; es decir, que los datos están relativamente cerca a la media y no hay una gran dispersión.

Tabla 29. Estadísticas básicas del estándar de ley media para el cobre

| Estadísticas        | Estándar de ley media – Cu (%) |
|---------------------|--------------------------------|
| Número              | 27                             |
| Media               | 0.5751                         |
| Mediana             | 0.5729                         |
| Q1                  | 0.5699                         |
| Q3                  | 0.5787                         |
| Mínimo              | 0.5675                         |
| Máximo              | 0.5866                         |
| Desviación Estándar | 0.0060                         |
| Varianza            | 0.00004                        |
| Sesgo               | 0.71%                          |
| Coef. Variación     | 1.04%                          |

En este estándar, la exactitud es aceptable debido a que el sesgo es menor al 5% y el coeficiente de variación es bajo; y todos los valores están dentro de los límites aceptables ( $\bar{x} \pm 3SD$ ) además, según el gráfico control se evidencia que la media de los datos es ligeramente mayor que el mejor valor certificado (Tabla 30 y Gráfico 20).

Tabla 30. Resultados de Cu para el estándar de ley media

| Sondaje | Cu (%) | $\bar{x}$ | $\bar{x}-3SD$ | $\bar{x}-2DS$ | $\bar{x}+2SD$ | $\bar{x}+3DS$ | Valor atípico |
|---------|--------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| For1    | 0.5737 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For1    | 0.5785 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For2    | 0.5729 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For2    | 0.5866 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For2    | 0.5692 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For2    | 0.5789 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For3    | 0.5695 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For3    | 0.5856 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For4    | 0.5702 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For5    | 0.5719 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For5    | 0.5721 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For6    | 0.5848 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For6    | 0.5705 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For6    | 0.5728 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For7    | 0.5783 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For7    | 0.5815 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For7    | 0.5745 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For7    | 0.5776 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For8    | 0.5704 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For8    | 0.5692 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For8    | 0.5682 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For8    | 0.5675 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For9    | 0.5684 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For9    | 0.5688 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For10   | 0.5785 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For10   | 0.5852 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |
| For10   | 0.5819 | 0.5751    | 0.5571        | 0.5631        | 0.5871        | 0.5930        | No            |

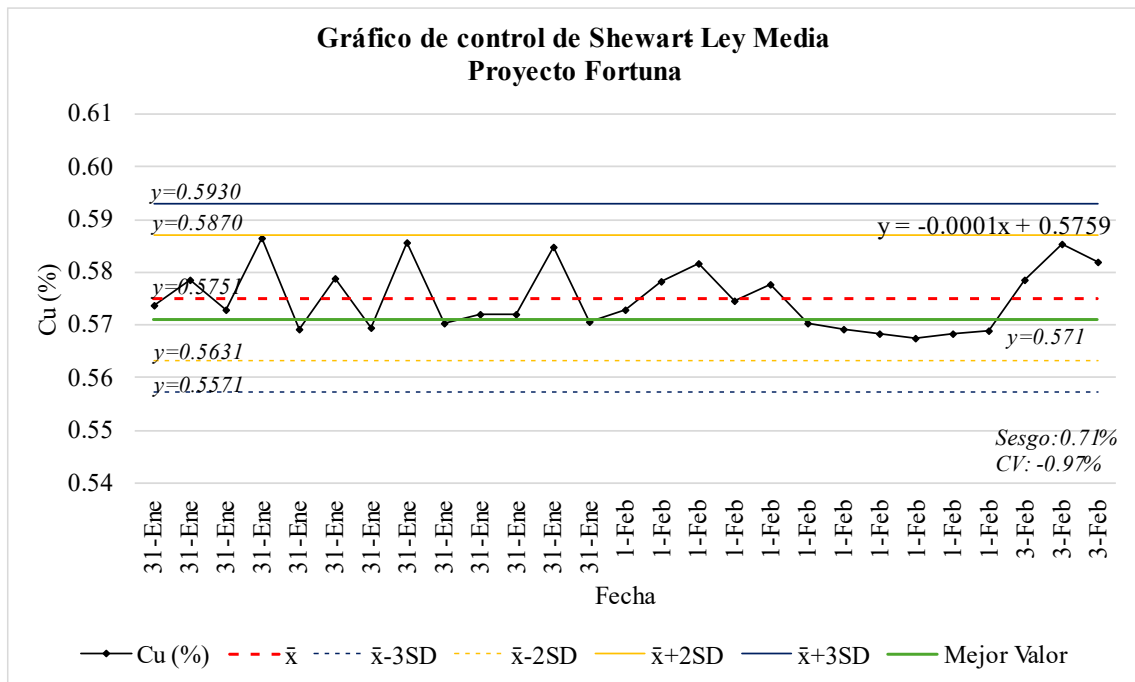


Gráfico 20. Gráfico de control de Shewart para control de ley media de cobre.

#### 4.4.3. Análisis del Estándar de Ley Alta

Se utilizaron 4 estándares de ley alta, el sesgo negativo de -0.97% indica que las muestras están distribuidas ligeramente asimétricamente hacia valores bajos; es decir, que hay valores más bajos que la media; el coeficiente de variación moderado de 1.50% indica que la variabilidad de los datos es moderada con relación con la media, pero no de manera excesiva.

Tabla 31. Estadísticas básicas del estándar de ley alta para el cobre

| Estadísticas        | Estándar de ley baja – Cu (%) |
|---------------------|-------------------------------|
| Número              | 4                             |
| Media               | 1.2775                        |
| Mediana             | 1.2800                        |
| Q1                  | 1.2650                        |
| Q3                  | 1.2925                        |
| Mínimo              | 1.2500                        |
| Máximo              | 1.3000                        |
| Desviación Estándar | 0.0192                        |
| Varianza            | 0.00037                       |
| Sesgo               | -0.97%                        |
| Coef. Variación     | 1.50%                         |

En este estándar, la exactitud es aceptable debido a que el sesgo es menor al 5% y el coeficiente de variación es moderado; sin embargo, al ser poca la población es un valor admisible; y todos los valores están dentro de los límites aceptables ( $\bar{x} \pm 3SD$ ) además, según el gráfico control se evidencia que la media de los datos es ligeramente menor que el mejor valor certificado (Tabla 32 y Gráfico 21).

Tabla 32. Resultados de Cu para el estándar de ley alta

| Sondaje | Cu (%) | $\bar{x}$ | $\bar{x}-3SD$ | $\bar{x}-2SD$ | $\bar{x}+2SD$ | $\bar{x}+3SD$ | Valor atípico |
|---------|--------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| For6    | 1.2900 | 1.2775    | 1.2199        | 1.2391        | 1.3159        | 1.3351        | No            |
| For7    | 1.2500 | 1.2775    | 1.2199        | 1.2391        | 1.3159        | 1.3351        | No            |
| For8    | 1.2700 | 1.2775    | 1.2199        | 1.2391        | 1.3159        | 1.3351        | No            |
| For10   | 1.3000 | 1.2775    | 1.2199        | 1.2391        | 1.3159        | 1.3351        | No            |

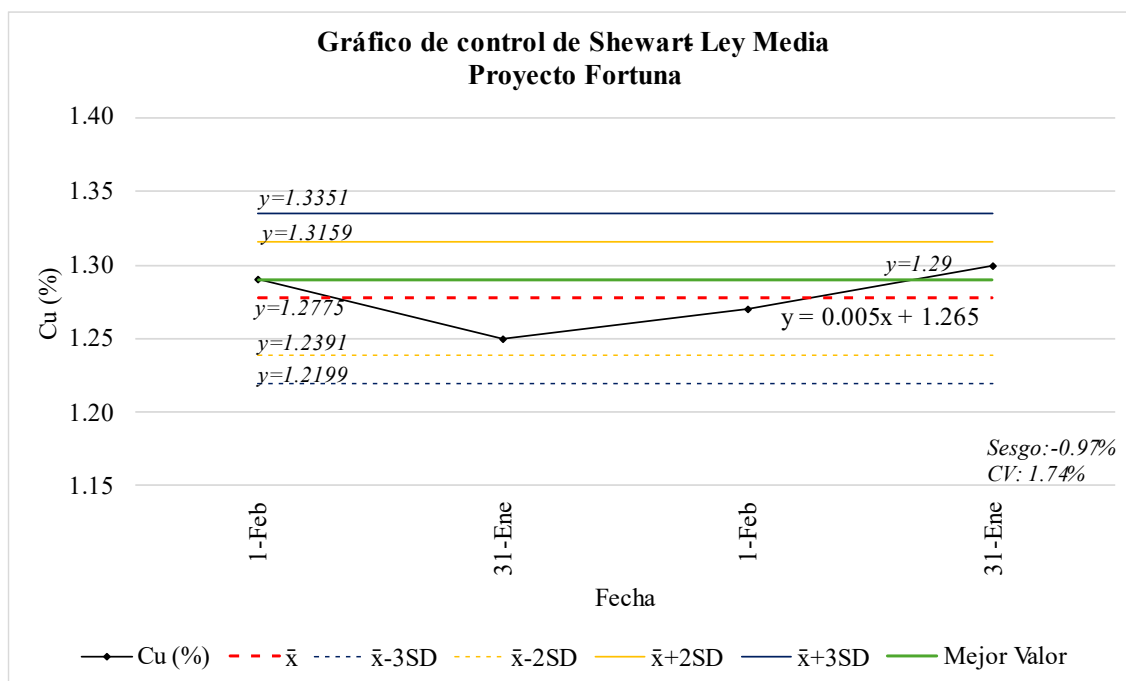


Gráfico 21. Gráfico de control de Shewart para control de ley alta de cobre.

#### 4.5. Control de la Contaminación

La evaluación de la contaminación en las diferentes partes del proceso de muestreo, preparación y análisis de las muestras se realiza a través del resultado de los análisis de las muestras tipo blanco. El método utilizado para calcular la exactitud fue usando el gráfico de Shewart considerando para los cálculos el valor de la muestra precedente (Simon, 2008); de esta manera, durante la perforación del Proyecto Fortuna se utilizaron dos tipos de blancos: blancos finos y gruesos (Tabla 33) y los gráficos muestran resultados aceptables.

Tabla 33. Resumen de resultados de los blancos utilizados en la perforación del Proyecto Fortuna

| Elemento | Blanco Fino |              |       | Blanco Grueso |              |       |
|----------|-------------|--------------|-------|---------------|--------------|-------|
|          | Nro.        | Val. Atípico | Error | Nro.          | Val. Atípico | Error |
| Cu       | 21          | 0            | 0.0%  | 21            | 0            | 0.0%  |

#### 4.5.1. Análisis del Blanco Fino

Se utilizaron 21 blancos finos con resultados extremadamente pequeños, estadísticamente es una población agrupada alrededor de la media sin mucha dispersión y poca variabilidad.

Tabla 34. Estadísticas básicas del blanco fino para el cobre

| <b>Estadísticas</b> | <b>Blanco fino – Cu (%)</b> |
|---------------------|-----------------------------|
| Número              | 21                          |
| Media               | 0.0008                      |
| Mediana             | 0.0008                      |
| Q1                  | 0.0007                      |
| Q3                  | 0.0009                      |
| Mínimo              | 0.0006                      |
| Máximo              | 0.0014                      |
| Desviación Estándar | 0.0002                      |
| Varianza            | 0.00000004                  |

Debido a que los datos son mínimos cualquier variación puede ser significativa, por lo que al analizar con la muestra precedente no se evidencia contaminación para el cobre (Tabla 35 y Gráfico 22).

Tabla 35. Resultados de Cu para el blanco fino.

| <b>Sondaje</b> | <b>Muestra control (BF)</b> | <b>Cu (%)</b> | <b>Muestra precedente</b> | <b>Cu (%)</b> | <b>Valor límite</b> | <b>Valor atípico</b> |
|----------------|-----------------------------|---------------|---------------------------|---------------|---------------------|----------------------|
| For1           | 310130                      | 0.0008        | 310130                    | 0.0008        | 0.0015              | No                   |
| For2           | 310311                      | 0.0008        | 309895                    | 0.1206        | 0.0015              | No                   |
| For2           | 310367                      | 0.0007        | 309954                    | 0.0274        | 0.0015              | No                   |
| For2           | 310398                      | 0.0006        | 310012                    | 0.0002        | 0.0015              | No                   |
| For3           | 310410                      | 0.0007        | 310077                    | 0.0003        | 0.0015              | No                   |
| For3           | 310452                      | 0.0008        | 310452                    | 0.0008        | 0.0015              | No                   |
| For3           | 310494                      | 0.0007        | 310310                    | 0.0604        | 0.0015              | No                   |
| For4           | 310501                      | 0.0010        | 310366                    | 0.0509        | 0.0015              | No                   |
| For4           | 310575                      | 0.0007        | 310397                    | 0.0215        | 0.0015              | No                   |
| For4           | 310587                      | 0.0006        | 310409                    | 0.2306        | 0.0015              | No                   |
| For5           | 310608                      | 0.0006        | 310451                    | 0.0816        | 0.0015              | No                   |
| For5           | 310873                      | 0.0011        | 310493                    | 0.8507        | 0.0015              | No                   |
| For6           | 310078                      | 0.0007        | 310078                    | 0.0007        | 0.0015              | No                   |
| For7           | 310656                      | 0.0009        | 310574                    | 0.2224        | 0.0015              | No                   |
| For8           | 310766                      | 0.0008        | 310586                    | 0.0020        | 0.0015              | No                   |
| For8           | 310793                      | 0.0006        | 310607                    | 0.0062        | 0.0015              | No                   |
| For8           | 310819                      | 0.0008        | 310819                    | 0.0008        | 0.0015              | No                   |
| For9           | 309846                      | 0.0014        | 310765                    | 0.1667        | 0.0015              | No                   |
| For10          | 309896                      | 0.0010        | 310792                    | 0.1142        | 0.0015              | No                   |
| For10          | 309955                      | 0.0010        | 310818                    | 0.0042        | 0.0015              | No                   |
| For10          | 310013                      | 0.0007        | 310872                    | 0.0524        | 0.0015              | No                   |

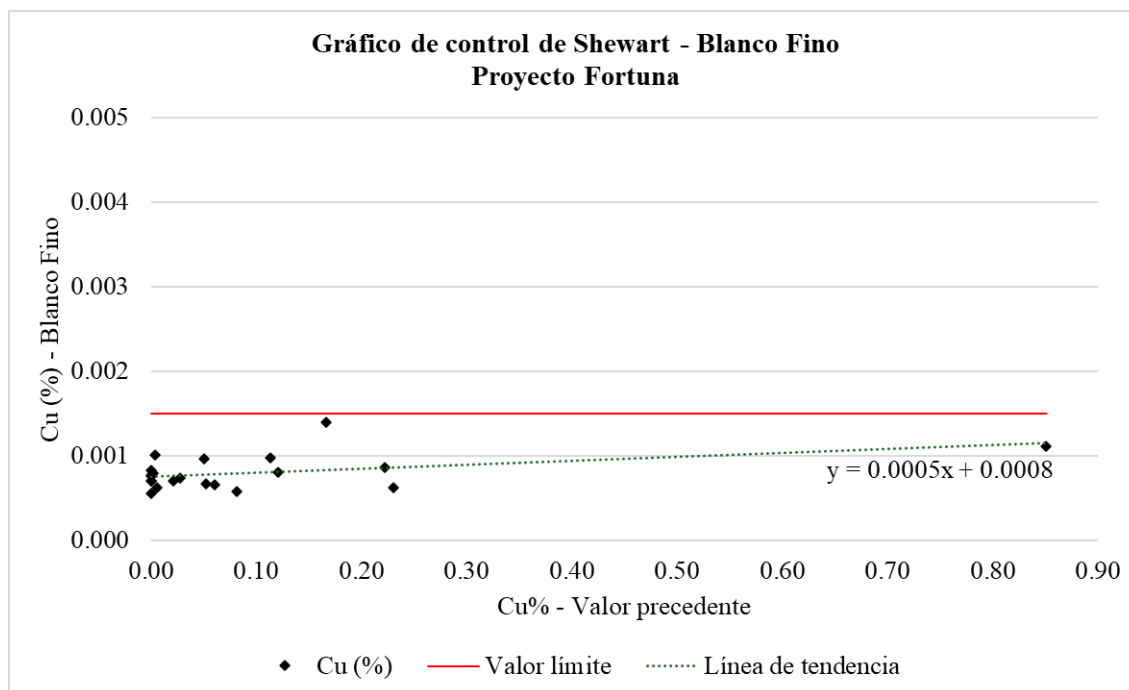


Gráfico 22. Gráfico de control de Shewart para control de blanco fino con muestra precedente.

#### 4.5.2. Análisis del Blanco Grueso

Se utilizaron 21 blancos gruesos con resultados extremadamente pequeños, estadísticamente es una población agrupada alrededor de la media sin mucha dispersión y poca variabilidad.

Tabla 36. Estadísticas básicas del blanco grueso para el cobre

| Estadísticas        | Blanco grueso – Cu (%) |
|---------------------|------------------------|
| Número              | 21                     |
| Media               | 0.0008                 |
| Mediana             | 0.0007                 |
| Q1                  | 0.0006                 |
| Q3                  | 0.0008                 |
| Mínimo              | 0.0004                 |
| Máximo              | 0.0014                 |
| Desviación Estándar | 0.0002                 |
| Varianza            | 0.00000006             |

Debido a que los datos son mínimos cualquier variación puede ser significativa, por lo que al analizar con la muestra precedente no se evidencia contaminación para el cobre (Tabla 37 y Gráfico 23).

Tabla 37. Resultados de Cu para el blanco grueso.

| <b>Sondaje</b> | <b>Muestra control (BF)</b> | <b>Cu (%)</b> | <b>Muestra precedente</b> | <b>Cu (%)</b> | <b>Valor límite</b> | <b>Valor atípico</b> |
|----------------|-----------------------------|---------------|---------------------------|---------------|---------------------|----------------------|
| For1           | 310130                      | 0.0009        | 310130                    | 0.0009        | 0.0030              | No                   |
| For2           | 310311                      | 0.0005        | 309912                    | 0.0540        | 0.003               | No                   |
| For2           | 310367                      | 0.0005        | 309983                    | 0.0311        | 0.003               | No                   |
| For2           | 310398                      | 0.0008        | 310039                    | 0.0062        | 0.003               | No                   |
| For3           | 310410                      | 0.0008        | 310105                    | 0.0038        | 0.003               | No                   |
| For3           | 310452                      | 0.0007        | 310452                    | 0.0007        | 0.003               | No                   |
| For3           | 310494                      | 0.0005        | 310202                    | 0.0056        | 0.003               | No                   |
| For4           | 310501                      | 0.0007        | 310283                    | 0.0026        | 0.003               | No                   |
| For4           | 310575                      | 0.0007        | 310320                    | 0.0134        | 0.003               | No                   |
| For4           | 310587                      | 0.0006        | 310355                    | 0.0147        | 0.003               | No                   |
| For5           | 310608                      | 0.0008        | 310409                    | 0.2306        | 0.003               | No                   |
| For5           | 310873                      | 0.0014        | 310440                    | 0.0605        | 0.003               | No                   |
| For6           | 310078                      | 0.0007        | 310078                    | 0.0007        | 0.003               | No                   |
| For7           | 310656                      | 0.0008        | 310547                    | 0.0930        | 0.003               | No                   |
| For8           | 310766                      | 0.0013        | 310557                    | 0.0358        | 0.003               | No                   |
| For8           | 310793                      | 0.0007        | 310642                    | 0.0009        | 0.003               | No                   |
| For8           | 310819                      | 0.0006        | 310819                    | 0.0006        | 0.003               | No                   |
| For9           | 309846                      | 0.0004        | 310702                    | 0.0075        | 0.003               | No                   |
| For10          | 309896                      | 0.0008        | 310733                    | 0.0593        | 0.003               | No                   |
| For10          | 309955                      | 0.0010        | 310773                    | 0.1238        | 0.003               | No                   |
| For10          | 310013                      | 0.0008        | 310840                    | 0.0035        | 0.003               | No                   |

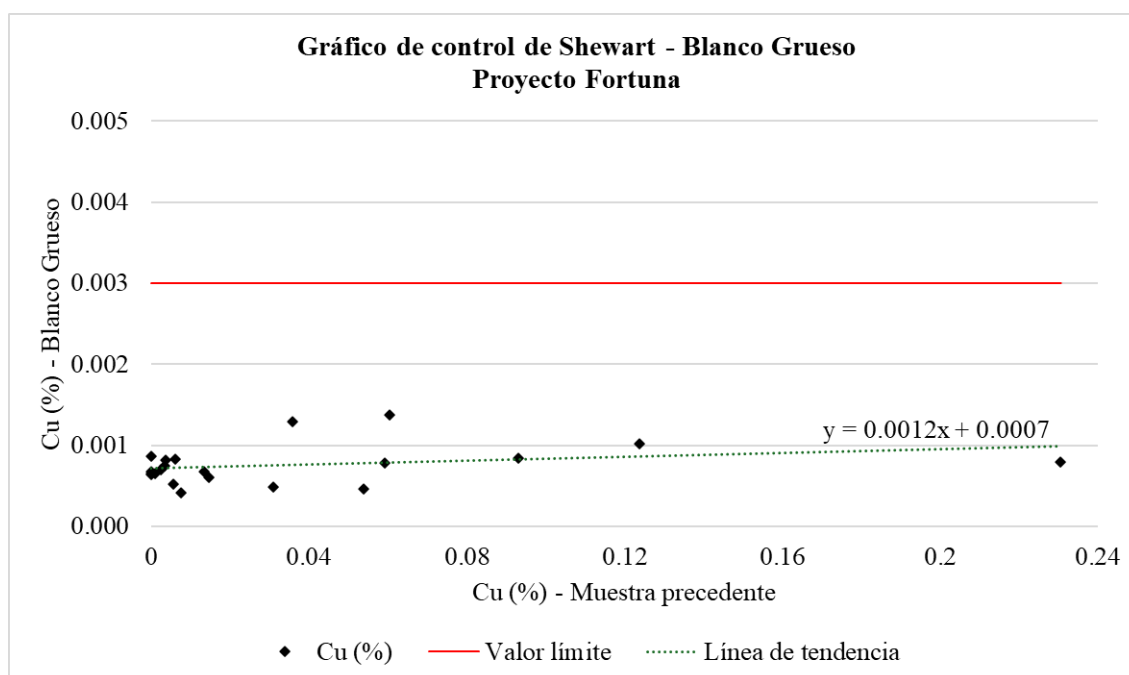


Gráfico 23. Gráfico de control de Shewart para control de blanco grueso con muestra precedente

#### 4.6. Contrastación de la Hipótesis

El control de calidad utilizado en el muestreo geoquímico en el Proyecto Cu-Fe Fortuna es adecuado debido a los resultados de precisión y sesgo; de esta manera, la alta precisión demostrada con un error relativo inferior al 5% indica que la toma de duplicados (muestras gemelas, duplicados gruesos y finos) refleja la capacidad para reproducir los valores de las muestras originales; por otro lado, el bajo sesgo del muestreo y posterior análisis con un sesgo menor al 5% sugiere que los resultados de los estándares están próximos al valor real del elemento de interés. Por lo cual, se contrasta la hipótesis de que el control de calidad utilizado en el Proyecto Cu-Fe es confiable y adecuado, debido al bajo error relativo y al bajo sesgo en el muestreo geoquímico.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1. Conclusiones**

El protocolo de control de calidad incluye el corte, muestreo, preparación y análisis de muestras y la evaluación de resultados. Este protocolo fue mejorado al incorporar análisis adicionales, como absorción atómica para cobre y análisis volumétrico para hierro, en casos que superan los límites de detección.

La campaña de perforación en el Proyecto Fortuna se implementaron prácticas de muestreo para garantizar la calidad de la información, por lo que, la tasa de inserción en las muestras de control (estándares, duplicados y blancos) fue adecuada para asegurar la precisión y exactitud al ser 17.3% que es superior al recomendado.

El cálculo del error relativo para determinar la precisión en las muestras tipo duplicados muestra resultados dentro del rango aceptable, para la evaluación del cobre, la muestra gemela presenta 3.8% de error, mientras que los duplicados gruesos y finos presentan un error de 0%; y para el elemento hierro, todos los duplicados presentan un error de 0%. Estos valores indican que el procedimiento de corte, muestreo, preparación y análisis de muestras fue efectivo.

El cálculo del sesgo en los resultados de los estándares para determinar la exactitud, muestra resultados dentro del rango aceptable, es decir, los tres tipos de estándares (ley baja, media y alta) presentan sesgos por debajo del 5% con valores que oscilan entre -0.97% y 0.55%. Estos resultados, confirman que los métodos analíticos y de calibración del laboratorio fueron efectivos.

La contaminación durante el proceso de muestreo, preparación y análisis de las muestras mostró resultados sin valores atípicos, es decir, con un error del 0%; esto indica que los procedimientos para controlar la contaminación fue efectiva.

## **5.2. Recomendaciones**

Los ingenieros geólogos del Proyecto Fortuna deben revisar periódicamente el protocolo de control de calidad incorporando nuevas técnicas y metodologías que puedan fortalecer más la confiabilidad de la información.

Los ingenieros geólogos del Proyecto Fortuna deben revisar los métodos de calibración de los instrumentos de laboratorio como espectrómetros, balanzas y pH-metros, para asegurar resultados consistentes y precisos a lo largo del tiempo, minimizando cualquier desviación.

Los ingenieros geólogos del Proyecto Fortuna deben explorar tecnologías emergentes y adaptarse a los avances en las normativas como la espectrometría de masa de alta resolución o análisis automatizado de datos, para estar preparados para enfrentar desafíos futuros en la evaluación de recursos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abzalov, MZ. 2008. Quality Control of Assay Data: a Review of Procedures for Measuring and Monitoring Precision and Accuracy. *Exploration and Mining Geology*, v.17. 14p.
- Abzalov, MZ. 2011. Sampling Errors and Control of Assay Data Quality in Exploration and Mining Geology. *Applications and Experiences of Quality Control*. Rijeka, Croatia, 34 p.
- Abzalov, MZ. 2016. *Applied Mining Geology*. Springer International Publishing Switzerland. Vol 12. 443p.
- Alfaro, DE. 2022. Geología económica, muestreo y supervisión del control y aseguramiento de la calidad (QA/QC) del cuerpo Salvadora, Unidad Operativa Andaychagua-Junín. Tesis para optar el título de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa. 97p.
- Bariatska, N; Sergeieva, S. 2022. Quality Assessment of Laboratory Tests: Traditional Approaches and Current Best Practices. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv Geology*, Ucrania. 5p.
- Bariatska, N; Sergeieva, S. 2023. Control samples using for quality assurance and control (QA/QC). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv Geology*, Ucrania. 6p.
- Barton, MD.; Johnson, DA. 1996. Evaporitic source model for igneous-related Fe oxide (REE-Cu-Au-U) mineralization. *Geology* v. 24. 4p.
- Barton, MD; Johnson, DA. 2000. Alternative brine sources for Fe oxide-(Cu-Au) systems: implications for hydrothermal alteration and metals. *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & related deposits: A Global Perspective*. Adelaide, Australia. 18p.
- Bumstead, ED. 1984. Some comments on the precision and accuracy of gold analysis in exploration. *AusIMM*. 8p.
- CIM, 2018. *Mineral Exploration Best Practice Guidelines*. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Quebec, Canadá. 6p.

- CIM, 2019. Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines. Quebec, Canadá. 75p.
- Chen, H. 2008. The Marcona – Mina Justa District, South Central Perú: Implications for the Genesis and Definition of the Iron Oxide-Copper (-Gold) Ore Deposit Clan. PhD Thesis Queen's University Kingston. Ontario, Canada. 265p.
- Coombes, J. 2008. The art and science of resources estimation. Perth, Australia. 231p.
- Croakin, C; Tobias, P. 2006. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. National Institute of Standards and Technology. 150p.
- Davis, JC. 2002. Statistics and data analysis in geology. New York, Estados Unidos de América, 638p.
- Fletcher, WK. 2002 Quality control in exploration geochemistry. Mineral Exploration Research Centre. Ontario, Canadá. 67p.
- Francois-Bongarcon, D. 1998. Error variance information from paired data: application to sampling theory. Exploration Mining and Geology. 5p.
- Frietsch, R. 1978. On the magmatic origin of iron ores of the Kiruna type. Economic Geology, v. 73, 8p.
- Gallarda, TE. 2019. Análisis del método de muestreo de detritos de los taladros para voladura y control de envío de mineral en la Mina Justa, San Juan de Marcona-Nasca-Ica. Tesis para optar título de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima. 155p.
- Gan, S. et. al., 2022. Quality control in tailings resource exploration at Havelock Mine, Eswatini, The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 122, no. 7, 17p.
- Garrett RG. 1969. The determination of sampling and analytical errors in exploration geochemistry. Economic Geology. 2p.
- Groves, DI; et. al. 2010. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists. 105p.

- Gy, P. 1979. Sampling of particulate materials: Theory and Practice. Amsterdam, Países Bajos. 431p.
- Haller, AD., et.al. 2006. Geology, geochronology, and Hf and Pb isotope data of the Raul-Condestable iron oxide-copper-gold deposit, central coast of Peru. *Economic Geology*, v 101. 30p.
- Hernández, R. 2014. Metodología de la investigación. McGraw-Hill: Sexta Edición. México. 634p.
- Hidalgo, E. 2013. Control de calidad de sondeos diamantinos de exploración Proyecto Mina Justa Marcona – Ica. Informe de suficiencia para optar título de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. 156p.
- Hitzman, MW; et.al. 1995. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron-oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, v. 58. 47p.
- Howarth, R; Thompson, M. 1976. Duplicate analysis in geochemical practice: Part 2, examination of proposed method and examples of its use. *Analyst*, v. 101. 11p.
- Kane, JS. 1992. Reference samples for use in analytical geochemistry: their availability preparation and appropriate use. *Geochemical Exploration*, v. 44. 27p.
- Leaver, ME; Sketchley, DA, Bowman, WS. 1997. The benefits of the use of CCRMP's custom reference materials. Society of Mineral Analysts Conference. MSL No 637, 16 p.
- Lledó, H. 2005. Experimental studies on the origin of iron deposits; and mineralization of Sierra La Bandera, Chile. Tesis Doctoral. Binghampton, New York. 282p.
- Long, S. 2000. Assay QA/QC Program for Drilling Projects. AMEC. 62p.
- Long, S. 2003. Programa de Aseguramiento y Control de Calidad de los Ensayos para Proyectos de Perforación a un Nivel de Informe de Pre-Factibilidad a Factibilidad. AMEC. 81p.
- Manning, DAC; Pichavant, M. 1985. Volatiles and their bearing on the behaviour of metals in granitic systems. Canadian Institute of Mining and Metallurgy. Montreal, Canadá. 4p.

- Marcobre. 2021. Informe Técnico de Exploraciones-Geológico: Proyecto Fortuna. Reporte Interno. 139p
- Mark, G; Foster, DRW. 2000. Magmatic-hydrothermal albite-actinolite-apatite-rich rocks from the Cloncurry district. *Lithos*, v. 51. Queensland, Australia. 23p.
- Marschik, R; Fontbote, L. 2001. The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au(-Zn-Ag) deposits, Chile. *Economic Geology*, v. 96, 30p.
- Piercey, S. 2014. A Review of Quality Assurance and Quality Control (QA/QC) Procedures for Lithogeochemical Data. *Geoscience Canada*, v. 41. 14p.
- Pitard, FP. 1993. Pierre Gy's Sampling Theory and Sampling Practice, Heterogeneity, Sampling Correctness and Statistical Process Control, Londres, Inglaterra. 516p.
- Pitard, FP. 2005. Sampling correctness-comprehensive guidelines. AusIMM, Melbourne, Australia. 12p.
- Pollard, PJ. 2000. Evidence for magmatic fluid and metal source for Fe-oxide Cu-Au mineralization. *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & related deposits: A Global Perspective*. Adelaida, Australia. 15p.
- Pollard, PJ. 2006. An intrusion-related origin for CuAu mineralization in iron oxide-copper-gold (IOCG) provinces: *Mineralium Deposita*, v. 41. 9p.
- Potts, PJ. 2012. A Proposal for the Publication of Geochemical Data in the Scientific Literature. *Geostandards and Geoanalytical Research*, v. 36, 6p.
- Richards, JP; Mumin AH. 2013. Magmatic-hydrothermal processes within an evolving Earth: Iron-oxide-copper-gold and porphyry Cu+Mo+Au deposits. *Geology*, v.41. 4 p.
- Rogers, R.S. 1998. Forensic Geology and Mineral Exploration Projects in Quality Assurance, Continuous Quality Improvement and Standards in Mineral Resource Estimation. *Exploration and Mining Geology*, v.7. 3p.
- Rojas, C. 2022. Aplicación del sistema de control de calidad QA/QC en el proceso de muestreo geológico para validar la estimación de recursos en la mina Tambomayo, Caylloma-Arequipa. Tesis para optar el título de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco. 129p.

- Shaw, WJ. 1997. Validation of sampling and assaying quality for bankable feasibility studies. AusIMM. Wollongong, Australia, 11p.
- Sinclair, AJ; Bentzen A. 1998. Evaluation of errors in paired analytical data by a linear model. *Exploration Mining Geology*, v. 7. 7p.
- Sinclair, AJ; Blackwell GH. 2002. Applied mineral inventory estimation. Cambridge University Press, Cambridge. 381p.
- Selway, J; Ilieva, T. 2010. QA/QC Review of Scadding drill core assays. Trueclaim Exploration Inc. Ontario, Canadá. 37p.
- Sillitoe, RH. 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, v. 38, 26p.
- Silva, VM; Coimbra, JF. 2018. Using QC data to estimate the individual precisión of original simples: a duplicates-based approach. Institute of Materials, MInerals and Mining and The AusIMM. 2018. 9p.
- Simon, A. 2004. Aseguramiento y Control de la Calidad en Exploración Geológica. AMEC. 10p.
- Simon, A. 2004. Evaluation of Duplicate Samples: The Hyperbolic Method. AMEC International (Chile) S.A. 2p.
- Simon, A. 2004. Evaluation of Twin and Duplicate Samples-The Hyperbolic Method: Discussion. AMEC International (Chile) S.A. 2p.
- Simon, A. 2011. A Discussion on Current Quality-Control Practices in Mineral Exploration. AMEC International (Chile) S.A. 18p.
- Simon, A; Gosson, G. 2008. Considerations on Quality Assurance/Quality Control and Sample Security. Sampling Conference. Perth, Australia. 6p.
- Sketchley DA. 1998. Gold deposits: establishing sampling protocols and monitoring quality control. *Exploration Mining Geology*. 9p.
- Skirrow, R.G., 2010, "Hematite-group" IOCG + U ore systems: Tectonic settings, hydrothermal characteristics, and Cu-Au and U mineralizing processes: Geological Association of Canada Short Course Notes. 21p.

- Stanley, C.R., 2003. Estimating sampling errors for major and trace elements in geological materials using a propagation of variance approach. *Geochemistry, Exploration, Environment, Analysis*, v. 3 10p.
- Sterk, R. 2015. Quality control on assays: addressing some issues. AusIMM Annual Conference. Nueva Zelanda. 8p.
- Thompson, M; Howarth, R. 1973. The rapid estimation and control of precision by duplicate determinations. *Analyst* v, 98. 8p.
- Thompson, M; Howarth R. 1976. Duplicate analysis in geochemical practice: Part 1. Theoretical approach and estimation of analytical reproducibility. *Analyst* v, 101. 9p.
- Thompson, M; Howarth R. 1978. A new approach to the estimation of analytical precision. *Geochemical Exploration*, v. 9. 8p.
- Tornos, F; et. al. 2005. La génesis de los depósitos de tipo IOCG: Geología y geoquímica de mineralizaciones en Los Andes e Iberia. Instituto Geológico y Minero de España. Salamanca, España. 5p.
- Vallée, M. 1999. Sampling Quality Control. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. 10p.
- Williams, P; et. al. 2005. Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Geology, Space-Time Distribution, and Possible Modes of Origin. *Society of Economic Geology*, 676p.

## **ANEXOS**

Anexo 1. Plano de ubicación.

Anexo 2. Imagen Satelital-MDE-Topográfico

Anexo 3. Plano Geológico