

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA**

**CARACTERIZACION DE LAS VARIEDADES DE
JADEÍTA EXPLOTADA EN GUATEMALA**

INFORME DE TESIS

PRESENTADO POR

SOFÍA SALAZAR DE LEON

ESTUDIANTE DE LA CARRERA DE

QUÍMICA

GUATEMALA, JUNIO DE 2,004.

INDICE DEL CONTENIDO

1. Resumen	1
2. Introducción	2
3. Antecedentes	4
3.1 Metamorfismo de las Rocas	4
3.2 Mineralogía de la Jadeíta	6
3.2.1 Familia de los Piroxenos	6
3.2.2 Serie de los Piroxenos Alcalinos	9
3.2.2.1 Las Jadeítas	9
3.2.2.2 Ocurrencia de Jadeíta en Guatemala	11
3.3 Química Mineral de las Jadeítas	15
3.3.1 Cristalografía	15
3.4 Causas del Color en los Minerales	18
3.5 Efectos de los Elementos Cromóforos en los Minerales	19
3.5.1 Iones Metálicos Cromóforos	20
3.5.2 Elementos Cromóforos de las series de los Lantánidos y Actínidos	21
3.6 Descripción Mineralógica de la Jadeíta	22
3.6.1 Propiedades Físicas	22
3.6.2 Propiedades Químicas	22
4. Justificación	23
5. Objetivos	24
5.1 Objetivos Generales	24
5.2 Objetivos Específicos	24
6. Hipótesis	25
7. Materiales y Métodos	26
7.1 Universo y Muestra	26
7.2 Materiales	26
7.3 Metodología	26
8. Resultados	29
9. Discusión de Resultados	48
10. Conclusiones	56
11. Recomendaciones	57
12. Referencias	58
13. Anexos	60
Anexo No.1: Glosario	61
Anexo No.2: Equipo Siemens SRS 3000	64
Anexo No.3: Informe de Resultados	65

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de las Facies Metamórficas.	5
Figura 2. Diagrama del grado de metamorfismo de algunos Minerales	6
Figura 3. Diagrama ternario de las fases del sistema jadeíta-augita-acmita	10
Figura 4. Modelo de la estructura de los piroxenos mostrando los Sitios octaédricos M_1 y M_2 en las jadeítas.	10
Figura 5. Mapa geográfico de Guatemala.	12
Figura 6. Mapa geográfico del municipio San Agustín Acasaguastlán, El Progreso.	13
Figura 7. Diagrama del modelo del proceso de formación de la jadeíta.	14

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones de medición del sistema FRX, para elementos mayores. F: detector de flujo; C: detector de centelleo.	27
Tabla 2. Condiciones de medición del sistema FRX, para elementos traza. F: detector de flujo; C: detector de centelleo.	28
Tabla 3. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-01 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	29
Tabla 4. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-02 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	30
Tabla 5. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-03 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	31
Tabla 6. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-04 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	32
Tabla 7. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-05 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	33
Tabla 8. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-06 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	34
Tabla 9. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-07 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	35
Tabla 10. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-08 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	36
Tabla 11. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-09 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	37
Tabla 12. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-10 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	38
Tabla 13. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-11 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	39
Tabla 14. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-12 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	40
Tabla 15. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-13 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	41

Tabla 16. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-14 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	42
Tabla 17. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-17 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	43
Tabla 18. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-16 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	44
Tabla 19. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-17 en el sistema jadeíta-acmita-augita.	45
Tabla 20. Resultados de los elementos menores en cada una de las muestras de jade.	46
Tabla 21. Recálculo de seis átomos de oxígeno a cuatro átomos de oxígeno en cada una de las muestras.	48
Tabla 22. Composición porcentual del sistema jadeíta-ferroaugita-augita.	49

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. Variación composicional de los elementos traza en cada una de las muestras.	47
Gráfica 2. Composición de las muestras en el sistema jadeita-ferroaugita-augita.	50
Gráfica 3. Correlación geoquímica aluminio y sodio.	51
Gráfica 4. Correlación geoquímica de hierro y cromo en las muestras de jade analizadas.	52
Gráfica 5. Correlación geoquímica de hierro y zinc en las muestras de jade analizadas.	52
Gráfica 6. Correlación geoquímica de hierro y cobalto en las muestras de jade analizadas.	53
Gráfica 7. Correlación geoquímica de hierro y níquel en las muestras de jade analizadas.	53
Gráfica 8. Correlación geoquímica de hierro y vanadio en las muestras de jade analizadas.	54
Gráfica 9. Correlación geoquímica de hierro y cobre en las muestras de jade analizadas.	54

1. RESUMEN

El jade es una piedra semipreciosa cuya explotación y comercialización en Guatemala data de la época de los Mayas. La cultura Maya utilizó el jade no solo como ornamento de nobles y sacerdotes, sino también le atribuyó poderes curativos estableciéndose un mercado de esta piedra a lo largo de todo el imperio. A partir del año 1,952, cuando se redescubrieron los yacimientos de jade en Guatemala, la exploración, explotación y comercialización de joyas y artefactos de jade se desarrolló tomando un nuevo auge. Actualmente se comercializan distintas variedades de jade, cuyo valor depende principalmente de su coloración. El presente estudio utilizó la Fluorescencia de Rayos-X para determinar la variación del contenido de elementos cromóforos en la estructura química del jade considerando que son éstos los responsables de la coloración de este mineral.

Las muestras de jade objeto de este estudio fueron proporcionadas por empresas que comercializan el jade principalmente en Antigua Guatemala. El jade se caracteriza por tener un color blanco a verde que en algunas ocasiones puede verse incluso negro, con nuevas variedades de color azul, champagne y violeta. Las muestras fueron clasificadas, previo a su análisis químico, en función del color con la ayuda de los artesanos de los talleres donde se trabaja este mineral denominándose las mismas J-01 a J-17. Una vez clasificadas se procedió a la molienda y análisis por Fluorescencia de Rayos-X, en el laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Durante el análisis se determinó la concentración de elementos mayores y traza. Los resultados fueron interpretados en función de las soluciones sólidas que se forman durante la cristalización del jade.

Los resultados de los análisis de las muestras de jade mostraron que donde la coloración que se observa es clara (J-01 a J-06) se clasifican como jadeítas ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$), mientras que las oscuras (J-07 a J-16) pertenecen a la fase de la ferroaugita ($\text{FeCaSi}_2\text{O}_6$). Los elementos cromóforos encontrados son: cromo, vanadio, níquel, zinc, cobalto y cobre. La coloración del jade depende de la proporción del ion Fe^{+2} y la relación con cada ion cromóforo.

El análisis químico de jade puede ser utilizado como herramienta en la identificación de artefactos precolombinos de origen guatemalteco, debido a que las condiciones de formación de este mineral están restringidas a tan solo algunas regiones alrededor del mundo.

INTRODUCCIÓN

Guatemala se encuentra en una zona geológica muy diversa, ya que en el país convergen los límites de tres placas tectónicas: Norte América, Caribe y Cocos. Por esta razón, puede encontrarse en Guatemala una gran variedad de formaciones rocosas, que incluyen rocas ígneas, rocas sedimentarias y rocas metamórficas de diversa naturaleza y grado metamórfico (1).

Por la variedad de formaciones rocosas presentes; Guatemala posee una riqueza mineral muy diversa, misma que puede ser utilizada en una amplia gama de industrias, tales como: las arcillas en aplicaciones médicas, el mármol en decoración, el cuarzo en la industria del vidrio, los feldespatos en la industria de porcelana, los agregados rocosos en la construcción, y otras (2).

El uso de los minerales por el hombre se remonta a la prehistoria, cuando estos se constituyeron en la fuente de sus herramientas primitivas (Edad de Piedra). Luego con el avance logrado para encender y mantener el fuego, el hombre primitivo notó que junto a las cenizas aparecían nuevos materiales los cuales podían ser moldeados en nuevos instrumentos (Edad del Hierro, Bronce y Cobre), cuya dureza y resistencia fue cada vez mejorada. De la misma manera los colores y brillo de los minerales cautivaron al hombre primitivo tal y como ocurre en la actualidad por lo cual ciertos minerales adquirieron uso como ornamentos (3).

En Mesoamérica y particularmente gran parte de Guatemala, floreció una de las grandes civilizaciones antiguas, los Mayas, quienes según estudios muestran que la civilización maya aprovechaba la gran variedad de rocas en la industria de la construcción (fabricación de cemento a base de cal), en la medicina, y también la utilizaban como ornamento y joyería de uso diario y ofrendas en sus entierros. Distintas variedades de piedras semipreciosas (jade, obsidiana, etc.) han sido explotadas en Guatemala a través de los años. El jade es un mineral asociado a rocas metamórficas, muy utilizado en la actualidad en joyería pero poco estudiado (2), (3).

El jade fue reencontrado en Guatemala en el año de 1,952, en el valle del río Grande Motagua por Roberth Leslie (4). En la investigación y explotación de jade, se han encontrado muestras con una gran variación de colores, por ejemplo: las jadeítas de la aldea el Manzanotal, San Cristóbal Acasaguastlán, El Progreso son generalmente blanquecinas, mientras que las del río la Palmilla que se localiza en el departamento de El Progreso, son negro laqueado o verde oscuro, encontrándose variedades de color intermedio entre estos extremos y últimamente variedades moradas, rojas, amarillas, etc. (5).

Por esta diversidad de colores que presentan los jades de Guatemala se ha considerado importante desarrollar una metodología sencilla y rápida para

caracterizar los elementos cromóforos presentes y determinar la influencia de los mismos en el color de cada variedad de jade que se comercializa en Guatemala. Se propone utilizar para este efecto una técnica de análisis no destructiva y que al mismo tiempo provea información a partir de un solo de análisis multielemental, siendo la más adecuada la Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos-X. La Fluorescencia de Rayos-X es el método analítico más utilizado para la identificación cualitativa y cuantitativa de los elementos que tienen un número atómico mayor que el oxígeno.

3. ANTECEDENTES

3.1 METAMORFISMO DE LAS ROCAS

El metamorfismo (del griego “cambiar forma”) es uno de los fenómenos físicos y químicos que acompañan al proceso geológico de formación de montañas en zonas tectónicamente activas donde hay convergencia de placas. El choque de placas puede ser continente-continente, como actualmente ocurre en los Himalayas, o bien continente-corteza oceánica, como se observa hoy en día en la costa del Océano Pacífico de Guatemala. Los movimientos tectónicos en las márgenes de placas convergentes dan como resultado cabalgamiento, plegamiento y desarrollo de zonas de falla en las partes superficiales de la corteza terrestre que se asocian a la deformación no elástica de las rocas. Mientras que a gran profundidad estos movimientos resultan en deformación plástica y metamorfismo de los constituyentes de las rocas e incluso, algunas veces, desarrollo de magmas (fusión de las rocas) formando cámaras magmáticas (6), (7).

El metamorfismo se puede visualizar como el ajuste mineralógico, químico y estructural, de asociaciones minerales en el estado sólido en respuesta a los cambios de las condiciones físicas y químicas que acompañan el proceso de formación de montañas. Típicamente, aunque no siempre, el metamorfismo se debe a un aumento de la temperatura y presión. Sin embargo, fluidos ricos en especies químicamente activas juegan un papel importante en la transformación de los materiales originales, por lo que se consideran el tercer factor que favorece el metamorfismo de los materiales que conforman la corteza terrestre (6), (7).

De manera general se reconocen dos tipos de metamorfismo, el metamorfismo regional y el metamorfismo de contacto. De estos, el metamorfismo regional es importante para el presente estudio puesto que la zona que hoy se conoce como la Falla del Motagua no es más que la región geológica que demarca los límites de las placas de Norte América y Caribe que convergieron en un proceso de colisión continental que se inició en el Cretácico tardío y que se extendiendo en el tiempo hasta el Terciario (6), (7).

El metamorfismo regional se caracteriza por el incremento de la temperatura y la presión dirigida (esfuerzo) sobre una gran área de la corteza terrestre. Generalmente este tipo de metamorfismo ocurre a lo largo del borde de la placa cabalgante, formando un cinturón lineal, como respuesta al incremento de las condiciones de temperatura y presión causadas por la compresión, cabalgamiento, plegamiento e intrusión de magma desde grandes profundidades (6), (7).

La cubierta sedimentaria así como los basaltos y rocas ultramáficas que componen la placa subducida pueden también sufrir metamorfismo regional. Inicialmente se producen cambios metamórficos identificados como Facie de los Esquistos Azules, el cual se caracteriza por condiciones de baja temperatura y alta presión. En condiciones extremas de alta temperatura y presión, el metamorfismo regional resultará en la formación de rocas pertenecientes a la Facie de las Eclogitas. Y si se llegan a fundir los materiales se alcanza entonces la zona de antexia, o fusión parcial de los materiales, con lo cual se forman los magmas y se abandona el campo del metamorfismo (6), (7).

La Figura 1, muestra la diferentes Facies Metamórficas que se encuentran en la naturaleza, en función de las condiciones de temperatura y presión. Investigaciones realizadas en el área de estudio indican que las rocas de la región han sido expuestas a condiciones de temperatura y presión correspondientes a las Facies de Esquistos Azules y Eclogitas (6), (7).

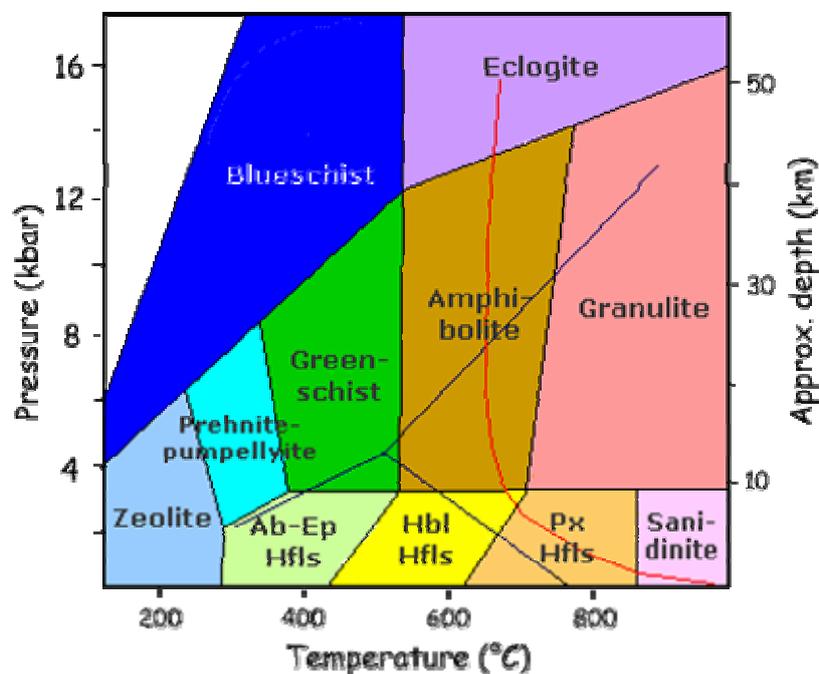


Figura 1. Diagrama de las Facies Metamórficas (8).

La composición mineral de una roca metamórfica es producto de la intervención de dos factores: presión y temperatura. Al saber las condiciones de estos dos factores bajo los cuales se han formado los nuevos minerales y la composición química de la roca original, puede determinarse el grado de metamorfismo, el cual es una medida de la intensidad con la que este proceso formó a los minerales (7).

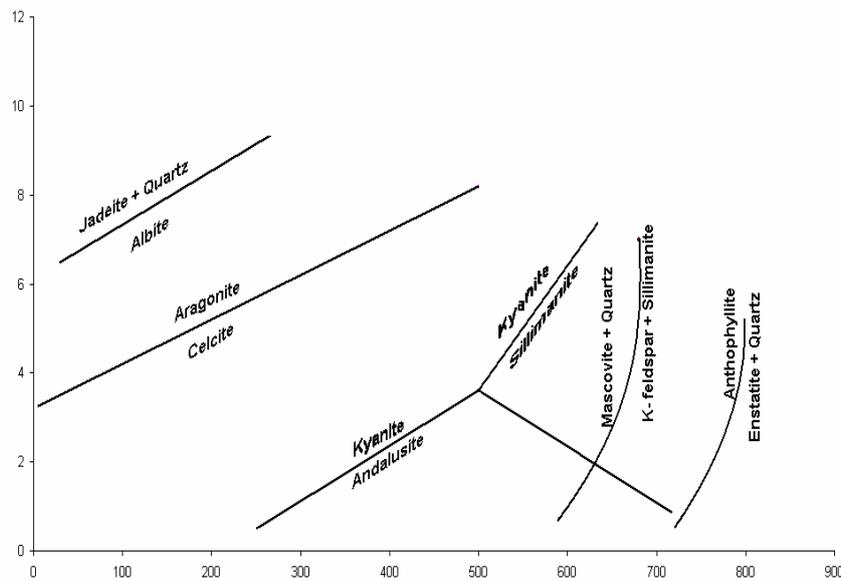


Figura 2. Diagrama del grado de metamorfismo, de algunos minerales (1).

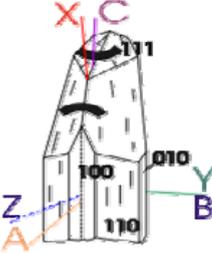
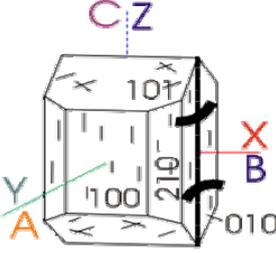
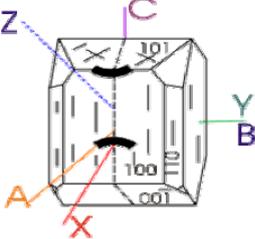
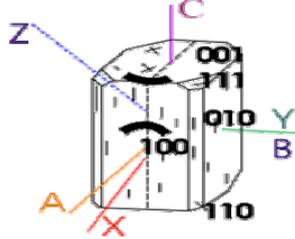
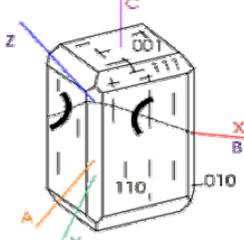
3.2 MINERALOGIA DE LA JADEITA

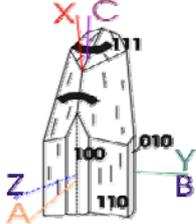
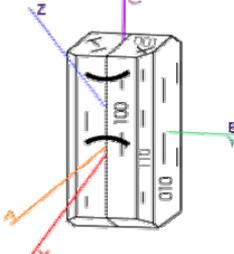
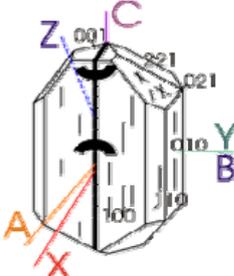
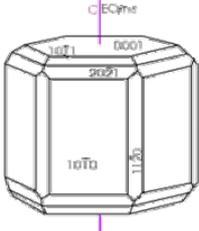
3.2.1 FAMILIA DE LOS PIROXENOS

Los piroxenos constituyen un grupo de minerales muy afines, por tener propiedades físicas y químicas muy similares y poseer estructura de cadena sencilla de óxido de silicio (Si_2O_6). La composición química de los piroxenos incluye silicatos de hierro, magnesio y calcio, a veces con aluminio, mientras que algunas variedades contienen sodio o litio. Así resulta que muchos piroxenos tienen composición de metasilicato, SiO_3R , en donde R es magnesio, hierro o calcio, raras veces manganeso o cinc; en otros piroxenos hay sustitución de silicio por aluminio según la fórmula $(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6\text{R}_2$, donde R es magnesio, hierro (Fe^{2+} ó Fe^{3+}), calcio, aluminio. Los piroxenos alcalinos tienen composición que puede expresarse por $\text{Si}_2\text{O}_6\text{R}''\text{R}'$, con $\text{R}''' =$ hierro, aluminio y $\text{R}' =$ sodio, litio (9).

Los piroxenos cristalizan en los sistemas rómbico, monoclinico y triclinico y poseen los ángulos del prisma vertical muy cercano a los 90° razón por la cual la mayoría de los piroxenos se caracteriza por una perfecta *exfoliación prismática* (9).

Existen diferentes minerales que pertenecen a la familia de los piroxenos, los cuales pueden agruparse de la siguiente manera (9):

PIROXENOS RÓMBICOS	FÓRMULA	MORFOLOGÍA
<i>Enstatita</i>	$\text{Si}_2\text{O}_6\text{Mg}_2$	
<i>Hiperstena</i>	$\text{SiO}_3(\text{Mg}, \text{Fe})$	
PIROXENOS MONOCLÍNICOS		
A. Serie Diópsida-Hedenbergita		
<i>Diópsida</i>	$\text{Si}_2\text{O}_6\text{MgCa}$	
<i>Hedenbergita</i>	$\text{Si}_2\text{O}_6\text{FeCa}$	
B. Serie de la Augita (aluminíferos)		
<i>Augita</i>	$(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6(\text{Ca}, \text{Mg}; \text{Fe}, \text{Al})$	
<i>Pigeonita</i>	$\text{Si}_2\text{O}_6(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{Ca}, \text{Mg})$	

C. Serie de los piroxenos alcalinos		
<i>Acmita-Egirina</i>	$\text{Si}_2\text{O}_6\text{Fe}^{3+}\text{Na}$	
<i>Egirina-augita</i>		
<i>Jadeíta</i>	$\text{Si}_2\text{O}_6\text{AlNa}$	
<i>Espodumena</i>	$\text{Si}_2\text{O}_6\text{AlLi}$	
<i>Nefrita</i>	$\text{Na}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{OHSi}_4\text{O}_{11})_2$	

3.2.2 SERIE DE LOS PIROXENOS ALCALINOS

3.2.2.1 LAS JADEÍTAS

El término jade ha sido aplicado no solo a la jadeíta sino también a la nefrita. Las jadeítas presentan variedad en su composición y de acuerdo a esta son subdivididas en las siguientes especies:

- *Jadeíta*: esencialmente compuesta por silicato de sodio y aluminio ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_6$).
- *Diópsido-jadeíta*: intermedia entre la jadeíta y diópsido, esencialmente formada por silicato de sodio, calcio y aluminio $[(\text{Na},\text{Al},\text{Ca},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6]$.
- *Cloromelanita*: intermedia entre jadeíta y acmita, o jadeíta, acmita y diópsido, esencialmente compuesta por silicato de sodio, calcio, magnesio, hierro y aluminio. La presencia de hierro sustituye al calcio y magnesio e influye en que el color sea un verde muy oscuro, provocando en algunas ocasiones el color negro $(\text{Na},\text{Al},\text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$ (4).

El metamorfismo de las rocas ultramáficas, denominado serpentización, en presencia de rocas sedimentarias y volcánicas de la corteza terrestre, permite las condiciones fisicoquímicas necesarias para el establecimiento del sistema Jadeíta-Augita-Acmita (Jd-Au-Ac) mediante el cual, existen en equilibrio las fases minerales que lo conforman y que dan como resultado la formación del mineral que se conoce como Jade. La estabilidad del sistema se debe al fenómeno de sustitución iónica en la estructura de los silicatos que lo forman y que genéricamente pertenecen a la familia de los piroxenos. De esta cuenta, dentro de la estructura química de los piroxenos se permite el intercambio de los cationes hierro, calcio, sodio y aluminio formando soluciones sólidas, también llamadas *series isomórficas*, cuya composición química puede ser expresada en términos de los miembros finales. Este tipo de sistemas es común en los piroxenos y permite observar la compleja distribución química de los iones de los elementos presentes, la cual es un reflejo de la composición química de los fluidos que acompañan el proceso de metamorfismo. Es por ello que cuando se analizan muestras pertenecientes a cualquiera de estos sistemas es necesario recalcular los resultados en función de las series isomórficas involucradas. En el caso del jade el sistema de facies minerales presenta una variedad de soluciones sólidas con los miembros finales Jadeíta ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$), Augita $[\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})][(\text{Al}, \text{Si})_2 \text{O}_6]$ y Acmita ($\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$). En este sistema se forman soluciones sólidas de composición variada que definen los campos de las Facies: jadeíta, omfacita, augita, cloromelanita, augita, aegerina, acmita, jadeíta-aegerina y aegerina-augita. Como se aprecia en la Figura 3, a continuación (10), (11), (12).

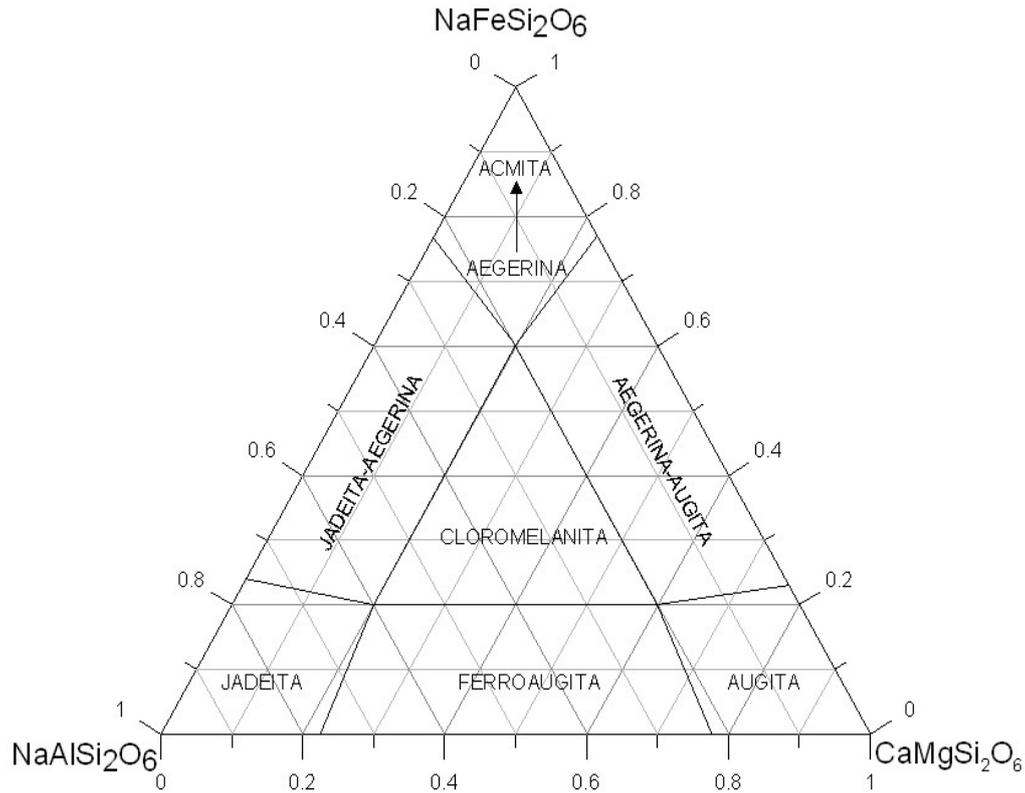


Figura 3. Diagrama ternario de las fases del sistema Jadeíta-Augíta-Acmíta (12).

Los piroxenos que pueden ser expresados por la fórmula general $\text{XY}(\text{Si}_2\text{O}_6)$, tienen una estructura que forma cadenas de tetraedros de $(\text{Si}_2\text{O}_6)^{4-}$ que crecen de manera paralela al eje de cristalización c y que se unen mediante enlaces iónicos con cationes de carga variable que ocupan los sitios estructurales denominados M_1 y M_2 en la estructura. La Figura 4 muestra una representación general de la estructura de los piroxenos.

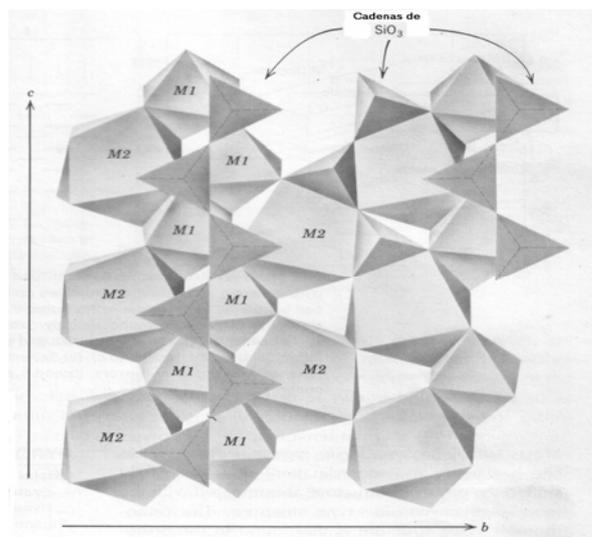


Figura 4. Modelo de la estructura de los piroxenos mostrando los sitios octaédricos M_1 y M_2 en las jadeítas (12).

Los cationes X ocupan el sitio M_2 y son de tamaño relativamente grande y carga débil, siendo generalmente Na^{+1} o Ca^{+2} , que se coordinan de manera octaédrica (N.C.=8) con el oxígeno. Los cationes Y que ocupan el sitio M_1 , son relativamente más pequeños y ocupan sitios de coordinación cúbica (N.C.=6). Dependiendo de la naturaleza del fluido que acompaña el proceso de formación de los piroxenos, estos cationes pueden ser Fe^{+2} , Fe^{+3} , Mg^{+2} , Al^{+3} , Mn^{+2} , Mn^{+3} y en algunas ocasiones Li^{+1} o Ti^{+4} (12).

3.2.2.2 OCURRENCIA DE JADEÍTA EN GUATEMALA

En 1,952 la jadeíta fue redescubierta en Guatemala por Robert Leslie (5) en un lugar cercano a la aldea El Manzanotal, San Cristóbal Acasaguastlán, El Progreso; tomando este lugar como referencia hasta la Finca Trujillo entre San Cristóbal Acasaguastlán y el caserío de Cuijo, se encontró una gran cantidad de este mineral (ver Figura 4 y Figura 5) (5).

Por la localización geológica de Guatemala, se cree que las jadeítas fueron formadas por inclusiones tectónicas en una matriz de las serpentinitas. La limitada zona geográfica donde se puede localizar a la jadeíta demuestra una pequeña extensión de 15 Km. a lo largo de la falla del Motagua, lo que permite también sugerir condiciones restringidas de petrogénesis¹. George Harlow tomó de referencia los estudios de Burke para sugerir que las colisiones oblicuas pudieron proveer las condiciones necesarias: una temprana colisión de serpentina para una condición de alta presión-temperatura seguida por una lenta fractura lateral. Las bajas presiones asociadas a las fallas laterales, permiten atrapar y acumular fluidos, los cuales al quedar liberados (por los movimientos tectónicos) pueden lavar la serpentina con fluidos caracterizados por una baja actividad de dióxido de silicio, (a_{SiO_2}). La rareza de las jadeítas sugiere una inusual, pero reproducible, combinación de eventos tectónicos para su formación (4), (5).

¹ **Petrogénesis** es el proceso de formación de las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas (5).

Guatemala



Figura 5. Mapa geográfico de Guatemala. Zona ampliada donde ocurren los afloramientos de jadeíta.

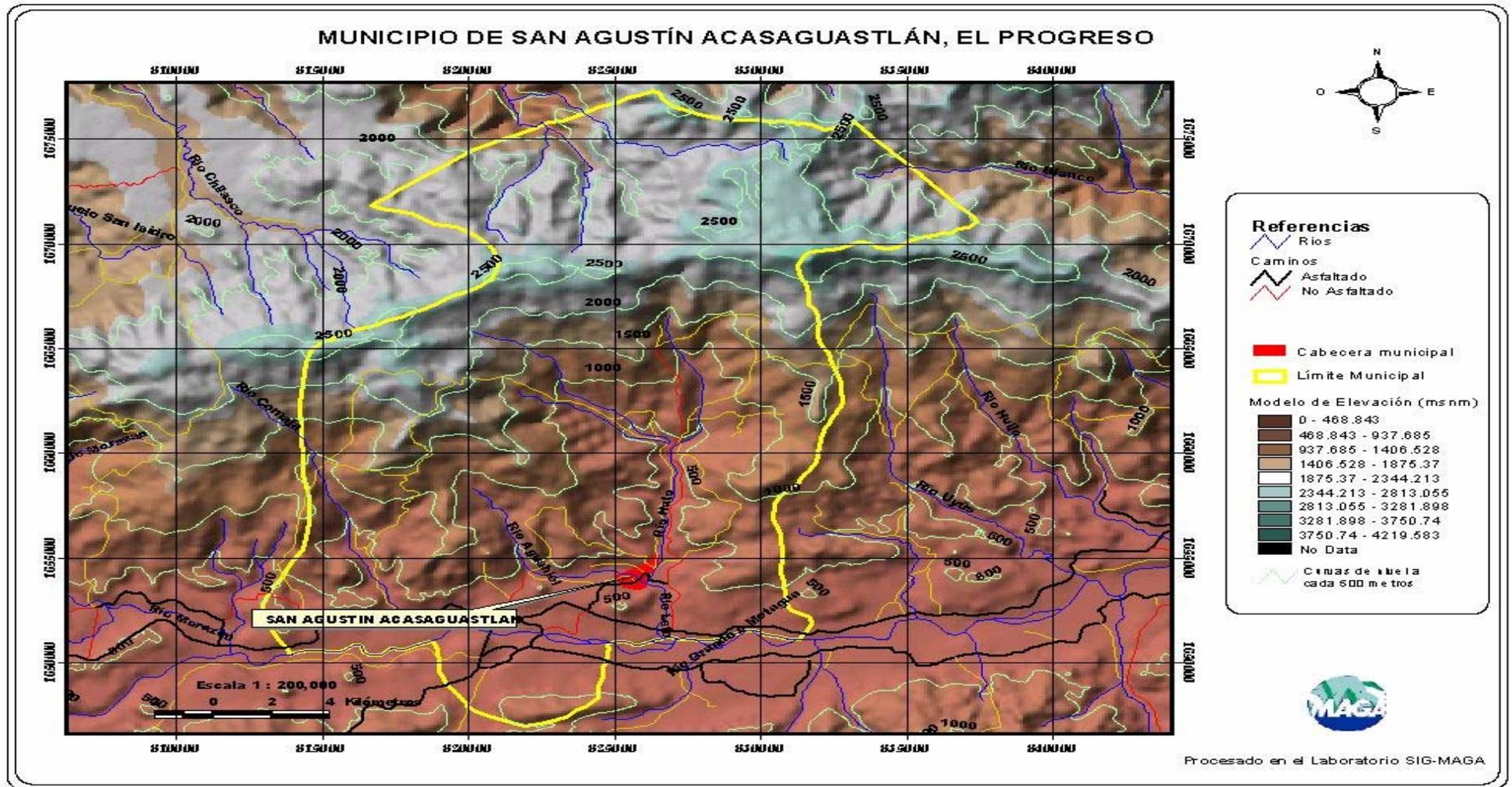


Figura 6. Mapa fisiográfico del Municipio de San Agustín Acasaguastlán, El Progreso (13).

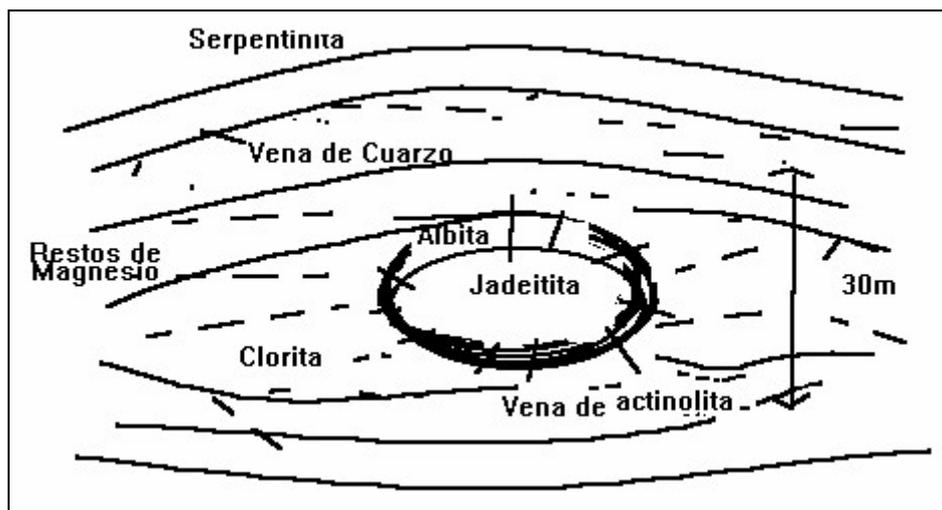


Figura 7. Diagrama del modelo del proceso de formación de la jadeíta.

Las jadeítas encontradas en las orillas del río Motagua, poseen un índice de refracción: $\alpha = 1.654$, $\gamma = 1.669$; birrefringencia de 0.015; índices que son cercanos a las jadeítas que se encuentran al sureste asiático en la región de Birmania (Birmania es el lugar donde se han encontrado las jadeítas más puras, por lo que a partir de sus características fisicoquímicas estas son utilizadas como estándar internacional), donde los índices de refracción son $\alpha = 1.65$ y $\gamma = 1.68$. Este parámetro es utilizado como indicador de pureza para las jadeítas; permitiendo de esta manera confirmar el alto grado de pureza de este mineral en América Central (4), (5).

George Harlow se sustenta en las afirmaciones de R. Coleman (1,961) para explicar que la cercana constitución monominerálica de las jadeítas y su restringida proveniencia, permiten que sean consideradas como rocas metamórficas². George Harlow, propuso que las jadeítas de Guatemala fueron creadas por reemplazo, la textura protolítica o su mineralogía no pueden reconocerse, excepto por las incrustaciones de la muscovita en los granos de jadeítas y por la corrosión de titanitas en jadeítas (5).

Las jadeítas están constituidas en más de un 90% en volumen de piroxenos jadeíticos junto con otros minerales secundarios los cuales se encuentran en muy poca proporción. Variedades microcristalinas de este mineral consisten en compactos agregados cristalinos de tamaños milimétricos hasta micrométricos; como lo son los cristales de piroxeno que pueden contener en pequeñas proporciones moscovita, albíta y titanitas (5).

G. Harlow en 1,994, describió la textura y mineralogía microscópica de las jadeítas; donde muchos de los cristales de las jadeítas procedentes de las vetas muestran zonación rítmica con bandas de $10\mu\text{m}$ a 1 mm. Pequeñas

² **Rocas Metasomáticas** son originadas por el metamorfismo de contacto hidrotermal entre las rocas ígneas y las rocas circundantes (5).

inclusiones fluidas de dos fases (100 - 10 μm), es decir inclusiones de gas-líquido, favorecen la inclusión de los fluidos en la superficie de los granos de las jadeítas cubriendo de esta manera fracturas y limitando el crecimiento del mineral en esta zona (5).

Los estudios de inclusiones fluidas permiten establecer que los cambios químicos que pueden darse primordialmente durante la formación de jadeíta a partir de un protolito³ rico en potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y dióxido de silicio (SiO_2) son (5):

- 1) El intercambio de sodio por potasio.
- 2) Un cambio de pares de sodio como NaAl por CaMg .
- 3) Una reducción de la silica.

El decrecimiento de la silica puede ser explicado por su baja a_{SiO_2} en las serpentinitas, el cual fue explicado por Coleman y Dobrestsov. El incremento del óxido de sodio (Na_2O) indica que los fluidos involucrados contienen una alta actividad de sodio, (a_{Na}) y un alto potencial de intercambio (el cual es necesario para el intercambio que se lleva a cabo entre el agua y la roca). El incremento sugerido para el óxido de aluminio (Al_2O_3) permite observar que este es inmóvil o que la relación de sodio y aluminio en solución, puede reemplazar a otros cationes para obtener la relación de $\text{Na}/\text{Al} \cong 1$ (5).

3.3 QUÍMICA MINERAL DE LAS JADEÍTAS

3.3.1 CRISTALOQUÍMICA

Las fuerzas que mantienen unidas entre sí a las moléculas de la red cristalina tienen una naturaleza eléctrica y el tipo y la intensidad de estas fuerzas tienen gran importancia para las propiedades físicas y químicas de los minerales. Por esto cuanto más fuertes son los enlaces de los átomos más duro es el cristal, mayor punto de fusión y ebullición y menor será su coeficiente de dilatación térmica (14).

La ley de Coulomb, define la fuerza de atracción (K) entre un anión y un catión como (14):

$$K = \frac{1}{E} \times \frac{e_1 \times e_2}{(r_1 \times r_2)^2}$$

E = constante dieléctrica del medio.

e_1, e_2 = carga del anión y el catión respectivo.

r_1, r_2 = radio del anión y catión.

³ **Protolito**, del griego proto que significa "precursor", lito roca o piedra". Es el precursor de una masa de roca (5).

La forma esférica de los iones es responsable de que el ión central este rodeado con un número grande de iones con carga opuesta, la tendencia que tienen los iones con diferente carga permite que se acomoden a poca distancia y los que poseen carga idéntica a distancias más lejanas del ión central, lo que permite una distribución simétrica de los iones. La suma de las cargas positivas es igual a la de las cargas negativas obteniéndose así la neutralidad eléctrica en un cristal (14).

Los iones se consideran como especies esféricas y se supone que la distancia interiónica en un cristal es la suma de los radios del anión y el catión, donde para cualquier elemento, el tamaño del ión va a depender de su estado de ionización (los estados de ionización positivos son más pequeños que los negativos) y el número de coordinación en los enlaces iónicos depende de los tamaños relativos de los iones presentes, o sea, de la relación $\text{radio}_{\text{catión}}$ y $\text{radio}_{\text{anión}}$ (14).

Cuando los minerales contienen gran cantidad de metales en la red cristalina, se cree que estos elementos metálicos se encuentran en forma de iones positivos sumergidos en un mar de electrones libres, no ligados a ningún átomo en particular. Esta forma estructural corresponde a un empaquetamiento denso de esferas, el cual transmite al cristal ciertas propiedades físicas como la conductividad eléctrica, ductilidad, maleabilidad, dureza y opacidad, entre otros (14).

Los minerales tienen la característica de formarse a partir de la cristalización de soluciones complejas que se originan en la naturaleza por la capacidad que tienen los iones de cambiarse uno por otro, este fenómeno puede ocurrir en minerales de la misma zona geológica lo que también permite caracterizar una distinta localidad (14).

La variación de los iones presentes en los minerales se conoce como *sustitución iónica*, la cual permite que dentro de la red cristalina de un mineral, un ion o un grupo iónico sean sustituidos por otro ion o grupo iónico. Este fenómeno puede darse bajo ciertas condiciones especiales donde los iones de los dos elementos sólo pueden sustituirse fácilmente si sus radios iónicos son similares y se diferencian en menos del 15%. Cuando los radios de los iones difieren entre el 15 y el 30%, la sustitución que se lleva a cabo es limitada y en ocasiones poco frecuente, y si la diferencia es mayor al 30% hay pocas probabilidades de que se dé la sustitución (14).

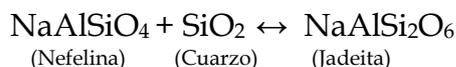
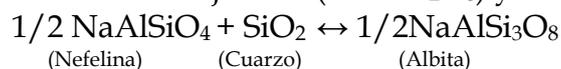
Otro factor que puede influir en la sustitución iónica es la temperatura a la cual se llevó a cabo la formación de los minerales; ya que cuanto más elevada sea esta, se favorece el desorden térmico y disminuyen los requerimientos espaciales de la red cristalina, permitiendo de esta manera la sustitución iónica sin ningún impedimento dimensional ya que también en este proceso no es indispensable que los iones posean la misma carga por lo que se mantiene la

neutralidad eléctrica del cristal debido a la sustitución simultánea en otro punto de la red de otro ión cuya carga equilibra el déficit o el exceso causado por la sustitución inicial (14).

En la *sustitución acoplada* pueden implicarse dos cationes, un catión y un anión, dos aniones, un átomo neutro o un lugar vacante en la red cristalina, por un catión o un anión con la finalidad de alcanzar la neutralidad eléctrica. El ión calcio (Ca^{2+}) puede sustituir fácilmente al ion sodio (Na^{1+}) y viceversa, creando un déficit en la carga positiva, la cual debe ser equilibrada por el intercambio del ion aluminio (Al^{3+}) por el ion silicio (Si^{4+}). De esta manera se conserva la neutralidad eléctrica del cristal, $\text{Ca}^{2+} + \text{Al}^{3+} = \text{Na}^{1+} + \text{Si}^{4+}$ (14).

También puede darse una sustitución de los elementos mayores por algunos elementos traza donde estos elementos no necesariamente forman parte de los minerales originales, sino que sustituyen a un elemento mayor que tiene el mismo radio y la misma carga generando de esta manera el fenómeno de *camuflaje*. Pero si el elemento traza posee el mismo radio pero su carga es superior a la del elemento mayor, esta sustitución proporcionará al medio mayor energía y por lo tanto el elemento que se encontraba en una concentración traza se concentrará en el mineral, generando el fenómeno de *captura* (14).

La regla de las fases mineralógicas define que el número máximo de fases que un mineral puede alcanzar, serán únicamente si el sistema permanece invariable (temperatura, presión y composición se mantienen constantes); pero durante la formación de los minerales la temperatura y presión no son constantes fijas, sino que más bien, son variables con un rango amplio de variación, permitiendo que las fases mineralógicas varíen con respecto a las condiciones a las cuales los minerales se encuentran sometidos. Por ejemplo, si se tienen componentes, nefelina ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y el cuarzo (SiO_2), por la reacción de los dos resultan otras dos fases: jadeíta ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$) y albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) (14).



Según la regla de las fases mineralógicas, en la naturaleza solamente se pueden encontrar dos de estos cuatro minerales juntos, los cuales, nunca se encuentran en una misma roca el cuarzo y nefelina o jadeíta y nefelina juntas, por lo que solo aparecen en las siguientes combinaciones (14):

Albita + Cuarzo
Albita + Nefelina
Jadeíta + Cuarzo
Jadeíta + Albita

3.4 CAUSAS DEL COLOR EN LOS MINERALES

El color forma parte de los caracteres determinativos más importantes, pero no siempre es absolutamente fiable. Los minerales son coloreados porque absorben ciertas longitudes de onda de la luz y el color es el resultado de una combinación de las longitudes de onda que llegan al ojo. Un determinado número de minerales presentan tonos e incluso colores muy diferentes; según el origen del color, la mineralogía clásica distribuyó los minerales en tres grupos:

Acromáticos: el mineral es incoloro. Tanto en la luz reflejada como en la transmitida (14).

Idiocromáticos: el color resulta de la presencia de átomos de un determinado elemento, característico y constante incluido dentro del mineral; el color sirve como medio de identificación importante (por ejemplo: la malaquita siempre es verde, la azurita siempre es azul, etc.) (14).

Alocromático: los minerales muestran una variación de color, debido a que poseen pequeñas cantidades de impurezas químicas, defectos en la estructura cristalina e inclusiones finamente divididas de otros minerales (14).

Los iones de ciertos elementos absorben la luz muy intensamente y su presencia en cantidades pequeñas, aún en trazas, puede ser la causa de que el mineral tenga un intenso color; estos elementos incluidos en las redes cristalinas de los minerales son conocidos como **cromóforos**, donde los más importantes son: hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), cromo (Cr), cobalto (Co), níquel (Ni) y vanadio (V) (14).

Las condiciones de presión y temperatura a las que ocurre el metamorfismo, favorecen la movilidad de los cationes durante los procesos de formación de minerales. Esta movilidad da lugar a su vez a que ocurran los fenómenos de diadocia⁴, captura y camuflaje; mediante los cuales elementos menores incompatibles con las redes cristalinas, sustituyen a elementos mayores debido a similitud en carga, radio iónico y/o electronegatividad. Esto se pone de manifiesto al comparar las relaciones de hierro con los cationes presentes, pero especialmente son el vanadio, níquel, cromo, cobalto, zinc y cobre (1).

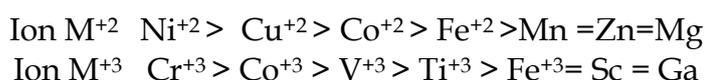
En 1,955 Ringwood (1) demostró que la electronegatividad de los elementos también es un factor que influye en la captura de otros elementos en la red cristalina; ya que la diadocia en un cristal es posible entre dos elementos que poseen una apreciable diferencia de electronegatividad, el elemento con menor electronegatividad será preferentemente incorporado porque forma esqueletos iónicos más fuertes que el otro elemento. La relación que existe entre la

⁴ **Diadocia** es el proceso por el cual se produce el intercambio iónico en una red cristalina, en función de la similitud de tamaño y carga de los iones (1).

electronegatividad y la sustitución iónica, se relaciona de la siguiente manera (1):

CATION	ELECTRONEGATIVIDAD
Fe ⁺²	1.65
Co ⁺²	1.7
Zn ⁺²	1.7
Cu ⁺²	2.0
Fe ⁺³	1.8
V ⁺³	1.35
Cr ⁺³	1.6

El hierro ocupa los sitios M₁ de las jadeítas ya que ocupa las posiciones octaédricas. El hierro puede ser reemplazado parcialmente por otros cationes trivalentes como lo son: Mn⁺³ y Cr⁺³, aunque también puede ser sustituido por los siguientes metales: Ni⁺², Co⁺², Cu⁺², V⁺³ y Zn⁺², a través de los procesos de sustitución isomórfica. El orden de preferencia por los sitios octaédricos es (1):



3.5 EFECTO DE LOS ELEMENTOS CROMÓFOROS EN LOS MINERALES

La causa más común de la variedad de color, es la presencia de iones metálicos en las redes cristalinas de los minerales; los iones de los elementos de la primera fila de los metales de transición (del Ti al Cu), son normalmente los responsables del color en los minerales. Pero también existen otros factores que pueden influir en el color de los minerales, los cuales se describen a continuación:

- 1) **Transferencia de Cargas de Valencia:** ocurre cuando un ion metálico presenta varios estados de oxidación, dentro de un mismo mineral. Por ejemplo minerales que contienen hierro presentan una interacción entre Fe²⁺- Fe³⁺, también puede darse la interacción intercatión entre Fe²⁺- Ti⁴⁺ (15).
- 2) **Radiación Natural de Ionización:** el color producido naturalmente por la radiación de ionización es frecuentemente encontrado en la naturaleza. Comúnmente pueden encontrarse minerales que han sido expuestos a esta radiación durante largos períodos, también existen algunos minerales que fueron expuestos a la radiación de ionización para el comercio de piedras preciosas (15).

- 3) **Efecto Físico:** la difracción de la luz causa color en los minerales; por ejemplo: el color del ópalo es el resultado de la difracción de la luz, como también provoca el color en ciertos cristales de labradorita (15).
- 4) **Minerales Semiconductores:** son aquellos que poseen espacios vacíos entre los orbitales de enlace, permitiendo que haya electrones libres los cuales al aplicárseles un voltaje frecuentemente dan como resultado colores intensos; variedades de sulfitos son ejemplo de estos (15).

3.5.1 IONES METÁLICOS CROMÓFOROS

- Los iones Ca^{2+} , Sc^{3+} y Ti^{4+} cuando se encuentran solos no causan color en los minerales (16).
- El ion Ti^{3+} si se encuentra solo genera una coloración azul, como: el azul de anatasa y rutilo. Por medio de la transferencia de cargas y la formación de espacios vacíos, también puede contribuir en la coloración de otros minerales, como por ejemplo hibonita y piroxeno (16).
- El ion V^{3+} en el granate grosular (variedad zaborrita) causa el color verde. En la zoisita (variedad de tanzanita), es el ion que se caracteriza por dar el color en cada variedad dependiendo de la dirección con la que se observa el cristal (pleocroísmo) (16).
- El ion vanadito, VO^{2+} causa un color azul brillante en algunos minerales. La chavalita muestra un azul típico, por la presencia de este ion. Los clinopiroxenos sintéticos crecen a partir de vanadato de litio, donde comúnmente se incorpora este ion, provocando una coloración azul. En apofilita el color es más verde que azul (16).
- El ion Cr^{3+} puede causar los colores rojo y verde. El Cr^{3+} provoca el color verde en la esmeralda, el ortopiroxeno sintético y la jadeíta. El color rojo del Cr^{3+} puede observarse en rubíes sintéticos y espinela (16).
- El ion Mn^{3+} causa el color rojo y verde en sitios octaédricos. La muscovita, el ortopiroxeno sintético y la pée montita poseen un color rojo. La andalucita contiene el ion Mn^{3+} , que le da la coloración verde. En la amfíbola, la tremolinita se produce un color violeta (16).
- El ion Mn^{2+} usualmente provoca una coloración rosada en sitios octaédricos. La rodonita es un piroxeno que contiene Mn^{2+} y tiene un color rosado, típico de minerales con iones Mn^{2+} . En pequeñas concentraciones el ion Mn^{2+} produce un rosado pálido, el cual puede observarse en muestras del mineral berilo, procedente de la localidad de Pala, en el estado de California, Estados Unidos de Norte América. Cuando el ion Mn^{2+} se encuentra en sitios tetraédricos, la coloración que se puede observar es verde amarillenta, como es el caso de la willemita (16).
- El ion Fe^{2+} en forsterita y fosfilita; es el responsable del color verde de estos minerales. En algunos minerales que contienen una alta

concentración del ion Fe^{2+} , puede observarse una coloración café, como por ejemplo la fayalita o el ortopiroxeno (16).

- El ion Fe^{2+} produce un color rojo frambuesa como se puede observar en la gillespita o la eudialita (16).
- El ion Fe^{3+} en sitios octaédricos causa únicamente colores pálidos. Un color púrpura pálido es observado en fosfatos como la estrenuita y sulfatos como la coquimbita. Un verde amarillento puede ser observado en silicatos férricos, como en el granate andradita (16).
- El ion Fe^{3+} en sitios tetraédricos de los feldespatos plagioclasas produce una coloración amarillo claro. En una variedad inusual de diopsida se observa un color anaranjado brillante (16).
- El ion Co^{2+} en olivinos sintéticos y calcita cobáltica se observa un color rojizo típico. En sitios tetraédricos el ion Co^{2+} produce un color azul, el cual ha sido encontrado en algunas espinelas (16).
- El ion Ni^{2+} se puede observar en los olivinos sintéticos, ya que poseen un color verde, típico de la presencia del ion Ni^{2+} (16).
- El ion Cu^{2+} produce los colores verde y azul en algunos minerales como: la azurita, la malaquita y la auricalcita (16).

3.5.2 ELEMENTOS CROMÓFOROS DE LAS SERIES LANTÁNIDOS Y ACTÍNIDOS

- Elementos de tierras raras como cerio (Ce), praseodimio (Pr), niobio (Nd), son ocasionalmente factores que producen color en algunos minerales (16).
- El ion uranilo, UO_2^{2+} es responsable del color amarillo brillante de muchos minerales de uranio como la carnotita y la autinita (16).
- El ion U^{4+} provee del color azul al zirconio (16).

3.6 DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA DE LA JADEÍTA

Pertenece al sistema monoclinico. Por lo general no se encuentra en cristales sino más bien en fibras o masas granuladas finas y compactas. Sus yacimientos son escasos y solamente pueden encontrarse en: Italia (Val di Susa); Birmania (Tawmaw-Minas); Japón (Kotaki); China (Tibet); Antigua Unión de Republicas Socialistas Soviéticas, Estados Unidos (California); Francia (Córcega); Guatemala (El Progreso) (9).

3.6.1 PROPIEDADES FÍSICAS (9)

<i>Dureza</i>	6.5
<i>Raya</i>	Blanca
<i>Color</i>	Blanco verdoso, verde, gris amarillento.
<i>Transparencia</i>	Translúcido en los bordes
<i>Brillo</i>	Vítreo, graso
<i>Fractura</i>	Desigual, rugosa
<i>Densidad</i>	3.2 a 3.3
<i>Luminiscencia</i>	Gris azulada
<i>Exfoliación</i>	Buena

3.6.2 PROPIEDADES QUÍMICAS (9)

<i>Composición Química</i>	Na ₂ O 15.34%, Al ₂ O ₃ 25.22%, SiO ₂ 59.44%
<i>Propiedades con el soplete</i>	Llama coloreada en amarillo (presencia de sodio)
<i>Propiedades sobre el carbón</i>	Funde dando un vidrio burbujeante transparente.

4. JUSTIFICACION

La variación del color en los minerales, es debida a los cambios cualitativos y cuantitativos de los elementos cromóforos presentes en la red cristalina. Estas variaciones hacen que no solo existan distintas variedades coloreadas de un mineral sino que también el color del mineral no pueda ser utilizado como una propiedad de diagnóstico para la identificación inequívoca de estos materiales.

Los métodos de Espectroscopia de Rayos-X: Difractometría (DFX) y Fluorescencia (FRX), constituyen las herramientas modernas para la identificación mineral (12). Mientras las técnicas de DRX proporcionan los parámetros de la celda unitaria, las de FRX proporcionan la información relativa a la composición química en términos cualitativos y cuantitativos.

En el presente trabajo se analizaron diecisiete muestras de jade, que muestran variación de color desde el blanco hasta el negro, pasando por varias tonalidades de verde y una muestra de jade violeta (comercialmente llamado Jade Luna). El análisis se realiza con la técnica instrumental de Fluorescencia de Rayos-X, con el propósito de de determinar las causas de la variación del color en este mineral. Las muestras son originarias de la región media del Valle del Motagua, El Progreso, la cual es la principal fuente de este mineral en el continente americano (5).

5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar cualitativa y cuantitativamente los iones cromóforos presentes en el jade como posible causa de la variación en el color de las distintas variedades de jade, mediante la utilización de la Espectrometría Fluorescente de Rayos-X.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los elementos cromóforos presentes en el jade, que pueden ser medidos utilizando la técnica de fluorescencia de Rayos-X.
- Cuantificar los elementos cromóforos mediante espectrometría de fluorescencia de Rayos-X, utilizando la ecuación fundamental de Rayos-X y/o curvas de calibración.
- Determinar la relación que existe entre la concentración de los elementos cromóforos y el color del jade.

6. HIPÓTESIS

Es posible determinar la causa de la variación del color en el mineral jadeita, utilizando la técnica de análisis de Fluorescencia de Rayos-X.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 UNIVERSO Y MUESTRA

El universo de trabajo está constituido por jades provenientes del departamento de El Progreso, en Guatemala. La población a analizar se recolectó en la Cooperativa de Jade y la Casa del Jade en Antigua Guatemala, debido a que estas empresas son las que comercializan la jadeíta.

7.2 MATERIALES

- Jadeítas
- Balanza analítica
- Mortero de diamonita
- Espátula
- Papel aluminio
- Molino de discos Gerson
- Crisol de porcelana
- Crisol de Pt/ Au (95:5)
- Cera-C Hoechst
- Prensa Graseby/Specac
- Horno equipado con quemadores Fisher
- Tamizador No. 200
- Moldes Fluxy Claisse
- Solución de LiBr 250g/L
- Espectrómetro Secuencial de Rayos-X (SIEMENS SRS 3000)
- Fundente $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-LiBO}_2$ (50:50 wt%)

7.3 METODOLOGÍA

7.3.1 Preparación de Muestras para Análisis de Elementos Mayores por Fluorescencia de Rayos X (117).

7.3.1.1 Moler cada una de las muestras en un molino de discos Gerson, a 78 PSI durante 30 segundos.

7.3.1.2 Tamizar las muestras en un tamiz No.200

7.3.1.3 Pesar 0.8 g de muestra y 7.2 g de fundente (el fundente esta constituido por $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ Y LiBO_2 , en una relación de 1:1).

7.3.1.4 Mezclar y agregar 2 gotas de la solución acuosa de LiBr, con una concentración de 250 g/L.

7.3.1.5 Colocar la mezcla en un crisol de una aleación de Pt: Au (95:5).

- 7.3.1.6 Calentar a 1100°C en un horno equipado con quemadores Fisher y moldes para la preparación simultánea de 3 perlas (Fluxy Claisse).
- 7.3.1.7 Dejar enfriar y retirar las perlas.

7.3.2. CONDICIONES DE MEDICIÓN DEL SISTEMA FRX

- 7.3.2.1 Con base en la intensidad de las líneas K-alfa uno, ($K\alpha_1$) y k-alfa dos ($K\alpha_2$) para cada elemento. Medir dos fondos para cada línea, fijar aproximadamente a -1° y $+1^\circ$, establecer las siguientes condiciones:

Elementos mayores	Tiempo de Conteo (seg)	Cristal analizador	Coll. (°)	Pico $^\circ 2\theta$	Fondos $^\circ 2\theta$	KV/mA	Detector
Si	20	PET	0.46	109.09	108.3/110.9	45/50	F
Ti	30	LIF200	0.15	86.15	85.3/86.9	45/50	F
Al	20	PET	0.46	145.06	143.2/147.2	45/50	F
Fe	20	LIF220	0.15	85.73	85.1/86.6	45/50	C + F
Mn	30	LIF220	0.15	95.21	94.6/96.0	45/50	C + F
Mg	40	OVO55	0.46	21.49	20.3/23.2	45/50	F
Ca	30	LIF200	0.46	113.13	112.2/114.1	45/50	F
Na	40	OVO55	0.46	25.96	24.4/27.6	45/50	F
K	40	LIF200	0.46	136.72	135.8/137.7	45/50	F
P	40	GE	0.46	141.03	140.2/142.0	45/50	F

Coll: colimador.

Tabla 1. Condiciones de medición del sistema FRX, para elementos mayores.
F: detector de flujo; C: detector de centelleo.

7.3.3 Preparación de Muestras para Análisis de Elementos Traza por Fluorescencia de Rayos X (18).

- 7.3.3.1 Mezclar 4 g de polvo de muestra con 0.4 g de Aglutinante (*cera-c, Hoechst*).
- 7.3.3.2 Prensar a 30 ton/cm² durante 30 segundos, en una prensa automática *Graseby/Specac*, con dado de 4 cm de diámetro.

7.3.4. CONDICIONES DE MEDICIÓN DEL SISTEMA FRX

- 7.3.4.1 Las condiciones de medición están fijadas para obtener la mayor intensidad posible en las líneas analíticas de cada elemento. Medir dos fondos para cada línea, fijar aproximadamente a -1° y $+1^\circ$, establecer las siguientes condiciones:

Elementos	Tiempo de Conteo (seg)	Cristal analizador	Coll. (°)	Pico ° 2θ	Fondos ° 2θ	KV/mA	Detector
Rb	80	LIF200	0.15	26.57	26.03/27.10	55/54	CF+CC
Sr	80	LIF220	0.15	35.80	35.20/36.50	55/54	CF+CC
Ba	80	LIF220	0.15	15.57	15.30/16.00	55/54	CC
Y	80	LIF200	0.15	23.734	23.10/24.50	55/54	CF+CC
Zr	80	LIF200	0.15	22.50	22.20/23.0	55/54	CF+CC
Nb	80	LIF200	0.15	31.36	21.00/21.70	55/54	CF+CC
V	80	LIF220	0.15	123.18	122.7/123.6	55/54	CF
Cr	80	LIF220	0.15	107.12	106.4/107.8	55/54	CF
Co	80	LIF220	0.15	77.87	77.60/78.20	55/54	CF
Ni	80	LIF220	0.15	71.27	70.80/71.80	55/54	CF+CC
Cu	80	LIF220	0.15	65.53	65.0/66.0	55/54	CF+CC
Zn	80	LIF220	0.15	60.55	60.00/61.10	55/54	CF+CC
Th	80	LIF200	0.15	27.46	28.04/27.20	55/54	CF+CC
Pb	80	LIF200	0.15	28.25	27.96/28.77	55/54	CF+CC

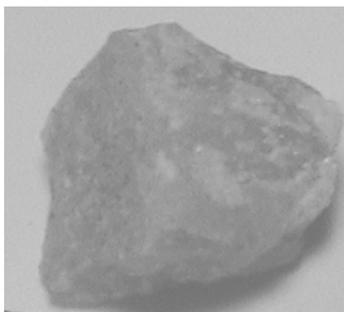
Coll: colimador.

Tabla 2. Condiciones de medición del sistema FRX, para elementos traza.
F: detector de flujo; C: detector de centelleo.

8. RESULTADOS

8.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS, PROPIEDADES FÍSICAS Y COMPOSICIÓN EN EL SISTEMA JADEÍTA-ACMITA-AUGITA

8.1.1 MUESTRA J-01



PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Blanco-grisáceo
DENSIDAD	3.1
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

	%	PROPORCIÓN		NUMERO		RECALCULO DE	PORCENTAJE DE Jd-Au-Ac
		MOLECULAR	CATIONES	OXÍGENOS	CATIONES EN BASE A 60		
SiO₂	58.756	0.977799967	0.977799967	1.955599933		1.995019249	NaAl como Jade
TiO₂	0.077	0.000963946	0.000963946	0.001927892		0.001966753	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al₂O₃	23.156	0.22710867	0.45421734	0.68132601		0.926746132	CaO como Augita
Fe₂O₃	2.021	0.012654978	0.025309956	0.037964934		0.051640265	
MnO	0.013	0.000183253	0.000183253	0.000183253		0.000373895	Proporción molecular
MgO	0.512	0.012701563	0.012701563	0.012701563		0.02591518	NaAl = 0.913527 % Jd = 95.24
CaO	1.14	0.020328103	0.020328103	0.020328103		0.041475719	Fe ₂ O ₃ = 0.02531 % Ac = 2.64
Na₂O	14.234	0.229654727	0.459309455	0.229654727		0.937135646	CaO = 0.02033 % Au = 2.12
K₂O	0.028	0.00029724	0.00059448	0.00029724		0.001212926	TOTAL
P₂O₅	0.021	0.00014795	0.0002959	0.00073749		0.000603728	0.95916
TOTAL=				2.940723405			

Tabla 3. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-1 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.1.2 MUESTRA J-02

PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Blanco-gris
DENSIDAD	2.93
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

		PROPORCIÓN		NUMERO	RECALCULO DE	PORCENTAJE
	%	MOLECULAR	CACIONES	OXÍGENOS	CACIONES EN BASE A 60	DE Jd-Au-Ac
SiO ₂	58.85	0.979364287	0.979364287	1.958728574	1.991069781	NaAl como Jade
TiO ₂	0.052	0.000650976	0.000650976	0.001301953	0.00132345	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al ₂ O ₃	23.522	0.230698313	0.461396626	0.692094939	0.938029793	CaO como Augita
Fe ₂ O ₃	1.759	0.011014402	0.022028804	0.033043206	0.044785058	
MnO	0.028	0.0003947	0.0003947	0.0003947	0.000802434	Proporción molecular
MgO	0.635	0.015752915	0.015752915	0.015752915	0.032026033	NaAl = 0.9168 % Jd = 95.44
CaO	1.221	0.021772468	0.021772468	0.021772468	0.04426392	Fe ₂ O ₃ = 0.0220 % Ac = 2.29
Na ₂ O	14.114	0.227718619	0.455437238	0.227718619	0.925914222	CaO = 0.02177 % Au = 2.27
K ₂ O	0.037	0.000392781	0.000785563	0.000392781	0.001597067	TOTAL 0.9606
P ₂ O ₅	0.002	1.40905E-05	2.81809E-05	7.04523E-05	5.72925E-05	
			TOTAL=	2.951270607		

Tabla 4. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-2 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.1.3 MUESTRA J-03

PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Blanco-verde
DENSIDAD	3.1
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

	%	PROPORCIÓN		NUMERO	RECALCULO DE	PORCENTAJE DE Jd-Au-Ac
		MOLECULAR	CATIONES	OXÍGENOS	CATIONES EN BASE A 60	
SiO ₂	59.423	0.988899983	0.988899983	1.977799967	0.010671583	NaAl como Jade
TiO ₂	0.076	0.000951427	0.000951427	0.001902854	0.00192542	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al ₂ O ₃	23.323	0.228746567	0.457493135	0.686239702	0.925836997	CaO como Augita
Fe ₂ O ₃	1.803	0.011289919	0.022579837	0.033869756	0.045695218	
MnO	0.01	0.000140964	0.000140964	0.000140964	0.000285272	Proporción molecular
MgO	0.591	0.014661374	0.014661374	0.014661374	0.029670484	NaAl = 0.9147 % Jd = 95.43
CaO	1.19	0.021219686	0.021219686	0.021219686	0.042942656	Fe ₂ O ₃ = 0.0226 % Ac = 2.36
Na ₂ O	14.171	0.22863827	0.457276541	0.22863827	0.925398672	CaO = 0.0212 % Au = 2.21
K ₂ O	0.028	0.00029724	0.00059448	0.00029724	0.001203059	TOTAL 0.9586
P ₂ O ₅	0.002	1.40905E-05	2.81809E-05	7.04523E-05	5.70302E-05	
TOTAL=				2.964840266		

Tabla 5. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-3 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.1.4 MUESTRA J-04

PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Verde claro
DENSIDAD	3.2
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

	%	PROPORCIÓN		NUMERO	RECALCULO DE	PORCENTAJE DE Jd-Au-Ac
		MOLECULAR	CATIONES	OXÍGENOS	CATIONES EN BASE A 60	
SiO ₂	58.289	0.970028291	0.970028291	1.940056582	0.010467931	NaAl como Jade
TiO ₂	0.129	0.001614922	0.001614922	0.003229845	0.003308724	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al ₂ O ₃	22.223	0.217958023	0.435916046	0.653874068	0.893123901	CaO como Augita
Fe ₂ O ₃	2.468	0.015453976	0.030907952	0.046361929	0.063325568	Proporción molecular NaAl = 0.8687 % Jd = 92.74 Fe ₂ O ₃ = 0.0309 % Ac = 3.30 CaO = 0.0371 % Au = 3.96 TOTAL 0.9367
MnO	0.05	0.000704821	0.000704821	0.000704821	0.001444068	
MgO	1.226	0.030414289	0.030414289	0.030414289	0.062314129	
CaO	2.079	0.03707204	0.03707204	0.03707204	0.07595482	
Na ₂ O	13.412	0.216392385	0.432784769	0.216392385	0.886708405	
K ₂ O	0.032	0.000339703	0.000679406	0.000339703	0.001391996	
P ₂ O ₅	0.001	7.04523E-06	1.40905E-05	3.52262E-05	2.88692E-05	
		TOTAL=		2.928480887		

Tabla 6. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-4 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.1.5 MUESTRA J-05

PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Verde limón
DENSIDAD	3.12
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

	%	PROPORCIÓN		NUMERO	RECALCULO DE	PORCENTAJE DE Jd-Au-Ac
		MOLECULAR	CATIONES	OXÍGENOS	CATIONES EN BASE A 60	
SiO ₂	58.548	0.974338492	0.974338492	1.948676985	1.988386407	NaAl como Jade
TiO ₂	0.077	0.000963946	0.000963946	0.001927892	0.001967178	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al ₂ O ₃	23.076	0.226324049	0.452648097	0.678972146	0.923743987	CaO como Augita
Fe ₂ O ₃	1.838	0.01150908	0.023018159	0.034527239	0.046974429	
MnO	0.045	0.000634339	0.000634339	0.000634339	0.00129453	Proporción molecular
MgO	0.918	0.022773505	0.022773505	0.022773505	0.046475151	NaAl = 0.8996 % Jd = 94.67
CaO	1.548	0.027603424	0.027603424	0.027603424	0.056331832	Fe ₂ O ₃ = 0.0230 % Ac = 2.42
Na ₂ O	13.85	0.22345918	0.446918361	0.22345918	0.912050997	CaO = 0.0276 % Au = 2.91
K ₂ O	0.043	0.000456476	0.000912951	0.000456476	0.00186311	TOTAL 0.9502
P ₂ O ₅	0.03	0.000211357	0.000422714	0.001056785	0.000862655	
TOTAL=				2.940087969		

Tabla 7. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-5 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.1.6 MUESTRA J-06

PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Verde
DENSIDAD	3.10
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

	%	PROPORCIÓN		NUMERO OXÍGENOS	RECALCULO DE CATIONES EN BASE A 60	PORCENTAJE DE Jd-Au-Ac
		MOLECULAR	CATIONES			
SiO ₂	55.62	0.925611583	0.925611583	1.851223165	1.937711021	NaAl como Jade
TiO ₂	0.267	0.003342514	0.003342514	0.006685028	0.006997347	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al ₂ O ₃	19.562	0.191859553	0.383719106	0.575578658	0.803292389	CaO como Augita
Fe ₂ O ₃	4.734	0.029643081	0.059286162	0.088929242	0.124111939	Proporción molecular NaAl = 0.7483 % Jd = 83.41 Fe ₂ O ₃ = 0.0593 % Ac = 6.61 CaO = 0.0896 % Au = 9.99 TOTAL 0.8972
MnO	0.073	0.001029039	0.001029039	0.001029039	0.002154229	
MgO	2.811	0.069734557	0.069734557	0.069734557	0.145985014	
CaO	5.025	0.089604137	0.089604137	0.089604137	0.187580759	
Na ₂ O	11.299	0.182300742	0.364601484	0.182300742	0.763270823	
K ₂ O	0.049	0.00052017	0.00104034	0.00052017	0.002177887	
P ₂ O ₅	0.014	9.86332E-05	0.000197266	0.000493166	0.000412965	
TOTAL=				2.866097904		

Tabla 8. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-06 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.1.7 MUESTRA J-07

PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Verde olivo
DENSIDAD	3.72
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

	%	PROPORCIÓN		NUMERO	RECALCULO DE	PORCENTAJE DE Jd-Au-Ac
		MOLECULAR	CATIONES	OXÍGENOS	CATIONES EN BASE A 60	
SiO₂	54.498	0.906939591	0.906939591	1.813879181	1.943967572	NaAl como Jade
TiO₂	1.004	0.012568853	0.012568853	0.025137707	0.026940541	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al₂O₃	13.229	0.12974696	0.259493919	0.389240879	0.556208781	CaO como Augita
Fe₂O₃	7.675	0.04805886	0.096117721	0.144176581	0.206022247	
MnO	0.152	0.002142656	0.002142656	0.002142656	0.004592647	Proporción molecular
MgO	4.515	0.112006946	0.112006946	0.112006946	0.240079795	NaAl = 0.5127 % Jd = 64.70
CaO	10.296	0.183594864	0.183594864	0.183594864	0.393523964	Fe ₂ O ₃ = 0.0961 % Ac = 12.13
Na₂O	7.848	0.126621491	0.253242982	0.126621491	0.542810292	CaO = 0.1836 % Au = 23.17
K₂O	0.031	0.000329087	0.000658174	0.000329087	0.001410754	TOTAL 0.7924
P₂O₅	0.06	0.000422714	0.000845428	0.002113569	0.001812121	
TOTAL=				2.799242961		

Tabla 9. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-07 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.1.8 MUESTRA J-08

PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Verde moteado
DENSIDAD	3.11
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

	%	PROPORCIÓN		NUMERO	RECALCULO DE	PORCENTAJE DE Jd-Au-Ac
		MOLECULAR	CATIONES	OXÍGENOS	CATIONES EN BASE A 60	
SiO ₂	57.966	0.96465302	0.96465302	1.929306041	1.979654856	NaAl como Jade
TiO ₂	0.134	0.001677516	0.001677516	0.003355033	0.003442588	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al ₂ O ₃	21.778	0.213593566	0.427187132	0.640780698	0.876670744	CaO como Augita
Fe ₂ O ₃	2.814	0.017620539	0.035241077	0.052861616	0.072321516	
MnO	0.054	0.000761207	0.000761207	0.000761207	0.001562144	Proporción molecular
MgO	1.352	0.033540065	0.033540065	0.033540065	0.068830709	NaAl = 0.8433 % Jd = 90.40
CaO	3.048	0.054350927	0.054350927	0.054350927	0.111538631	Fe ₂ O ₃ = 0.0352 % Ac = 3.78
Na ₂ O	12.898	0.208099387	0.416198774	0.208099387	0.854120504	CaO = 0.0544 % Au = 5.83
K ₂ O	0.021	0.00022293	0.00044586	0.00022293	0.000914991	TOTAL 0.9330
P ₂ O ₅	0.012	8.45428E-05	0.000169086	0.000422714	0.000346996	
TOTAL=				2.923700616		

Tabla 10. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-08 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.1.9 MUESTRA J-09

PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Verde oscuro
DENSIDAD	3.5
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

	%	PROPORCIÓN		NUMERO OXÍGENOS	RECALCULO DE CATIONES EN BASE A 60	PORCENTAJE DE Jd-Au-Ac
		MOLECULAR	CATIONES			
SiO ₂	57.566	0.957996339	0.957996339	1.915992678	1.984788471	NaAl como Jade
TiO ₂	0.179	0.002240861	0.002240861	0.004481723	0.004642644	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al ₂ O ₃	19.595	0.192183209	0.384366418	0.576549627	0.796335022	CaO como Augita
Fe ₂ O ₃	3.605	0.022573575	0.045147151	0.067720726	0.093536417	Proporción molecular NaAl = 0.7638 % Jd = 85.86 Fe ₂ O ₃ = 0.04515 % Ac = 5.08 CaO = 0.0806 % Au = 9.06 TOTAL 0.8896
MnO	0.071	0.001000846	0.001000846	0.001000846	0.002073564	
MgO	2.384	0.059141652	0.059141652	0.059141652	0.122530395	
CaO	4.52	0.080599144	0.080599144	0.080599144	0.166986287	
Na ₂ O	11.76	0.189738625	0.379477251	0.189738625	0.786205585	
K ₂ O	0.028	0.00029724	0.00059448	0.00029724	0.001231651	
P ₂ O ₅	0.014	9.86332E-05	0.000197266	0.000493166	0.000408699	
TOTAL=				2.896015427		

Tabla 11. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-09 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.1.10 MUESTRA J-10

PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Verde oscuro
DENSIDAD	3.25
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

	%	PROPORCIÓN		NUMERO	RECALCULO DE	PORCENTAJE DE Jd-Au-Ac
		MOLECULAR	CATIONES	OXÍGENOS	CATIONES EN BASE A 60	
SiO ₂	56.283	0.936645032	0.936645032	1.873290065	1.979284561	NaAl como Jade
TiO ₂	0.5	0.006259389	0.006259389	0.012518778	0.013227116	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al ₂ O ₃	15.021	0.147322479	0.294644959	0.441967438	0.622633119	CaO como Augita
Fe ₂ O ₃	4.467	0.027971196	0.055942392	0.083913588	0.118215449	Proporción molecular NaAL = 0.5736 % Jd = 72.18 Fe ₂ O ₃ = 0.0560 % Ac = 7.04 CaO = 0.1651 % Au = 20.78 TOTAL 0.7947
MnO	0.078	0.001099521	0.001099521	0.001099521	0.002323468	
MgO	4.883	0.121136194	0.121136194	0.121136194	0.255980645	
CaO	9.261	0.165139087	0.165139087	0.165139087	0.348965973	
Na ₂ O	8.645	0.139480478	0.278960955	0.139480478	0.589490247	
K ₂ O	0.062	0.000658174	0.001316348	0.000658174	0.00278166	
P ₂ O ₅	0.004	2.81809E-05	5.63618E-05	0.000140905	0.000119102	
			TOTAL=	2.839344228		

Tabla 12. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-10 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.1.11 MUESTRA J-11



PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Verde-negro
DENSIDAD	2.89
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

	%	PROPORCIÓN		NUMERO	RECALCULO DE	PORCENTAJE DE Jd-Au-Ac
		MOLECULAR	CATIONES	OXÍGENOS	CATIONES EN BASE A 60	
SiO ₂	52.824	0.879081378	0.879081378	1.758162756	1.908482658	NaAl como Jade
TiO ₂	0.52	0.006509765	0.006509765	0.013019529	0.014132677	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al ₂ O ₃	11.402	0.111828168	0.223656336	0.335484504	0.485557138	CaO como Augita
Fe ₂ O ₃	8.197	0.051327489	0.102654978	0.153982467	0.222863605	
MnO	0.172	0.002424584	0.002424584	0.002424584	0.005263764	Proporción molecular
MgO	6.835	0.169560903	0.169560903	0.169560903	0.368116139	NaAl = 0.4235 % Jd = 55.96
CaO	12.938	0.230706134	0.230706134	0.230706134	0.500862226	Fe ₂ O ₃ = 0.1027 % Ac = 13.56
Na ₂ O	6.194	0.099935463	0.199870926	0.099935463	0.433919095	CaO = 0.2307 % Au = 30.48
K ₂ O	0.034	0.000360934	0.000721868	0.000360934	0.001567174	TOTAL 0.7569
P ₂ O ₅	0.002	1.40905E-05	2.81809E-05	7.04523E-05	6.11807E-05	
			TOTAL=	2.763707727		

Tabla 13. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-11 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.1.12 MUESTRA J-12

PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Verde-Negro
DENSIDAD	3.44
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

	%	PROPORCIÓN		NUMERO	RECALCULO DE	PORCENTAJE DE Jd-Au-Ac
		MOLECULAR	CATIONES	OXÍGENOS	CATIONES EN BASE A 60	
SiO₂	52.446	0.872790814	0.872790814	1.745581628	1.910745756	NaAl como Jade
TiO₂	0.517	0.006472208	0.006472208	0.012944417	0.014169197	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al₂O₃	11.262	0.11045508	0.220910161	0.331365241	0.483624651	CaO como Augita
Fe₂O₃	8.103	0.050738885	0.101477771	0.152216656	0.222158869	Proporción molecular NaAL = 0.4200 % Jd = 55.97 Fe ₂ O ₃ = 0.1015 % Ac = 13.52 CaO = 0.2289 % Au = 30.51 TOTAL 0.7504
MnO	0.17	0.002396391	0.002396391	0.002396391	0.005246268	
MgO	6.738	0.167154552	0.167154552	0.167154552	0.365940895	
CaO	12.838	0.228922967	0.228922967	0.228922967	0.501166581	
Na₂O	6.17	0.099548241	0.199096483	0.099548241	0.435869344	
K₂O	0.032	0.000339703	0.000679406	0.000339703	0.00148738	
P₂O₅	0.006	4.22714E-05	8.45428E-05	0.000211357	0.000185084	
		TOTAL=		2.740681153		

Tabla 14. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-12 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.1.13 MUESTRA J-13

PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Verde -negro
DENSIDAD	3.3
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

	%	PROPORCIÓN		NUMERO OXÍGENOS	RECALCULO DE CATIONES EN BASE A 60	PORCENTAJE DE Jd-Au-Ac
		MOLECULAR	CATIONES			
SiO ₂	47.505	0.790564154	0.790564154	1.581128308	1.663860935	NaAl como Jade
TiO ₂	6.18	0.077366049	0.077366049	0.154732098	0.162828464	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al ₂ O ₃	15.779	0.154756767	0.309513535	0.464270302	0.651417696	CaO como Augita
Fe ₂ O ₃	10.467	0.065541641	0.131083281	0.196624922	0.275884442	Proporción molecular NaAL = 0.4683 % Jd = 56.74 Fe ₂ O ₃ = 0.1311 % Ac = 15.88 CaO = 0.2259 % Au = 27.37 TOTAL 0.8253
MnO	0.195	0.002748802	0.002748802	0.002748802	0.005785266	
MgO	5.577	0.138352766	0.138352766	0.138352766	0.291184165	
CaO	12.668	0.225891583	0.225891583	0.225891583	0.475422747	
Na ₂ O	4.92	0.079380445	0.158760891	0.079380445	0.334136126	
K ₂ O	0.231	0.002452229	0.004904459	0.002452229	0.010322169	
P ₂ O ₅	0.149	0.001049739	0.002099479	0.005248697	0.004418668	
TOTAL=				2.850830152		

Tabla 15. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-13 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.1.14 MUESTRA J-14

PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Verde-oscuro
DENSIDAD	3.69
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

	%	PROPORCIÓN		NUMERO	RECALCULO DE	PORCENTAJE DE Jd-Au-Ac
		MOLECULAR	CATIONES	OXÍGENOS	CATIONES EN BASE A 60	
SiO ₂	52.471	0.873206856	0.873206856	1.746413713	1.882311456	NaAl como Jade
TiO ₂	0.58	0.007260891	0.007260891	0.014521783	0.0156518	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al ₂ O ₃	16.332	0.160180463	0.320360926	0.480541389	0.690579828	CaO como Augita
Fe ₂ O ₃	8.62	0.053976205	0.107952411	0.161928616	0.232705525	Proporción molecular NaAl = 0.5361 % Jd = 65.95 Fe ₂ O ₃ = 0.1079 % Ac = 13.28 CaO = 0.1689 % Au = 20.77 TOTAL 0.8129
MnO	0.248	0.003495912	0.003495912	0.003495912	0.007535895	
MgO	3.831	0.095038452	0.095038452	0.095038452	0.204867799	
CaO	9.47	0.168865906	0.168865906	0.168865906	0.364012521	
Na ₂ O	6.686	0.107873508	0.215747015	0.107873508	0.465070877	
K ₂ O	0.18	0.001910828	0.003821656	0.001910828	0.008238079	
P ₂ O ₅	0.08	0.000563618	0.001127237	0.002818092	0.002429906	
TOTAL=				2.783408198		

Tabla 16. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-14 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.1.15 MUESTRA J-15

PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Negro
DENSIDAD	4.06
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

	%	PROPORCIÓN		NUMERO	RECALCULO DE	PORCENTAJE DE Jd-Au-Ac
		MOLECULAR	CATIONES	OXÍGENOS	CATIONES EN BASE A 60	
SiO ₂	53.301	0.887019471	0.887019471	1.774038942	1.929426761	NaAl como Jade
TiO ₂	0.853	0.010678518	0.010678518	0.021357036	0.023227695	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al ₂ O ₃	10.181	0.099852883	0.199705767	0.29955865	0.434395934	CaO como Augita
Fe ₂ O ₃	10.432	0.06532248	0.130644959	0.195967439	0.284176266	
MnO	0.426	0.006005075	0.006005075	0.006005075	0.013062117	Proporción molecular
MgO	5.112	0.126817167	0.126817167	0.126817167	0.275850129	NaAl = 0.4305 % Jd = 55.20
CaO	12.269	0.218776748	0.218776748	0.218776748	0.475878744	Fe ₂ O ₃ = 0.1306 % Ac = 16.75
Na ₂ O	7.152	0.115392062	0.230784124	0.115392062	0.501996945	CaO = 0.2188 % Au = 28.05
K ₂ O	0.012	0.000127389	0.000254777	0.000127389	0.000554186	TOTAL 0.7799
P ₂ O ₅	0.01	7.04523E-05	0.000140905	0.000352262	0.000306493	
TOTAL=				2.758392768		

Tabla 17. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-15 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.1.16 MUESTRA 16

PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Negro
DENSIDAD	3.84
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

	%	PROPORCIÓN		NUMERO	RECALCULO DE	PORCENTAJE DE Jd-Au-Ac
		MOLECULAR	CATIONES	OXÍGENOS	CATIONES EN BASE A 60	
SiO ₂	56.472	0.939790315	0.939790315	1.879580629	1.964947809	NaAl como Jade
TiO ₂	0.791	0.009902354	0.009902354	0.019804707	0.020704201	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al ₂ O ₃	16.33	0.160160847	0.320321695	0.480482542	0.669740263	CaO como Augita
Fe ₂ O ₃	8.535	0.053443957	0.106887915	0.160331872	0.223485144	
MnO	0.236	0.003326755	0.003326755	0.003326755	0.0069557	Proporción molecular
MgO	2.276	0.056462416	0.056462416	0.056462416	0.118053676	NaAl = 0.6073 % Jd = 74.78
CaO	5.496	0.098002853	0.098002853	0.098002853	0.204907934	Fe ₂ O ₃ = 0.1069 % Ac = 13.16
Na ₂ O	8.895	0.143514037	0.287028074	0.143514037	0.600128747	CaO = 0.0980 % Au = 12.07
K ₂ O	0.134	0.001422505	0.002845011	0.001422505	0.005948452	TOTAL 0.8122
P ₂ O ₅	0.759	0.00534733	0.01069466	0.026736649	0.022360784	
			TOTAL=	2.869664966		

Tabla 18. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-16 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.1.17 MUESTRA J-17

PROPIEDADES FÍSICAS	
COLOR	Morado
DENSIDAD	3.22
DUREZA	>7
COLOR DE LA RAYA	Blanca

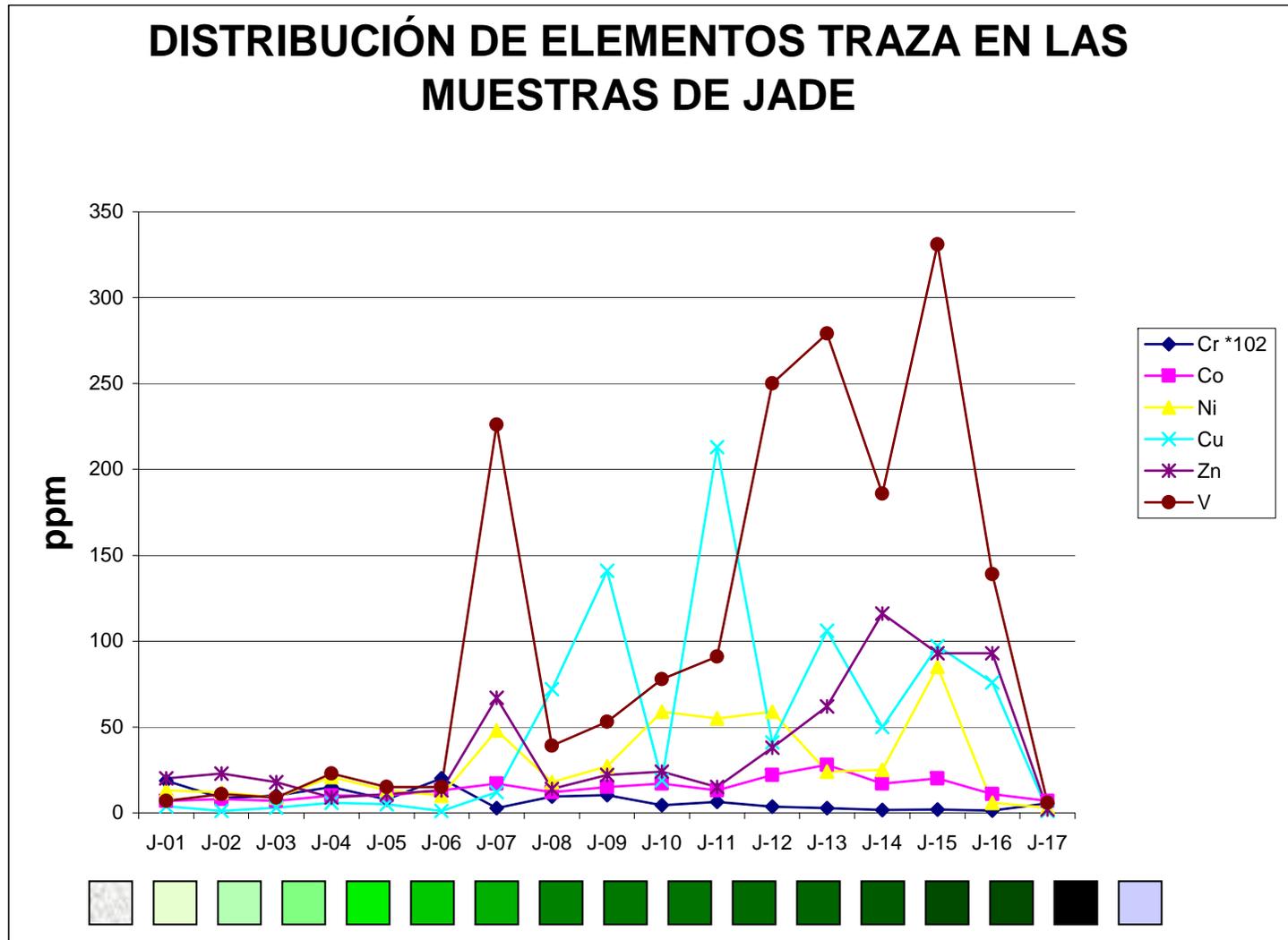
	%	PROPORCIÓN		NUMERO	RECALCULO DE	PORCENTAJE DE Jd-Au-Ac
		MOLECULAR	CATIONES	OXÍGENOS	CATIONES EN BASE A 60	
SiO ₂	59.748	0.994308537	0.994308537	1.988617074	2.009293559	NaAl como Jade
TiO ₂	0.365	0.004569354	0.004569354	0.009138708	0.009233727	Fe ₂ O ₃ como Acmita
Al ₂ O ₃	24.222	0.23756375	0.475127501	0.712691251	0.960135201	CaO como Augita
Fe ₂ O ₃	0.45	0.002817783	0.005635567	0.00845335	0.011388324	
MnO	0.024	0.000338314	0.000338314	0.000338314	0.000683663	Proporción molecular
MgO	0.188	0.004663855	0.004663855	0.004663855	0.009424694	NaAl = 0.9114 % Jd = 96.88
CaO	1.329	0.023698288	0.023698288	0.023698288	0.047889378	Fe ₂ O ₃ = 0.0056 % Ac = 0.599
Na ₂ O	13.521	0.218151016	0.436302033	0.218151016	0.881676896	CaO = 0.0237 % Au = 2.52
K ₂ O	0.046	0.000488323	0.000976645	0.000488323	0.0019736	TOTAL 0.9408
P ₂ O ₅	0.082	0.000577709	0.001155418	0.002888544	0.002334862	
TOTAL=				2.969128725		

Tabla 19. a) Propiedades físicas, b) Recálculo de composición de la muestra J-17 en el sistema jadeíta-acmita-augita.

8.2 ELEMENTOS MENORES

MUESTRAS	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
J-01	2	8	69	< 1	96	< 1	7	1881	7	13	4	20	< 3	< 4
J-02	2	11	77	< 1	38	< 1	11	866	8	12	1	23	< 3	< 4
J-03	2	7	55	< 1	34	< 1	9	1003	7	3	3	18	< 3	< 4
J-04	2	8	28	1	89	< 1	23	1513	10	21	6	9	< 3	< 4
J-05	2	11	13	< 1	72	< 1	15	782	10	13	5	11	< 3	5
J-06	2	4	23	< 1	36	< 1	15	1996	13	10	1	13	< 3	20
J-07	1	171	13	20	154	5	226	285	17	48	12	67	< 3	< 4
J-08	2	85	96	1	34	< 1	39	958	12	18	72	14	< 1	< 4
J-09	2	267	279	1	73	< 1	53	1019	15	27	141	22	< 3	< 4
J-10	2	380	33	3	115	1	78	460	17	59	19	24	< 3	9
J-11	< 1	3122	317	4	83	< 1	91	651	13	55	213	15	< 1	22
J-12	2	346	44	6	72	1	250	362	22	59	41	38	< 3	5
J-13	4	109	36	7	45	< 1	279	293	28	24	106	62	< 3	< 4
J-14	4	136	89	13	144	1	186	170	17	25	50	116	< 3	8
J-15	3	96	65	23	106	4	331	208	20	85	97	93	< 3	< 4
J-16	1	61	39	23	106	2	139	151	11	6	76	93	3	4
J-17	2	63	28	6	185	1	6	546	7	3	1	2	< 3	< 4

Tabla 20. Resultados de los elementos menores en cada una de las muestras de jade. El signo < significa que el elemento analizado está por abajo del límite de detección del instrumento.



Gráfica 1. Variación de los elementos traza en cada muestra.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En las muestras de jade se observa una deficiencia en la proporción atómica por fórmula unitaria de sílice a partir de la fórmula general de los piroxenos, por lo que fue necesario recalcular a 2 silicios y 4 oxígenos, lo que da como resultado que se obtenga 4 cationes por fórmula unitaria, los cuales pueden ser sodio, calcio, aluminio, hierro, silicio, magnesio y en un caso muy particular titanio; los resultados se presentan tabulados en la Tabla 21 y es de hacer notar que solamente cinco de las diecisiete muestras analizadas requirieron del recálculo para los cationes en base a dos silicios (11).

En 1,978, Word y Henderson (11) demostraron que las altas presiones y bajas temperaturas, condiciones a las que se forma el jade, los piroxenos presentan una desviación de seis átomos de oxígeno a cuatro por unidad estructural, lo que requiere que la proporción atómica del Si en la estructura sea ≥ 2 cuando se considera 6 átomos de oxígeno. Para un sistema en el que el Si ≥ 2 , la sumatoria de las proporciones atómicas de todos los átomos considerados siempre será ≤ 4 (10), (11), (14). Esta observación fue tomada en consideración para el análisis de los resultados.

Tabla 21. Recálculo de seis átomos de oxígeno a cuatro átomos de oxígeno en cada una de las muestras de jade.

	Si	Al	Fe total	Mg	Ca	Na	K	TOTAL
J-01	2.012	0.935	0.018	0.027	0.042	0.945	0.001	3.979
J-02	2.006	0.945	0.016	0.032	0.045	0.933	0.002	3.978
J-03	2.001	0.926	0.046	0.030	0.043	0.925	0.001	3.972
J-04	1.987	0.891	0.063	0.062	0.076	0.887	0.001	3.968
J-05	1.988	0.924	0.047	0.046	0.056	0.912	0.002	3.976
J-06	2.000	0.826	0.128	0.150	0.193	0.785	0.002	4.084
J-07	2.000	0.572	0.212	0.247	0.405	0.559	1.00E-03	3.996
J-08	1.980	0.877	0.072	0.069	0.112	0.854	9.00E-04	3.964
J-09	1.985	0.796	0.094	0.123	0.167	0.786	0.001	3.952
J-10	1.979	0.623	0.118	0.256	0.349	0.590	0.003	3.917
J-11	2.000	0.509	0.234	0.386	0.525	0.455	0.002	4.109
J-12	2.000	0.506	0.233	0.383	0.525	0.456	0.002	4.104
J-13	2.000	0.683	0.232	0.350	0.471	0.302	0.012	4.050
J-14	2.000	0.734	0.247	0.218	0.387	4.940	0.009	4.088
J-15	2.000	0.450	0.295	0.286	0.493	0.520	6.00E-04	4.045
J-16	1.986	0.670	0.223	0.118	0.205	0.600	0.006	3.808
J-17	2.009	0.960	0.011	0.009	0.048	0.882	0.002	3.921

Tomando como base los estudios de Carpenter, se definieron los miembros finales del sistema Jadeíta-Augita-Acmita de la siguiente manera (11):

- Proporción atómica de Jadeíta = Al
- Proporción atómica de Acmita = Fe^{+3}
- Proporción atómica de Augita = Ca

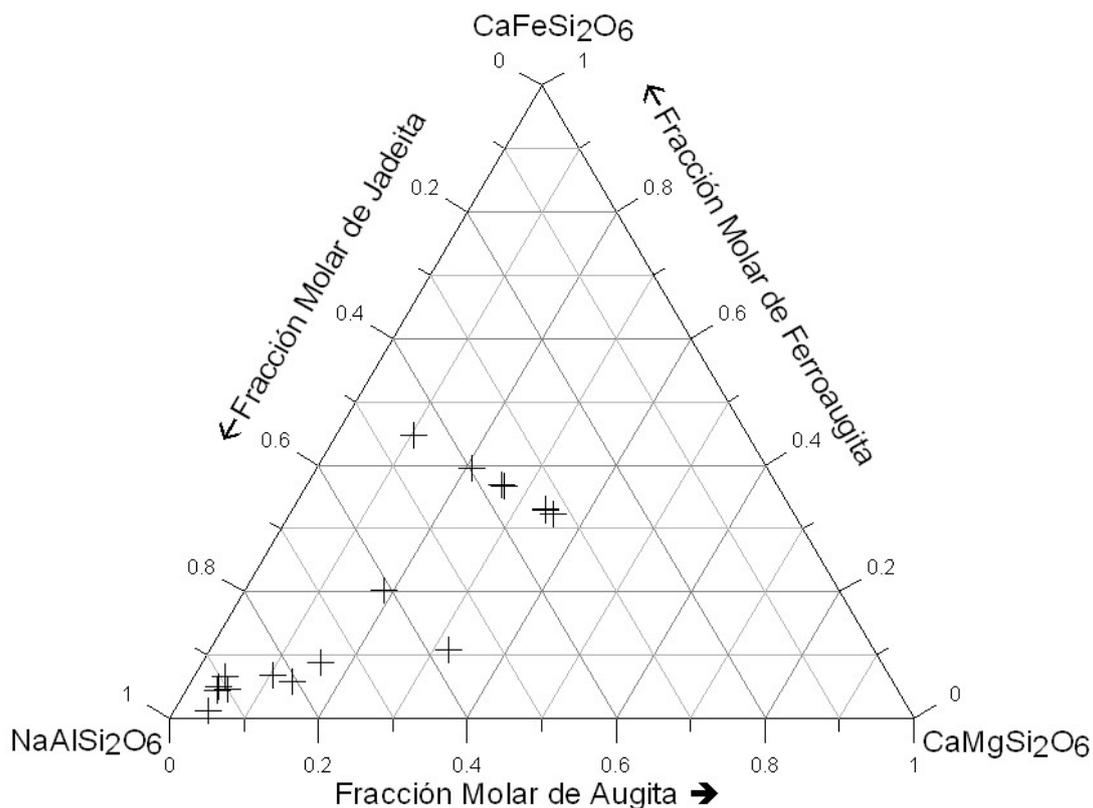
El Fe^{+3} se calcula a partir de la relación Na-Al, puesto que el Fe^{+3} presente reemplazará al Al^{+3} para formar acmita ($NaFeSi_2O_6$). Al realizar este cálculo se encontró que para la mayoría de las muestras la concentración de $Fe^{+3} \leq 0$. Esto implica que el hierro se encuentra como Fe^{+2} formando Ferroaugita ($CaFeSi_2O_6$), al sustituir parte del magnesio en la augita ($CaMgSi_2O_6$). Por lo tanto, se redefinió el sistema en función de:

- Proporción atómica de Jadeíta = Al
- Proporción atómica de Ferroaugita = Fe_{total}
- Proporción atómica de Augita = Ca

Se puede representar la distribución de las muestras analizadas en función del sistema Jadeíta-Ferroaugita-Augita. Los resultados de este análisis se presentan a continuación en la Tabla 22. De la misma manera, la Gráfica 2 muestra la distribución de las muestras en un diagrama triangular en donde los vértices del triángulo representan el 100% de cada componente.

Tabla 22. Composición porcentual del sistema jadeíta-ferroaugita-augita. El hierro esta expresado como hierro (II).

Muestras	Augita	Ferroaugita	Jadeíta
J-01	0.081317996	0.010184929	0.908497076
J-02	0.085231659	0.011664469	0.903103872
J-03	0.084853441	0.000433058	0.914713500
J-04	0.144476466	0.006101576	0.849421959
J-05	0.107493174	0.011156362	0.881350464
J-06	0.584386951	0.028956133	0.386656916
J-07	0.408588103	0.013911384	0.577500512
J-08	0.198768253	0.020092912	0.781138835
J-09	0.292846133	0.008882066	0.698271802
J-10	0.515570551	0.024483030	0.459946420
J-11	0.482499544	0.049744882	0.467755574
J-12	0.485369485	0.046250028	0.468380487
J-13	0.410353558	0.027385652	0.562260790
J-14	0.478363883	0.067876385	0.453759732
J-15	0.671842415	0.021518954	0.306638631
J-16	0.356619740	0.060575596	0.582804663
J-17	0.084433267	0.069164513	0.846402219

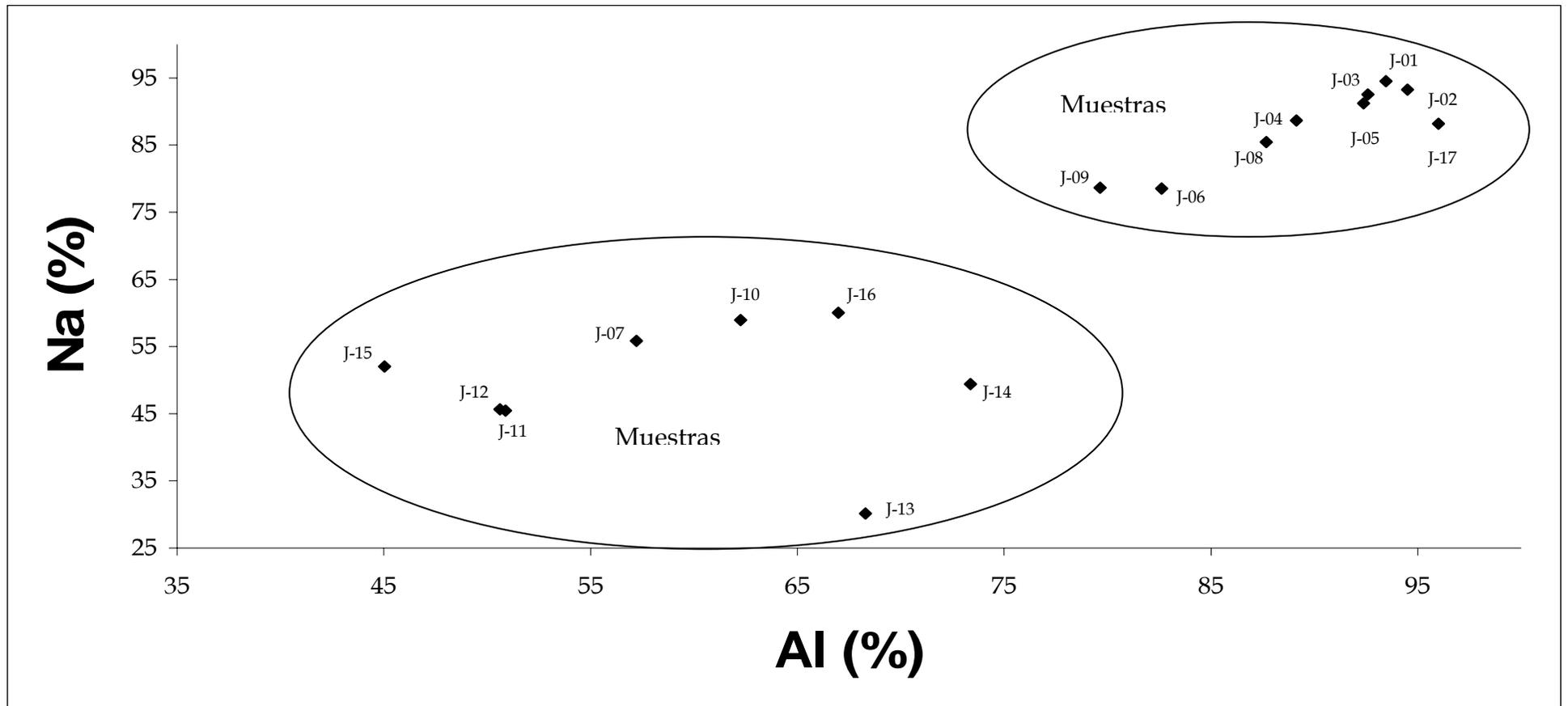


Gráfica 2. Composición de las muestras en el sistema jadeita-ferroaugita-augita.

El análisis de los resultados en la Gráfica 2, permite observar la variación en la composición química que existe en los jades analizados, lo cual es un reflejo de los cambios en la composición química del sistema que los originó en el momento de su formación. Los datos también permiten realizar las siguientes observaciones:

- Las muestras J-01 a J-05, J-08 y J-17 presentan una alta proporción del miembro final jadeita.
- Las muestras J-06, J-07, J-09 a J-16 tienen una composición intermedia entre la jadeíta y la augita, encontrándose dentro de la fase de ferroaugita.

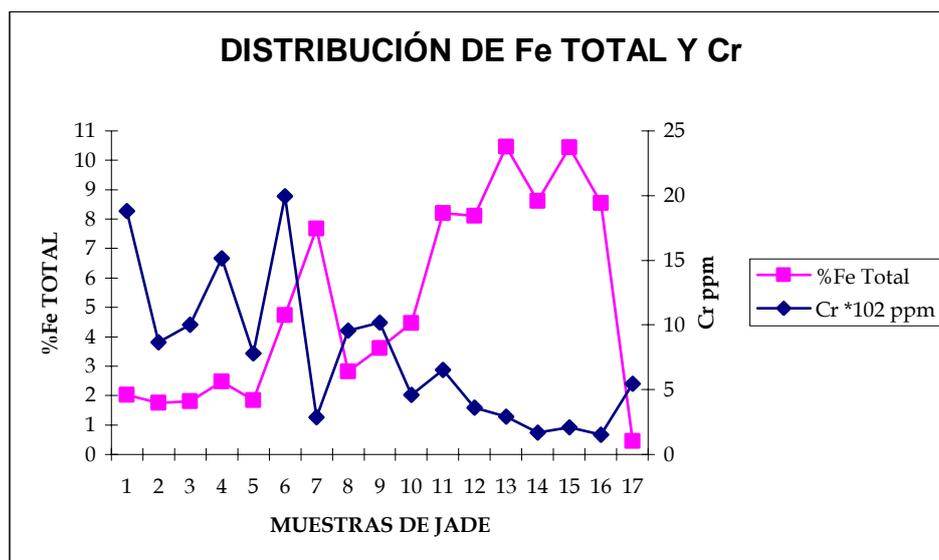
Esto es válido para la jadeita, debido a que la relación entre el sodio y el aluminio es de 1:1, lo cual puede observarse en la Gráfica 3. Esta gráfica permite diferenciar las muestras en función del color: las muestras claras (numeración baja) de las muestras oscuras (numeración alta), así mismo cabe mencionar que las muestras en el rango intermedio son las que presentan variación aleatoria en el contenido de cromóforos.



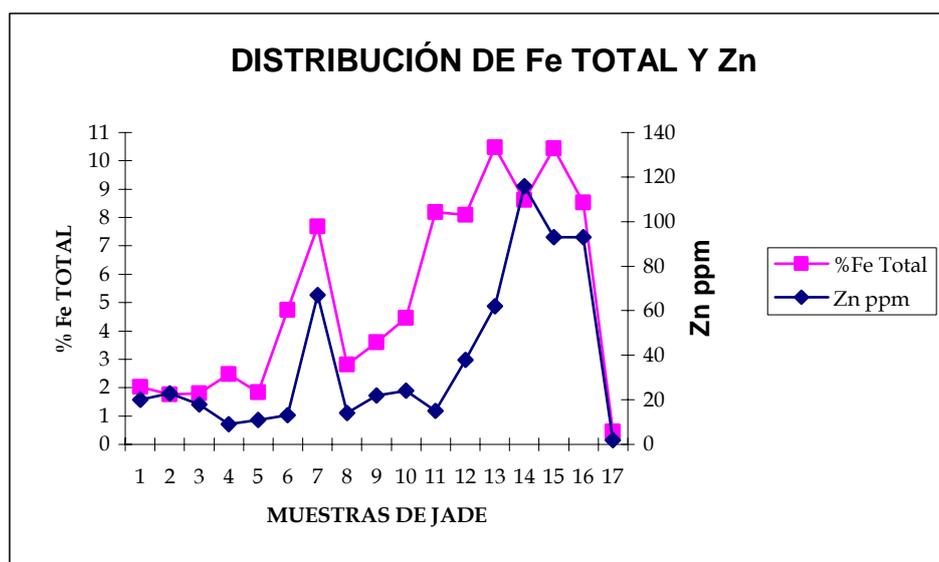
Gráfica 3. Correlación geoquímica de aluminio y sodio.

El contenido de silicio presente en las muestras analizadas es mayor que el esperado para un piroxeno (27.79%) lo que implica la presencia de otros minerales de la familia de los silicatos en la muestra. Sin embargo, este hecho no afecta la interpretación de los datos ya que los mismos se analizaron en función de las proporciones atómicas recalculadas en base a la fórmula general de la jadeíta considerando 2 átomo de silicio y 6 oxígenos por fórmula unitaria (10).

Correlación de los Elementos Cromóforos Analizados

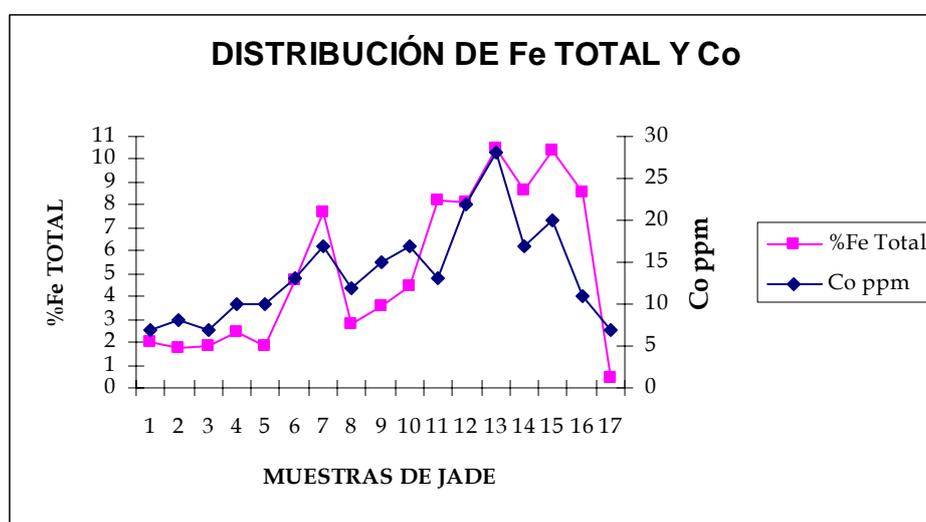


Gráfica 4. Correlación geoquímica de hierro y cromo en las muestras de jade analizadas.

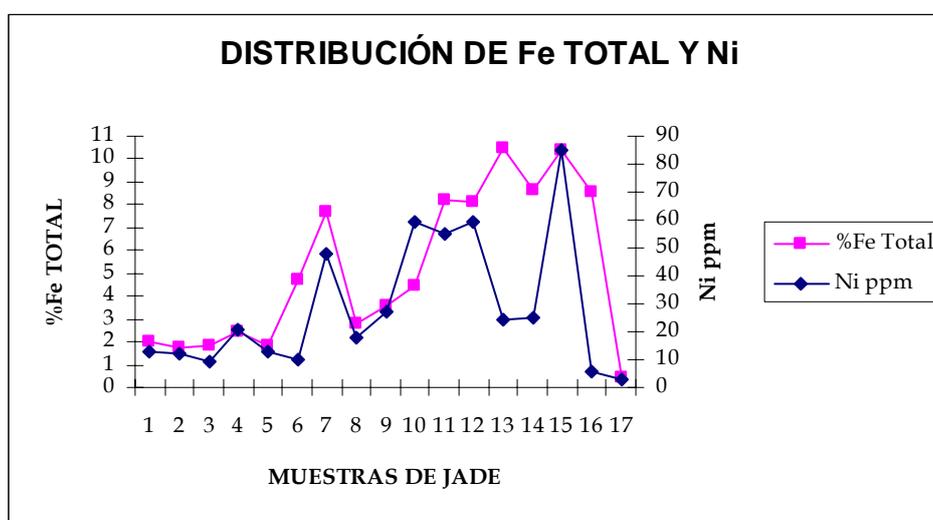


Gráfica 5. Correlación geoquímica de hierro y zinc en las muestras de jade analizadas.

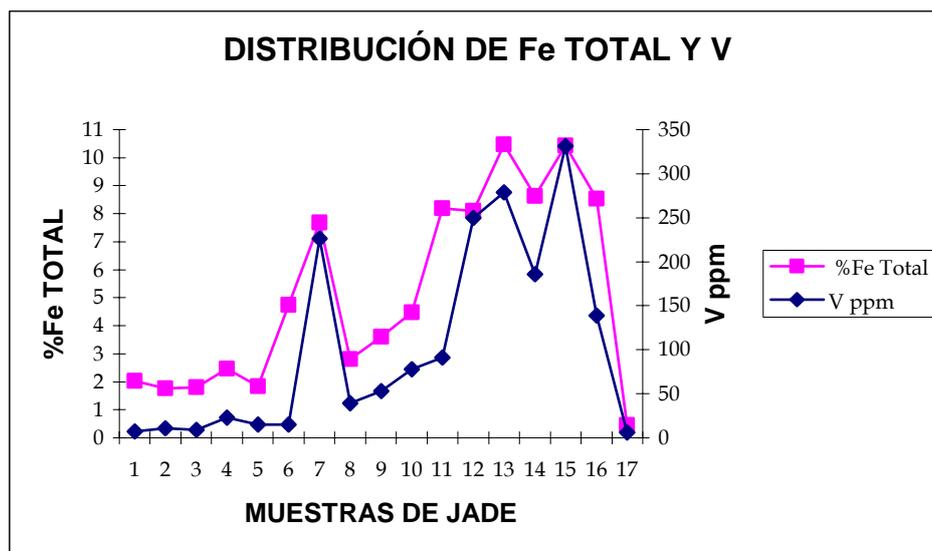
Como puede observarse en las dos gráficas anteriores cuando la proporción de hierro aumenta la proporción de cromo y zinc disminuye; este fenómeno es claramente visible en las muestras J-09, J-10, J-11, J-12, J-13, J-14 y J-15, donde esta variación puede asociarse con oscurecimiento de las muestras. Puede explicarse la captura del catión Cr^{+3} en la red cristalina del Fe^{+3} debido a que el radio iónico del Cr^{+3} (0.63 Å) es muy cercano al del Fe^{+2} (0.74 Å), pero el cromo muestra un alto grado de concentración preferencial la cual es relativa al ion hierro, siendo este último fácilmente removido. La presencia del cromo en las muestras de jade se debe también a las rocas ultramáficas y serpentinas que se encuentran cerca de los yacimientos y probablemente en estos se encuentra como el mineral cromita (FeCr_2O_4). La movilidad y concentración del cromo, limitan la sustitución iónica favoreciendo el fenómeno de captura en esta fase mineral (1), (12).



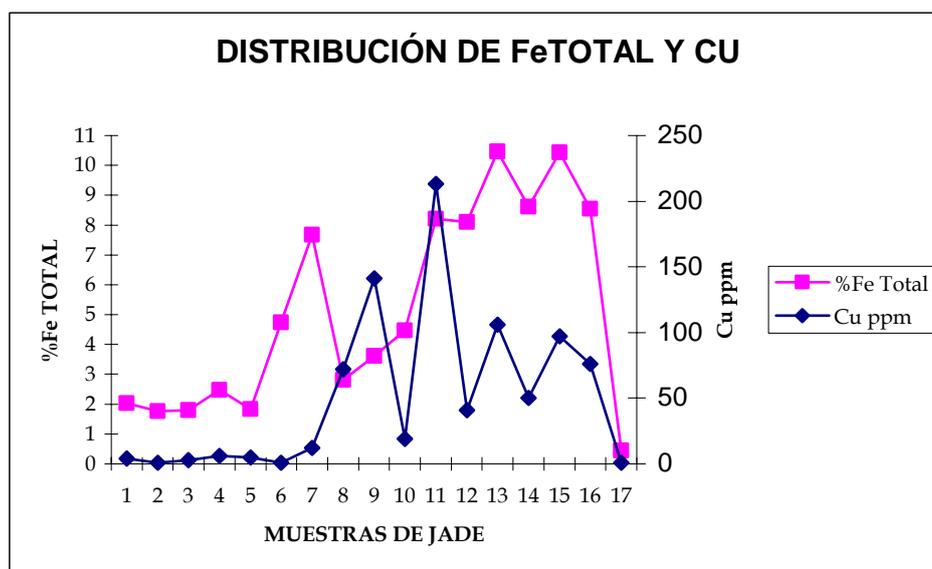
Gráfica 6. Correlación geoquímica de hierro y cobalto en las muestras de jade analizadas.



Gráfica 7. Correlación geoquímica de hierro y níquel en las muestras de jade analizadas.



Gráfica 8. Correlación geoquímica de hierro y vanadio en las muestras de jade analizadas.



Gráfica 9. Correlación geoquímica de hierro y cobre en las muestras de jade analizadas.

Puede observarse en las cuatro gráficas correspondientes que cuando la proporción de hierro aumenta la proporción de cobalto, vanadio, cobre y níquel también aumenta; esta característica es claramente visible en las muestras J-02, J-04, J-05, J-07 y J-08, en donde este hecho puede asociarse con un oscurecimiento de las muestras conforme estas van aumentando en proporción de los iones cromóforos. El ion cobalto bivalente (0.72 \AA) posee prácticamente el mismo tamaño de radio iónico al del ión ferroso (0.74 \AA), lo que permite que el ion Co^{+2} logre un camuflaje reemplazando al Fe^{+2} . El níquel posee fuertes campos de energía que permite estabilizar los cristales cuando se encuentra como el ion Ni^{+2} (0.69 \AA) esto le permite competir

exitosamente con el Fe^{+2} por los sitios octaédricos que se encuentran en los silicatos. El ion V^{+3} (0.74 Å) posee un radio iónico igual que el del ion Fe^{+2} , pero su electronegatividad es mucho menor y le permite estabilizar con mayor energía los campos cristalinos, por lo que se le puede encontrar con mucha frecuencia en los minerales ricos en Fe^{+2} (1).

George Harlow y otros geólogos explican que la variación del color verde en el jade es el resultado de un fenómeno de intervalencia en el hierro presente en las muestras, es decir la proporción $\text{Fe}^{+2}/\text{Fe}^{+3}$. En este estudio se encontró que la mayoría de las muestras analizadas presentan únicamente Fe^{+2} (calculado a partir de la relación $\text{Fe}^{+3} = \text{Na} - \text{Al}$). Solo las muestras J-01 y J-15, presentan Fe^{+3} en proporciones muy pequeñas (<0.10%). Por lo tanto, el color de los jades analizados se debe a fenómenos de sustitución iónica del Fe^{+2} por: Cr^{+3} , Ni^{+2} , Co^{+2} , Cu^{+2} , V^{+3} y Zn^{+2} .

10. CONCLUSIONES

- La posición octaédrica del hierro en la red cristalina de las jadeítas permite la sustitución isomórfica, el camuflaje y la captura de otros iones metálicos, permitiendo de esta manera que en las redes cristalinas se encuentren iones que puedan influir en el color de la jadeíta. Los elementos identificados en las muestras de jade guatemalteco mediante la técnica de fluorescencia de Rayos-X son: cromo, cobalto, zinc, cobre y vanadio.
- Los iones zinc, cobalto, níquel y vanadio tienen relación con el comportamiento del hierro influyendo en la coloración de las muestras, proporcionándoles una tonalidad verde, intensificándose cuando la relación de la concentración de Fe^{+2} y de dichos iones cromóforos aumenta.
- Los iones cromo no influye en la coloración de las muestras oscuras ya que su relación con el ion Fe^{+2} es inversa.
- El color violeta en las jadeítas se puede asociar a la presencia de cromo y cobre en la muestra.

11. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios utilizando otras técnicas espectrofotométricas tales como: Infrarrojo con Transformada de Fourier (IRFT), Infrarrojo cercano (NIR), Espectrometría de Inducción por Plasma (ICP) y Fluorescencia de Rayos-X acoplada a Microscopia Electrónica de Barrido (SEM-CDX), entre otras. Para determinar si la coloración del jade puede asociarse con algún parámetro espectrométrico medido mediante estas técnicas alternativas.
- Seleccionar un área de explotación de jade en el departamento de El Progreso, con el objeto de analizar las relaciones geoquímicas de las rocas y minerales presentes, para poder determinar las relaciones genéticas de estos depósitos.
- Extender el presente estudio a muestras de jade precolombino con el objeto de caracterizar su procedencia. Los resultados analíticos pueden servir para identificar y recuperar artefactos que fueron ilegalmente sustraídos del patrimonio cultural guatemalteco en virtud que las condiciones de formación del jade están restringidas a unas cuantas regiones en el mundo, y que la distribución de elementos mayores de cada muestra es única para cada depósito.

12. REFERENCIAS

1. Mason, B.; Moore, C. **PRINCIPLES OF GEOCHEMISTRY**. 4ta. Edición. John Wiley & Son. Estados Unidos. 1,982. pp. 70-73; 147; 256-259.
2. Bruhns, W.; Ramdohr. **PETROGRAFÍA**. Traduc. María Teresa Toral. Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana. México. 1,964. pp. 339-42; 112-120.
3. Sodi, D. **LOS MAYAS; VIDA, CULTURA Y ARTE A TRAVÉS DE UN PERSONAJE DE SU TIEMPO**. Editorial Panorama. México. 1,996. pp. 130-166.
4. Sinkankas, J. **GEMSTONES OF NORTH AMERICA**. Van Nostrand Reinhold Limited. Estados Unidos. 1,959. pp. 236-259.
5. Harlow, G. **JOURNAL OF METAMORPHIC GEOLOGY**. "Jadeititas, Albities & Related Rocks from the Motagua Sault, Zone Guatemala". 1,994. vol. 12 pp. 49-68
6. Texas Memorial Museum. **METAMORPHISM AND SEDIMENTARY PROCESSES**. Disponible en: http://www.tmm.utexas.edu/npl/mineralogy/Mineral_Genesis/Metamorphism.html Agosto de 2,003.
7. Thompson, G.; Turk, J.; Levin, H. **EARTH, Past and Present**. Harcourt Brace College Publishers. Estados Unidos. 1,995. pp. 61-67.
8. Universidad Central de Venezuela. Escuela de Geología y Minas. **CONCEPTOS GENERALES SOBRE MINERALOGÍA; ROCAS SEDIMENTARIAS, ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS**. 1,980. pp. 34.
9. Rutley, F. **ELEMENTOS DE MINERALOGÍA**. 3ra. Edición. Editorial Gustavo Gili, S.A. España. 1,989. pp. 287-294.
10. Carpenter, M. **AMERICAN MINERALOGYST** "Omphacites from Greece, Turkey and Guatemala". 1,979. vol. 64 pp. 102-108.
11. Bishop, R.; Mishara, J.; Sayre E. **PRECOLUMBIAM JADE, NEW GEOLOGICAL AND CULTURAL INTERPRETATIONS**. "Compositional and Structural Characterization of Maya and Costa Rica Jadeitites". University of Utah Press. 1,993. pp. 30-61.

12. Hurlbut, C. S.; Klein, C. **MANUAL OF MINERALOGY (After James D. Dana)**. 19va. Edición. John Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos. 1,991. pp 370-376.
13. Ministerio de Agricultura y Ganadería. El Laboratorio SIG-MAGA. Disponible en: www.maga.gob.gt
14. Hurlbut, C. **MANUAL DE MINERALOGIA DE DANA**. 2da. Edición. Editorial Reverté, S.A. España. 1,978. pp. 186-215.
15. Mineral Spectroscopy. **COLORS FROM IONIZING RADIATION**. Disponible en: www.minerals.gps.caltech.edu/COLOR_Causes/Radiate/index.html Junio de 2,001.
16. Mineral Spectroscopy. **COLORS FROM METAL IONS IN MINERALS**. Disponible en: www.minerals.gps.caltech.edu/COLOR_Causes/Metal_Ion/Tsavorit.gif Junio de 2,001.
17. Lozano, R.; Verma, S.; Girón-García, P.; Velasco, F.; Morán, D.; Viera, F.; Chávez, G. **CALIBRACIÓN PRELIMINAR DE FLUORESCENCIA DE RAYOS-X PARA ANÁLISIS CUANTITATIVO DE ELEMENTOS MAYORES EN ROCAS ÍGNEAS**. Instituto Nacional de Geoquímica. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 1,995. pp. 203-208.
18. Lozano, R.; Verma, S.; Girón-García, P.; Velasco, F. **CALIBRACIÓN PRELIMINAR DE FLUORESCENCIA DE RAYOS-X PARA ANÁLISIS CUANTITATIVO DE ELEMENTOS TRAZA EN ROCAS ÍGNEAS**. Instituto Nacional de Geoquímica. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 1,996. pp. 237-242.
19. Hauff, P. **PRECOLUMBIAN JADE, NEW GEOLOGICAL AND CULTURAL INTERPRETATIONS**. "The Enigma of Jade, with Mineralogical Reference to Central American Source Material". University of Utah Press. 1,993. pp. 82-103.

13. ANEXOS

ANEXO No.1

GLOSARIO

Actinolita: $\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5(\text{OH})_2$. Pertenece al sistema monoclinico y miembro extremo de una serie isomorfa. También conocida como *Tremolita*. Se emplea como material asbestiforme (12).

Albita: $\text{Si}_3\text{O}_8\text{NaAl-Ab}_{90}\text{-An}_{10}$ Perteneciente al sistema triclinico, de la familia de las Plagioclasas. La albita o *espato sódico*, como se le conoce comercialmente, se emplea en cerámica. Las variedades opalescentes se tallan y se conocen con el nombre de *piedra de luna* o *sol* (12).

Analcima: $\text{Si}_2\text{O}_6\text{NaAl-H}_2\text{O}$ Perteneciente al sistema isométrico. Es un mineral secundario, formado por la acción de las aguas termales, por lo que se encuentra depositado en cavidades de rocas ígneas (12).

Augita: Es un mineral diópsido, $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$ puede ser considerado como un miembro intermedio en que Al sustituye a Mg y Si. Pertenece al sistema monoclinico. Comúnmente forma soluciones sólidas

Exfoliación Prismática: las superficies de exfoliación son siempre paralelas a caras reales o posibles del cristal y normalmente tienen índices sencillos. Depende de la estructura cristalina y tiene lugar sólo paralelamente a planos atómicos (12).

Fluorescencia: constituye un proceso de emisión, en el que los átomos o moléculas se excitan por la absorción de un haz de radiación electromagnética. La fluorescencia de los minerales usualmente se efectúa bajo la luz ultravioleta (15).

Grado de Metamorfismo: es la intensidad con la que el proceso de metamorfismo formó a los minerales. La temperatura es el factor determinante en este proceso, debido a que el grado de metamorfismo muestra la temperatura a la que este ocurrió (6).

Jade: Comprende tanto la nefrita como la jadeíta (12).

Jadeíta: $\text{NaAl}(\text{SiO}_3)$ Pertenece al sistema monoclinico, de la familia de los Piroxenos Alcalinos. Generalmente en agregados macizos compactos y fibrosos, aparentemente formado por metamorfismo. Extremadamente duro y difícil de romper (9).

Metamorfismo: es el proceso por el cual las rocas y minerales sufren un cambio debido a la influencia de alta temperatura, alta presión y/o algún otro factor del

medio ambiente; las rocas sufren transformaciones químicas en el estado sólido sin llegar a fundirse (6).

Metamorfismos de Contacto Hidrotermal: llamado también Metasomatismo; las soluciones emanadas por el magma reaccionan con la caliza para producir nuevos minerales que contienen elementos que no estaban presentes en la caliza (6).

Metamorfismo de Contacto Térmico: llamado también Pirometamorfismo; toda roca sufre una intrusión de una masa ígnea, queda afectada en mayor o menor grado, dependiendo de un valor y la naturaleza del cambio, principalmente de la masa de la intrusión y del carácter químico y físico de las rocas que la rodean (6).

Muscovita: $(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})\text{KAl}_2(\text{OH})_2$ Perteneciente al sistema monoclinico. Conocida comercialmente como *Mica Blanca, Mica Común o Mica Potásica*. Caracterizada por su exfoliación muy perfecta y color claro; se distingue de la flogopita porque no se descompone al tener contacto con el ácido sulfúrico. Es utilizada en la industria como material aislante (12).

Nefrita: $\text{Na}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{OHSi}_4\text{O}_{11})_2$. Las propiedades físicas y químicas son semejantes a las de la actinolita. Es masivo y muy sólido. Translúcido, generalmente, de color verde. Es un mineral muy parecido a la jadeíta. Se diferencia de la jadeíta en que tiene una difícil fusión y reacciones químicas complejas. Génesis: metasomatismo de contacto (9).

Piroxenos: familia del grupo de los silicatos de fórmula general Si_2O_6 ; la composición química de los piroxenos corresponde a silicatos de hierro, magnesio y calcio, a veces con aluminio, algunas variedades contienen sodio o litio, por tener propiedades físicas y químicas muy similares y poseer estructura de cadena sencilla de óxido de silicio (9).

Serpentina: $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Mg}_3(\text{OH})_4$ Perteneciente al sistema monoclinico. La serpentina presenta dos hábitos distintos 1) variedad laminar, con propiedades como la de los filosilicatos y 2) variedad fibrosa. El nombre se refiere a los conglomerados serpentiformes, de color verde, de la variedad compacta (12).

Sistema Monoclinico: los cristales del sistema monoclinico se caracterizan por poseer un eje binario o un plano de simetría, o la combinación de un eje binario y un plano. Los cristales se refieren a tres ejes desiguales, dos de los cuales se cortan según un ángulo oblicuo y el tercero es perpendicular al plano de los otros dos (10).

Titanita: $(\text{SiO})_4\text{CaTiO}$ Perteneciente al sistema monoclinico. Caracterizada por la forma de sus cristales parecidos a una cuña y por el brillo intenso. Comercialmente se conoce con el nombre de *Esfena*. Es un mineral que se utiliza como fuente de titanio (12).

Zonación Rítmica: proceso de cristalización de un mineral donde la concentración de los iones varía de acuerdo al movimiento de los mismos entre el estado sólido-líquido.

ANEXO No.2

EQUIPO SIEMENS SRS 3000



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA

**CARACTERIZACION DE LAS VARIEDADES DE JADEÍTA
EXPLORADA EN GUATEMALA**

SOFÍA SALAZAR DE LEON
ALFREDO SALVADOR GÁLVEZ SINIBALDI
RUFINO LOZANO SANTA CRUZ

Guatemala Junio de 2004.

RESUMEN

El jade es una piedra semipreciosa cuya explotación y comercialización en Guatemala data de la época de los Mayas. Actualmente se comercializan distintas variedades de jade, cuyo valor depende principalmente de su coloración. El presente estudio utilizó la Fluorescencia de Rayos-X para determinar la variación del contenido de elementos cromóforos en la estructura química del jade considerando que son éstos los responsables de la coloración de este mineral. El jade se caracteriza por tener un color blanco a verde que en algunas ocasiones puede verse incluso negro, con nuevas variedades de color azul, champagne y violeta. Las muestras fueron clasificadas, previo a su análisis químico, en función del color con la ayuda de los artesanos de los talleres donde se trabaja este mineral denominándose las mismas J-01 a J-17. Una vez clasificadas se procedió a la molienda y análisis por Fluorescencia de Rayos-X, en el laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Los resultados de los análisis de las muestras de jade mostraron que donde la coloración que se observa es clara (J-01 a J-06) se clasifican como jadeítas ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$), mientras que las oscuras (J-07 a J-16) pertenecen a la fase de la ferroaugita ($\text{FeCaSi}_2\text{O}_6$). Los elementos cromóforos encontrados son: cromo, vanadio, níquel, zinc, cobalto y cobre. La coloración del jade depende de la proporción del ion Fe^{+2} y la relación con cada ion cromóforo. El análisis químico de jade puede ser utilizado como herramienta en la identificación de artefactos precolombinos de origen guatemalteco, debido a que las condiciones de formación de este mineral están restringidas a tan solo algunas regiones alrededor del mundo.

INTRODUCCIÓN

Guatemala se encuentra en una zona geológica muy diversa, ya que en el país convergen los límites de tres placas tectónicas: Norte América, Caribe y Cocos. Por esta razón, puede encontrarse en Guatemala una gran variedad de formaciones rocosas, que incluyen rocas ígneas, rocas sedimentarias y rocas metamórficas de diversa naturaleza y grado metamórfico (1). Por la variedad de formaciones rocosas presentes; Guatemala posee una riqueza mineral muy diversa, misma que puede ser utilizada en una amplia gama de industrias, tales como: las arcillas en aplicaciones médicas, el mármol en decoración, el cuarzo en la industria del vidrio, los feldspatos en la industria de porcelana, los agregados rocosos en la

construcción, y otras (2). Distintas variedades de piedras semipreciosas (jade, obsidiana, etc.) han sido explotadas en Guatemala a través de los años. El jade es un mineral asociado a rocas metamórficas, muy utilizado en la actualidad en joyería pero poco estudiado (2), (3). Este mineral fue reencontrado en Guatemala en el año de 1,952, en el valle del río Grande Motagua por Roberth Leslie (4). En la investigación y explotación de jade, se han encontrado muestras con una gran variación de colores, por ejemplo: las jadeítas de la aldea El Manzanotal, San Cristóbal Acasaguastlán, El Progreso, son generalmente blanquecinas, mientras que las del río La Palmilla, El Progreso, son negro laqueado o verde oscuro, encontrándose variedades de color intermedio entre estos extremos y

últimamente variedades de tonalidades y violetas, rojas, amarillas (5). Por esta diversidad de colores que presentan los jades de Guatemala se ha considerado importante desarrollar una metodología sencilla y rápida para caracterizar los elementos cromóforos presentes y determinar la influencia de los mismos en el color de cada variedad de jade que se comercializa en Guatemala. El análisis de las muestras de jade se realiza utilizando Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos-X (FRX), debido a su amplia utilización en la determinación cualitativa y cuantitativa de los elementos con número atómico mayor que el oxígeno.

MATERIALES

- Jadeitas
- Balanza analítica
- Mortero de diamonita
- Espátula
- Papel aluminio
- Molino de discos Gerson
- Crisol de porcelana
- Crisol de Pt/Au (95:5)
- Cera-C Hoechst
- Prensa Graseby/Specac
- Horno equipado con quemadores Fisher
- Tamizador No. 200
- Moldes Fluxy Claisse
- Solución de LiBr 250g/L

- Espectrómetro Secuencial de Rayos-X (SIEMENS SRS 3000)
- Fundente $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ - LiBO_2 (50:50 wt%)

METODOLOGÍA

Preparación de Muestra para Análisis de Elementos Mayores por Fluorescencia de Rayos X (6).

Moler cada una de las muestras en un molino de discos Gerson, a 78 PSI durante 30 segundos.

Tamizar las muestras en un tamiz No.200 Pesar 0.8 g de muestra y 7.2 g $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ y LiBO_2 (1:1).

Mezclar y agregar 2 gotas de la solución acuosa de LiBr, con una concentración de 250 g/L.

Colocar la mezcla en un crisol de una aleación de Pt:Au (95:5).

Calentar a 1100°C en un horno equipado con quemadores Fisher y moldes para la preparación simultanea de 3 perlas (Fluxy Claisse).

Dejar enfriar y retirar las perlas.

Preparación de Muestras para Análisis de Elementos Traza por Fluorescencia de Rayos X (7).

Mezclar 4 g de polvo de muestra con 0.4 g de Aglutinante (*cera-c, Hoechst*).

Prensar a 30 ton/cm² durante 30 segundos, en una prensa automática *Graseby/Specac*, con dado de 4 cm de diámetro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El jade es un piroxeno esencialmente compuesto por silicato de sodio y aluminio (NaAlSiO_3). El metamorfismo de las rocas ultramáficas, denominado serpentinización, en presencia de rocas sedimentarias y volcánicas de la corteza terrestre, permite las condiciones fisicoquímicas necesarias para el establecimiento del sistema Jadeita-Augita-Acmita (Jd-Au-Ac) mediante el cual, existen en equilibrio las fases minerales que lo conforman y que dan como resultado la formación del mineral que se conoce como Jade. En 1,978, Word y Henderson (11) demostraron que las altas presiones y bajas temperaturas, condiciones a las que se forma el jade, los piroxenos presentan una desviación de seis átomos de oxígeno a cuatro por unidad estructural, lo que requiere que la proporción atómica del Si en la estructura sea ≥ 2 cuando se

considera 6 átomos de oxígeno. Para un sistema en el que el Si ≥ 2 , la sumatoria de las proporciones atómicas de todos los átomos considerados siempre será ≤ 4 (10), (11). El análisis de las muestras de jade (Tabla 1) indican que hay una deficiencia en la proporción atómica por fórmula unitaria de sílice a partir de la fórmula general de los piroxenos, por lo que fue necesario recalcular a 2 silicios y 4 oxígenos, lo que da como resultado que se obtenga 4 cationes por fórmula unitaria, los cuales pueden ser sodio, calcio, aluminio, hierro, silicio, magnesio y en un caso muy particular titanio; los resultados se presentan tabulados en la Tabla 2 y es de hacer notar que solamente cinco de las diecisiete muestras analizadas requirieron del recalcu para los cationes en base a dos silicios (11).

ELEMENTOS MAYORES

Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3t}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC	Suma
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
J-01	58.756	0.077	23.156	2.021	0.013	0.512	1.14	14.234	0.028	0.021	0.28	100.24
J-02	58.85	0.052	23.522	1.759	0.028	0.635	1.221	14.114	0.037	0.002	0.3	100.52
J-03	59.423	0.076	23.323	1.803	0.01	0.591	1.19	14.171	0.028	0.002	0.03	100.65
J-04	58.289	0.129	22.223	2.468	0.05	1.226	2.079	13.412	0.032	0.001	0.14	100.05
J-05	58.548	0.077	23.074	1.838	0.045	0.918	1.548	13.85	0.043	0.013	0.14	100.09
J-06	55.62	0.267	19.562	4.734	0.073	2.811	5.025	11.299	0.049	0.014	0.26	99.71
J-07	54.498	1.004	13.229	7.675	0.152	4.515	10.296	7.848	0.031	0.06	0.5	99.81
J-08	57.966	0.134	21.778	2.814	0.054	1.352	3.048	12.898	0.021	0.012	0.4	100.48
J-09	57.566	0.179	19.595	3.605	0.071	2.384	4.52	11.76	0.028	0.014	0.24	99.96
J-10	56.283	0.5	15.021	4.467	0.078	4.883	9.261	8.645	0.062	0.004	0.94	100.14
J-11	52.824	0.52	11.402	8.197	0.172	6.835	12.938	6.194	0.034	0.002	1.24	100.36
J-12	52.446	0.517	11.262	8.103	0.17	6.738	12.838	6.17	0.032	0.006	2.36	100.64
J-13	47.505	0.618	15.779	10.467	0.195	5.577	12.668	4.92	0.231	0.149	2.6	100.71
J-14	52.471	0.58	16.332	8.62	0.248	3.831	9.47	6.686	0.18	0.08	2.26	100.76
J-15	53.301	0.853	10.181	10.432	0.426	5.112	12.269	7.152	0.012	0.01	0.02	99.77
J-16	56.472	0.791	16.33	8.535	0.236	2.276	5.496	8.895	0.134	0.759	0.86	100.78
J-17	59.748	0.365	24.222	0.45	0.024	0.188	1.329	13.521	0.046	0.082	0.78	100.76

Tabla 1. Elementos mayores analizados en las muestras de jade

	Si	Al	Fe total	Mg	Ca	Na	K	TOTAL
J-01	2.012	0.935	0.018	0.027	0.042	0.945	0.001	3.979
J-02	2.006	0.945	0.016	0.032	0.045	0.933	0.002	3.978
J-03	2.001	0.926	0.046	0.030	0.043	0.925	0.001	3.972
J-04	1.987	0.891	0.063	0.062	0.076	0.887	0.001	3.968
J-05	1.988	0.924	0.047	0.046	0.056	0.912	0.002	3.976
J-06	2.000	0.826	0.128	0.150	0.193	0.785	0.002	4.084
J-07	2.000	0.572	0.212	0.247	0.405	0.559	1.00E-03	3.996
J-08	1.980	0.877	0.072	0.069	0.112	0.854	9.00E-04	3.964
J-09	1.985	0.796	0.094	0.123	0.167	0.786	0.001	3.952
J-10	1.979	0.623	0.118	0.256	0.349	0.590	0.003	3.917
J-11	2.000	0.509	0.234	0.386	0.525	0.455	0.002	4.109
J-12	2.000	0.506	0.233	0.383	0.525	0.456	0.002	4.104
J-13	2.000	0.683	0.232	0.350	0.471	0.302	0.012	4.050
J-14	2.000	0.734	0.247	0.218	0.387	4.940	0.009	4.088
J-15	2.000	0.450	0.295	0.286	0.493	0.520	6.00E-04	4.045
J-16	1.986	0.670	0.223	0.118	0.205	0.600	0.006	3.808
J-17	2.009	0.960	0.011	0.009	0.048	0.882	0.002	3.921

Tabla 2. Recálculo de seis átomos de oxígeno a cuatro átomos de oxígeno en cada una de las muestras de jade.

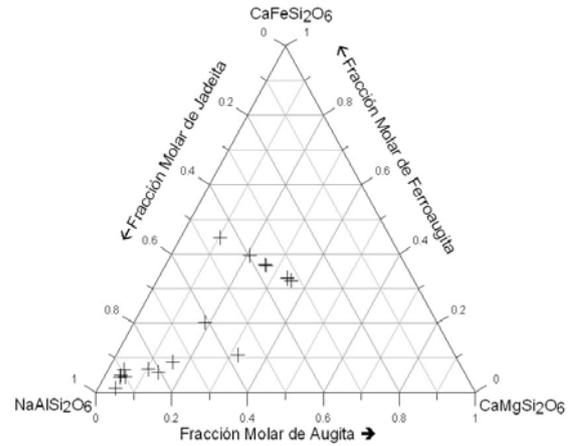
Tomando como base los estudios de Carpenter, se definieron los miembros finales del sistema Jadeíta-Augita-Acmita de la siguiente manera (11):

- Proporción atómica de Jadeíta = Al
- Proporción atómica de Acmita = Fe^{+3}
- Proporción atómica de Augita = Ca

El Fe^{+3} se calcula a partir de la relación Na-Al, puesto que el Fe^{+3} presente reemplazará al Al^{+3} para formar acmita ($\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$). Al realizar este cálculo se encontró que para la mayoría de las muestras la concentración de $\text{Fe}^{+3} \leq 0$. Esto implica que el hierro se encuentra como Fe^{+2} formando Ferroaugita ($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$), al sustituir parte del magnesio en la augita ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$). Por lo tanto, se redefinió el sistema en función de:

- Proporción atómica de Jadeíta = Al
- Proporción atómica de Ferroaugita = Fe_{total}
- Proporción atómica de Augita = Ca

Se puede representar la distribución de las muestras analizadas en función del sistema Jadeíta-Ferroaugita-Augita. Los resultados de este análisis se presentan a continuación en la Tabla 3. De la misma manera, la Gráfica 2 muestra la distribución de las muestras en un diagrama triangular en donde los vértices del triángulo representan el 100% de cada componente.

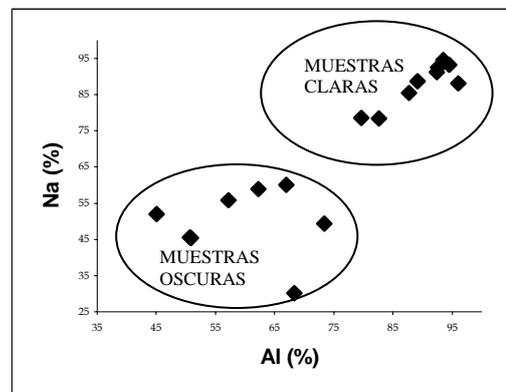


Gráfica 2. Composición de las muestras en el sistema jadeíta-ferroaugita-augita.

El análisis de los resultados en la Gráfica 2, permite observar la variación en la composición química que existe en los jades analizados, lo cual es un reflejo de los cambios en la composición química del sistema que los originó en el momento de su formación. Los datos también permiten realizar las siguientes observaciones: a) Las muestras J-01 a J-05, J-08 y J-17 presentan una alta proporción del miembro final jadeíta. b) Las muestras J-06, J-07, J-09 a J-16 tienen una composición intermedia entre la jadeíta y la augita, encontrándose dentro de la fase de ferroaugita. Esto es válido para la jadeíta, debido a que la relación entre el sodio y el aluminio es de 1:1, lo cual puede observarse en la Gráfica 3. Esta gráfica permite diferenciar las muestras en función del color: Las muestras claras (numeración baja) de las muestras oscuras (numeración alta), así mismo cabe mencionar que las muestras en el rango intermedio son las que presentan variación aleatoria en el contenido de cromóforos.

Muestras	Augita	Ferroaugita	Jadeíta
J-01	0.081317996	0.010184929	0.908497076
J-02	0.085231659	0.011664469	0.903103872
J-03	0.084853441	0.000433058	0.914713500
J-04	0.144476466	0.006101576	0.849421959
J-05	0.107493174	0.011156362	0.881350464
J-06	0.584386951	0.028956133	0.386656916
J-07	0.408588103	0.013911384	0.577500512
J-08	0.198768253	0.020092912	0.781138835
J-09	0.292846133	0.008882066	0.698271802
J-10	0.515570551	0.024483030	0.459946420
J-11	0.482499544	0.049744882	0.467755574
J-12	0.485369485	0.046250028	0.468380487
J-13	0.410353558	0.027385652	0.562260790
J-14	0.478363883	0.067876385	0.453759732
J-15	0.671842415	0.021518954	0.306638631
J-16	0.356619740	0.060575596	0.582804663
J-17	0.084433267	0.069164513	0.846402219

Tabla 3. Composición porcentual del sistema jadeíta-ferroaugita-augita. El hierro está expresado como hierro (II).

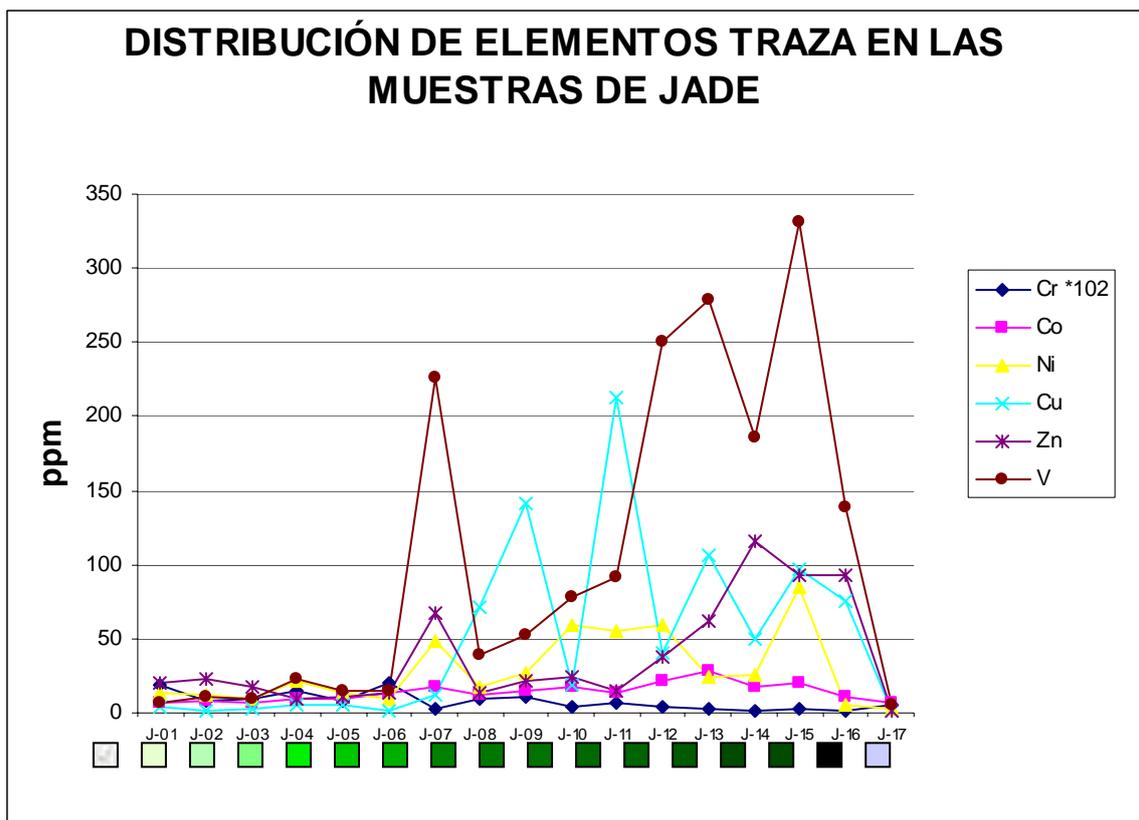


Gráfica 3. Correlación geoquímica de aluminio y sodio.

ELEMENTOS MENORES

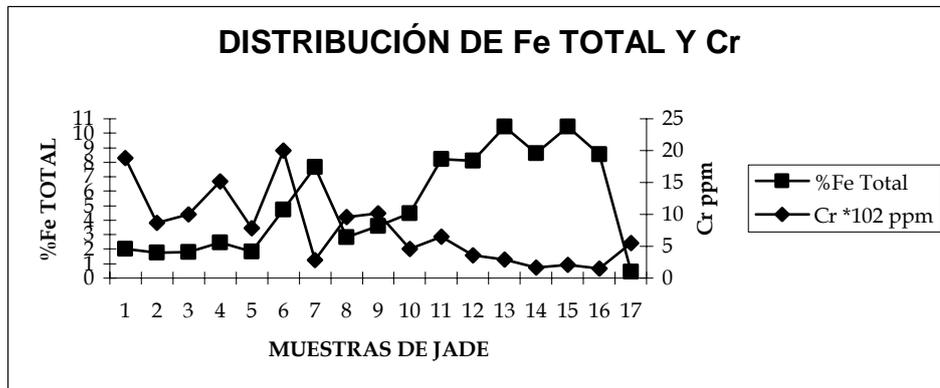
MUESTRAS	Rb ppm	Sr ppm	Ba ppm	Y ppm	Zr ppm	Nb ppm	V ppm	Cr ppm	Co ppm	Ni ppm	Cu ppm	Zn ppm	Th ppm	Pb ppm
J-01	2	8	69	< 1	96	< 1	7	1881	7	13	4	20	< 3	< 4
J-02	2	11	77	< 1	38	< 1	11	866	8	12	1	23	< 3	< 4
J-03	2	7	55	< 1	34	< 1	9	1003	7	3	3	18	< 3	< 4
J-04	2	8	28	1	89	< 1	23	1513	10	21	6	9	< 3	< 4
J-05	2	11	13	< 1	72	< 1	15	782	10	13	5	11	< 3	5
J-06	2	4	23	< 1	36	< 1	15	1996	13	10	1	13	< 3	20
J-07	1	171	13	20	154	5	226	285	17	48	12	67	< 3	< 4
J-08	2	85	96	1	34	< 1	39	958	12	18	72	14	< 1	< 4
J-09	2	267	279	1	73	< 1	53	1019	15	27	141	22	< 3	< 4
J-10	2	380	33	3	115	1	78	460	17	59	19	24	< 3	9
J-11	< 1	3122	317	4	83	< 1	91	651	13	55	213	15	< 1	22
J-12	2	346	44	6	72	1	250	362	22	59	41	38	< 3	5
J-13	4	109	36	7	45	< 1	279	293	28	24	106	62	< 3	< 4
J-14	4	136	89	13	144	1	186	170	17	25	50	116	< 3	8
J-15	3	96	65	23	106	4	331	208	20	85	97	93	< 3	< 4
J-16	1	61	39	23	106	2	139	151	11	6	76	93	3	4
J-17	2	63	28	6	185	1	6	546	7	3	1	2	< 3	< 4

Tabla 4. Resultados de los elementos menores en cada una de las muestras de jade. El signo < significa que el elemento analizado está por abajo del límite de detección del instrumento.

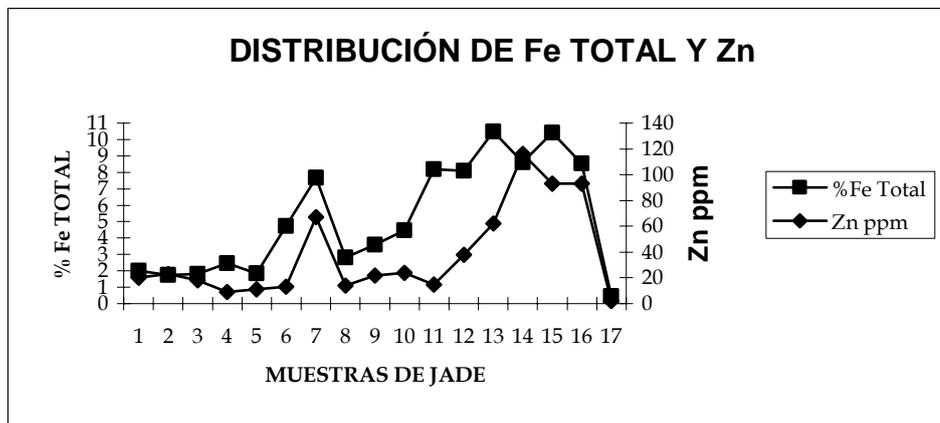


Gráfica 1. Variación de los elementos traza en cada muestra.

Correlación de los Elementos Cromóforos Analizados



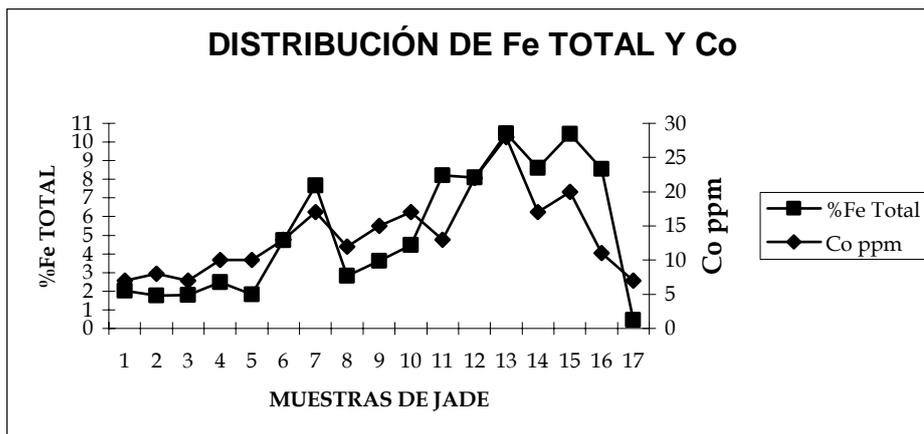
Gráfica 4. Correlación geoquímica de hierro y cromo en las muestras de jade analizadas.



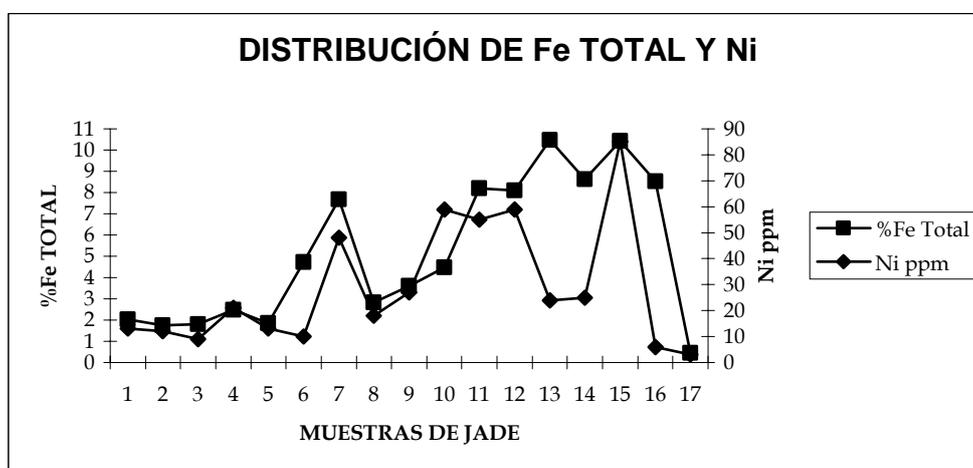
Gráfica 5. Correlación geoquímica de hierro y zinc en las muestras de jade analizadas.

Como puede observarse en las gráficas 4 y 5, cuando la proporción de hierro aumenta la proporción de cromo y zinc disminuye; este fenómeno es claramente visible en las muestras J-09, J-10, J-11, J-12, J-13, J-14 y J-15, donde esta variación puede asociarse con oscurecimiento de las muestras. Puede explicarse la captura del catión Cr^{+3} en la red cristalina del Fe^{+3} debido a que el radio iónico del Cr^{+3} (0.63 Å) es muy cercano al del Fe^{+2} (0.74 Å), pero el cromo muestra un

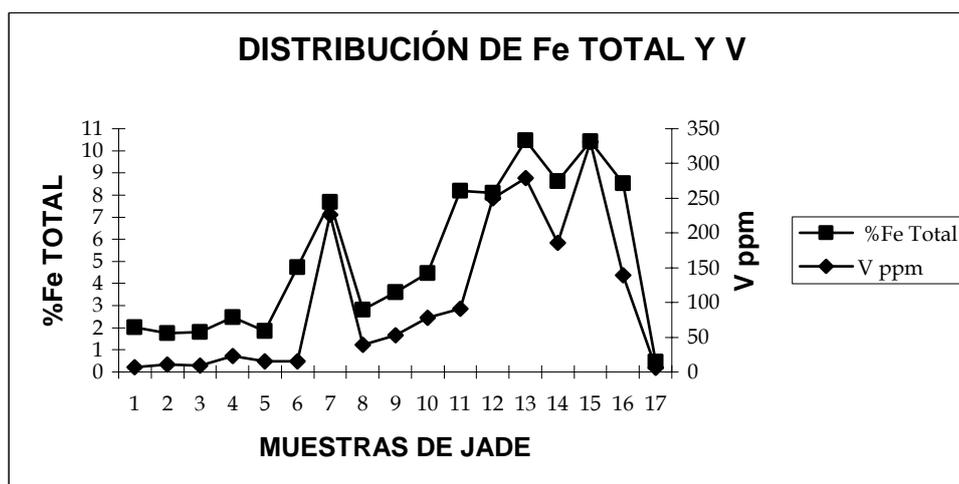
alto grado de concentración preferencial la cual es relativa al ion hierro, siendo este último fácilmente removido. La presencia del cromo en las muestras de jade se debe también a las rocas ultramáficas y serpentinas que se encuentran cerca de los yacimientos y probablemente en estos se encuentra como el mineral cromita (FeCr_2O_4). La movilidad y concentración del cromo, limitan la sustitución iónica favoreciendo el fenómeno de captura en esta fase mineral (1), (11).



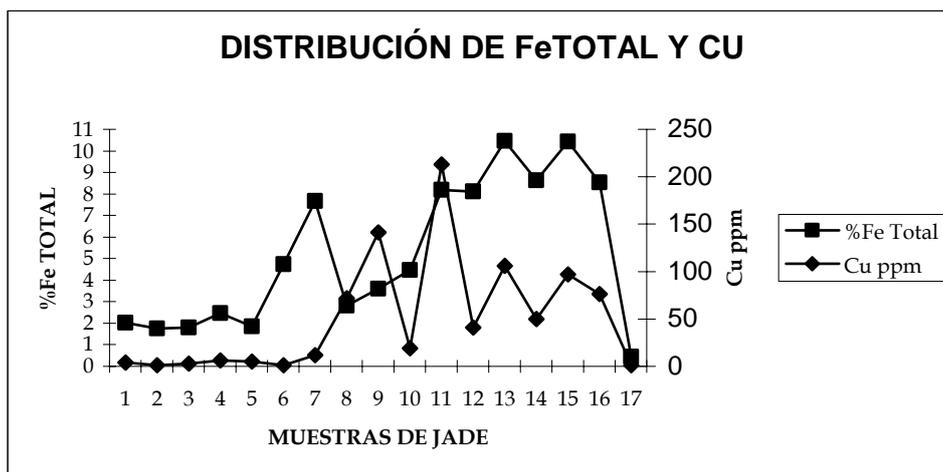
Gráfica 6. Correlación geoquímica de hierro y cobalto en las muestras de jade analizadas.



Gráfica 7. Correlación geoquímica de hierro y níquel en las muestras de jade analizadas.



Gráfica 8. Correlación geoquímica de hierro y vanadio en las muestras de jade analizadas.



Gráfica 9. Correlación geoquímica de hierro y cobre en las muestras de jade analizadas.

Puede observarse en las gráficas 6, 7, 8 y 9, que cuando la proporción de hierro aumenta la proporción de cobalto, vanadio, cobre y níquel también aumenta; esta característica es claramente visible en las muestras J-02, J-04, J-05, J-07 y J-08, en donde este hecho puede asociarse con un oscurecimiento de las muestras conforme estas van aumentando en proporción de los iones cromóforos. El ion cobalto bivalente (0.72 Å) posee prácticamente el mismo tamaño de radio iónico al del ión ferroso (0.74 Å), lo que permite que el ion Co^{+2} logre un camuflaje reemplazando al Fe^{+2} . El níquel posee fuertes campos de energía que permite estabilizar los cristales cuando se encuentra como el ion Ni^{+2} (0.69 Å) esto le permite competir exitosamente con el Fe^{+2} por los sitios octaédricos que se encuentran en los silicatos. El ion V^{+3} (0.74 Å) posee un radio iónico igual que el del ion Fe^{+2} , pero su electronegatividad es mucho menor y le permite estabilizar con mayor energía los campos cristalinos, por lo que se le puede encontrar con mucha frecuencia en los minerales ricos en Fe^{+2} (1). George Harlow (5) y otros geólogos explican que la variación del color verde en el jade es el resultado de un fenómeno de intervalencia en el hierro presente en las muestras, es decir la proporción $\text{Fe}^{+2}/\text{Fe}^{+3}$. En este estudio se encontró que la mayoría de las muestras analizadas presentan únicamente Fe^{+2} (calculado a partir de la relación $\text{Fe}^{+3} = \text{Na} - \text{Al}$). Solo las muestras J-01 y J-15, presentan Fe^{+3} en proporciones muy pequeñas (<0.10%). Por lo tanto, el color de los jades analizados se debe a

fenómenos de sustitución iónica del Fe^{+2} por: Cr^{+3} , Ni^{+2} , Co^{+2} , Cu^{+2} , V^{+3} y Zn^{+2} .

CONCLUSIONES

La posición octaédrica del hierro en la red cristalina de las jadeítas permite la sustitución isomórfica, el camuflaje y la captura de otros iones metálicos, permitiendo de esta manera que en las redes cristalinas se encuentren iones que puedan influir en el color de la jadeíta. Los elementos identificados en las muestras de jade guatemalteco mediante la técnica de fluorescencia de Rayos-X son: cromo, cobalto, zinc, cobre y vanadio.

Los iones zinc, cobalto, níquel y vanadio tienen relación con el comportamiento del hierro influyendo en la coloración de las muestras, proporcionándoles una tonalidad verde, intensificándose cuando la relación de la concentración de Fe^{+2} y de dichos iones cromóforos aumenta.

RECOMENDACIONES

Realizar estudios utilizando otras técnicas espectrofotométricas tales como: Infrarrojo con Transformada de Fourier (IRFT), Infrarrojo cercano (NIR), Espectrometría de Inducción por Plasma (ICP) y Fluorescencia de Rayos-X acoplada a Microscopia Electrónica de Barrido (SEM-CDX), entre otras. Para determinar si la coloración del jade puede asociarse con algún parámetro espectrométrico medido mediante estas técnicas alternativas.

Seleccionar un área de explotación de jade en el departamento de El Progreso, con el objeto de analizar las relaciones geoquímicas de las rocas y minerales

presentes, para poder determinar las relaciones genéticas de estos depósitos.

Extender el presente estudio a muestras de jade precolombino con el objeto de caracterizar su procedencia. Los resultados analíticos pueden servir para identificar y recuperar artefactos que fueron ilegalmente sustraídos del patrimonio cultural guatemalteco en virtud que las condiciones de formación del jade están restringidas a unas cuantas regiones en el mundo, y que la distribución de elementos mayores de cada muestra es única para cada depósito.

REFERENCIAS

1. Mason, B.; Moore, C.
PRINCIPLES OF GEOCHEMISTRY. 4ta. Edición. John Wiley & Son. Estados Unidos. 1,982. pp. 70-73; 147; 256-259.
2. Bruhns, W.; Ramdohr.
PETROGRAFÍA. Traduc. María Teresa Toral. Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana. México. 1,964. pp. 339-42; 112-120.
3. Sodi, D. **LOS MAYAS; VIDA, CULTURA Y ARTE A TRAVÉS DE UN PERSONAJE DE SU TIEMPO.** Editorial Panorama. México. 1,996. pp. 130-166.
4. Sinkankas, J. **GEMSTONES OF NORTH AMERICA.** Van Nostrand Reinhold Limited. Estados Unidos. 1,959. pp. 236-259.
5. Harlow, G. **JOURNAL OF METAMORPHIC GEOLOGY.** "Jadeitites, Albities & Related Rocks from the Motagua Sault, Zone Guatemala". 1,994. vol. 12 pp. 49-68
6. Lozano, R.; Verma, S.; Girón-García, P.; Velasco, F.; Morán, D.; Viera, F.; Chávez, G.
CALIBRACIÓN PRELIMINAR DE FLUORESCENCIA DE RAYOS-X PARA ANÁLISIS CUANTITATIVO DE ELEMENTOS MAYORES EN ROCAS ÍGNEAS. Instituto Nacional de Geoquímica. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 1,995. pp. 203-208.
7. Lozano, R.; Verma, S.; Girón-García, P.; Velasco, F.
CALIBRACIÓN PRELIMINAR DE FLUORESCENCIA DE RAYOS-X PARA ANÁLISIS CUANTITATIVO DE ELEMENTOS TRAZA EN ROCAS ÍGNEAS. Instituto Nacional de Geoquímica. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 1,996. pp. 237-242.
8. Carpenter, M. **AMERICAN MINERALOGYST** "Omphacites from Greece, Turkey and Guatemala". 1,979. vol. 64 pp. 102-108.
9. Bishop, R.; Mishara, J.; Sayre E. **PRECOLUMBIAM JADE, NEW GEOLOGICAL AND CULTURAL INTERPRETATIONS.** "Compositional and Structural Characterization of Maya and Costa Rica Jadeitites". University of Utah Press. 1,993. pp. 30-61.
10. Hurlbut, C. S.; Klein, C. **MANUAL OF MINERALOGY (After James D. Dana).** 19va. Edición. John Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos. 1,991. pp. 370-376.
11. Hurlbut, C. **MANUAL DE MINERALOGIA DE DANA.** 2da. Edición. Editorial Reverté, S.A. España. 1,978. pp. 186-215.