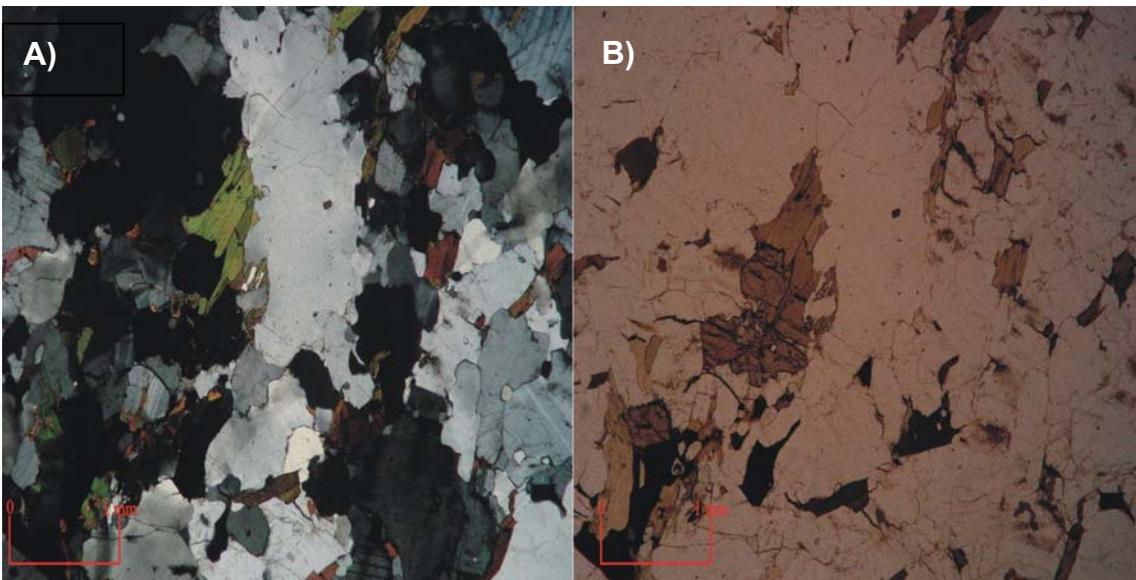




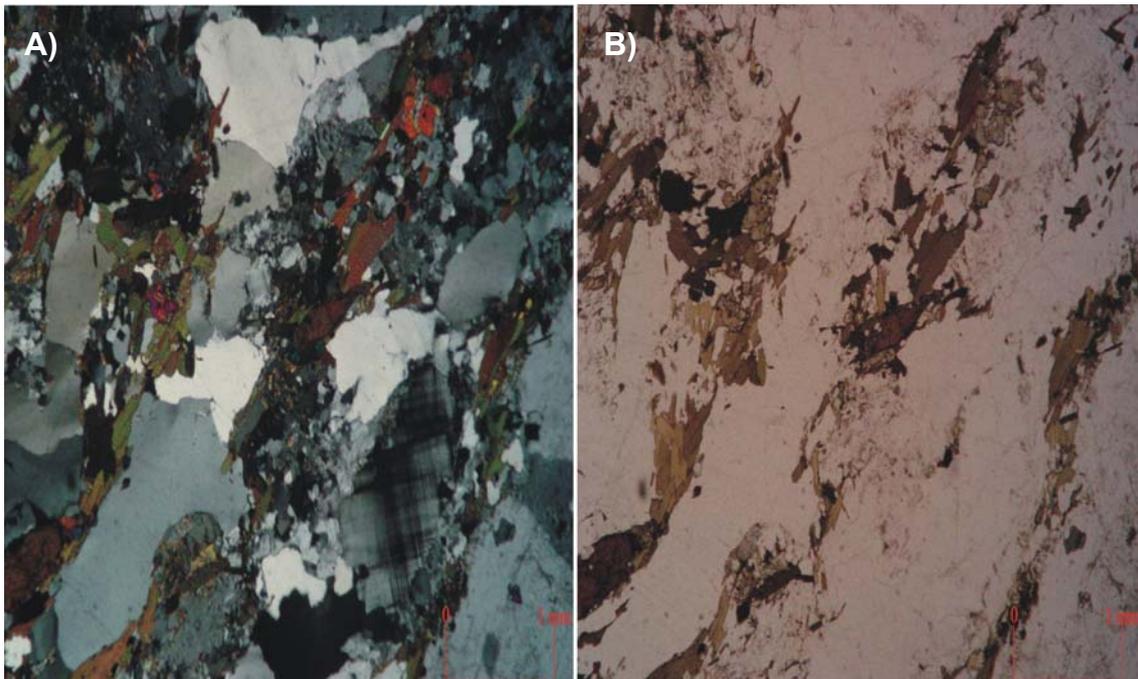
**Fotografia 5.5.** Detalhe do afloramento da amostra BO-03-04, mostrando estruturas dúcteis.



**Fotomicrografia 5.5.** Gnaiss La Chiquitania (amostra BO-03-004) em A) nicóis cruzados mostra abundância de quartzo, plagioclásio e microclina, em B) nicóis paralelos tem-se granada rodeadas por biotitas, objetiva 2,5 x.

A microclina se apresenta de forma subédrica, às vezes, com inclusões de agulhas de muscovita. O ortoclásio aparece em uma porcentagem mínima (2%) e de forma subédrica e sem fraturas.

Os minerais máficos são biotitas cloritizadas com inclusões de zircão, acompanhadas de glomeropórfiros de titanita (Fotomicrografia 5.6). Com base em todas as características observadas e aqui descritas, a rocha foi classificada como um ortogneisse de composição granítica.



**Fotomicrografia 5.6.** Amostra BO-03-015 da unidade Gnaiss La Chiquitania, onde se observa a natureza félsica, em A) nícois cruzados temos fenocristais de biotita e titanita, em B) nícois paralelos se apresenta uma foliação dos minerais máficos, em particular observaram-se biotitas em forma alongada, objetiva 2.5X.

#### 5.4 Granitóides San Ignacio

Na parte central da área de estudo e sobre o caminho que une as cidades de Concepción, San Javier e San Ramón, encontram-se os granitóides San Andrés, El Refugio e San Ramón, que serão descritos a seguir:

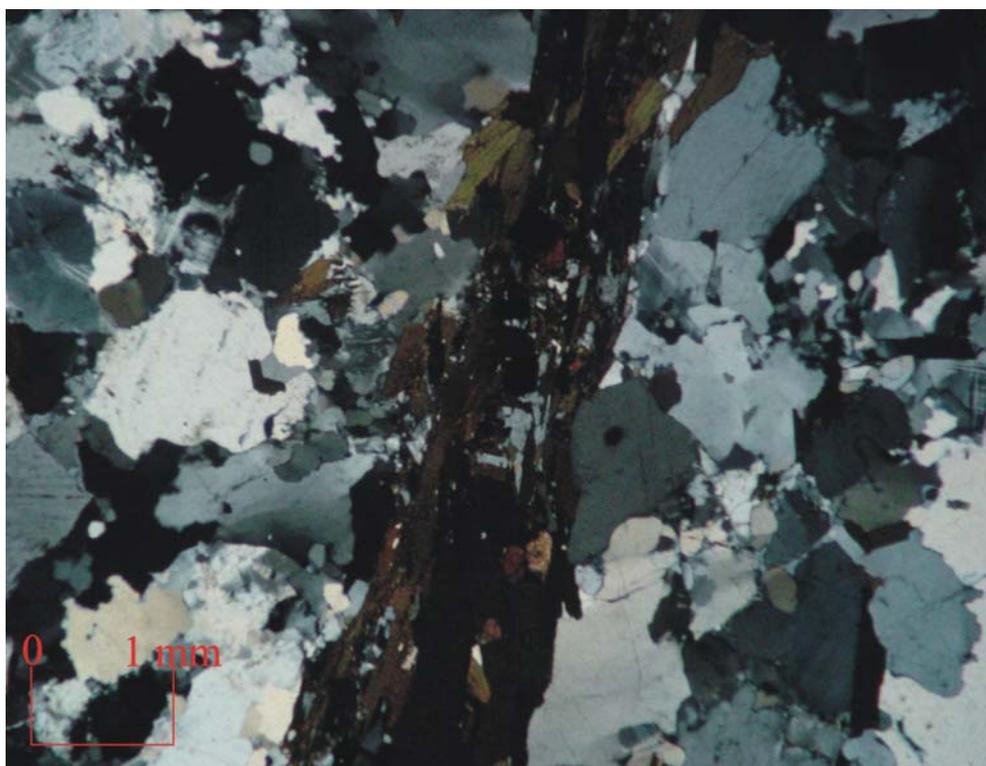
#### 5.4.1 Granito San Andrés (BO-03-10)

Ao nordeste da cidade de San Javier encontra-se o granitoide San Andrés (BO-03-10) e se apresenta como uma rocha cor cinza esbranquiçada, de granulometria média e com cristais de quartzo, K-feldspatos e máficos.

Microscopicamente a composição é quartzo-feldspática, com 71% de minerais félsicos. A amostra apresenta quartzo (33%), plagioclásio (14%), K-feldspatos (24%), mirmequita (5%), biotita (16%), titanita (7%) e minerais acessórios (1%).

Os minerais máficos estão representados por biotita de forma tabular e em corte basal e inclusões de zircão (Fotomicrografia 5.7).

A titanita apresenta um relevo alto, é pleocróica, com fortes cores de interferência e rodeadas por biotitas colunares. Com todos estes dados e baseado-se no diagrama ternário QAP, a rocha pode ser classificada como um granito.



**Fotomicrografia 5.7.** Granito San Andrés (amostra BO-03-010) com um forte alinhamento das biotitas em uma matriz quartzo-feldspática, objetiva 2.5 x, nicois (x).

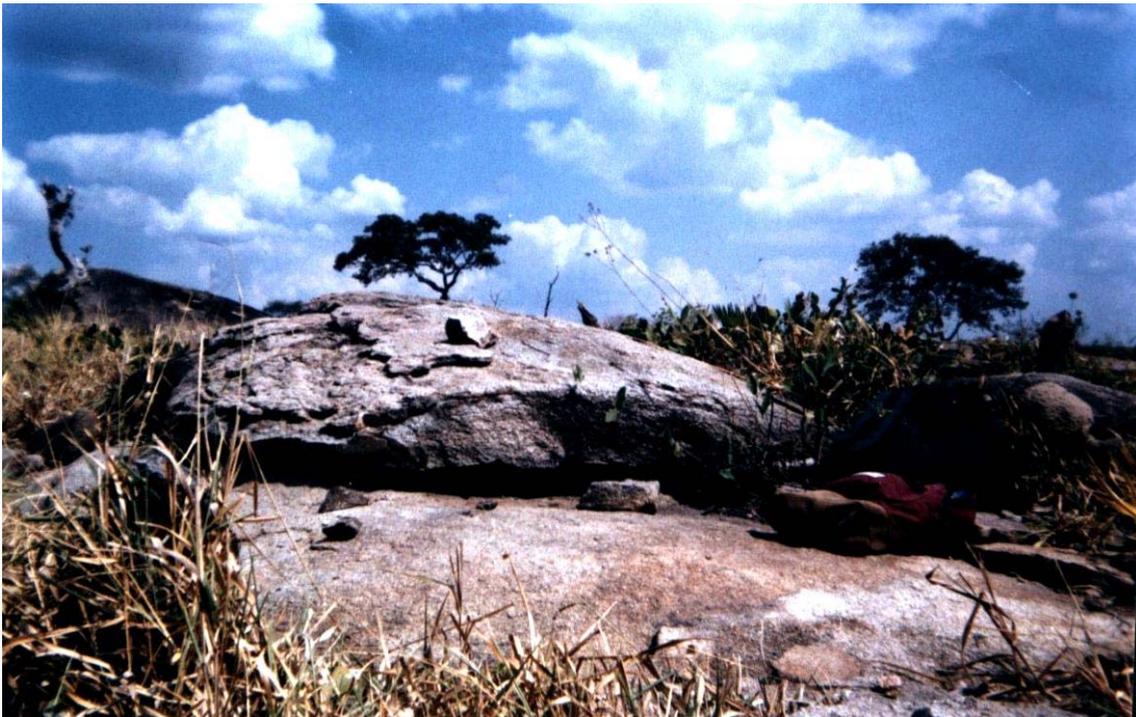
#### 5.4.2 Granito El Refugio (BO-03-12)

Na rodovia Concepción-San Javier se observou um afloramento de corte de estrada (Fotografia 5.7), do granitóide El Refugio (BO-03-12) de cor esbranquiçada, parcialmente intemperizado, granulometria média à fina (Fotografia 5.8) e de natureza quartzo-feldspática (Fotomicrografia 5.9).

Microscopicamente foi conferida a abundância de quartzo (44%), plagioclásio (20%), K-feldspato (27%), minerais acessórios (3%) e secundários (6%).

Os fenocristais de maior tamanho estão representados pela microclina, mas não passam dos 2 mm de comprimento, não apresentam fraturas e uma capa fina, produto da alteração, cobre a maioria dos grãos.

O quartzo aparece na rocha com formas subédricas a anédricas, com bordas suturadas, ocorrendo juntamente com os plagioclásios através de reações formando exoluções mirmequíticas.



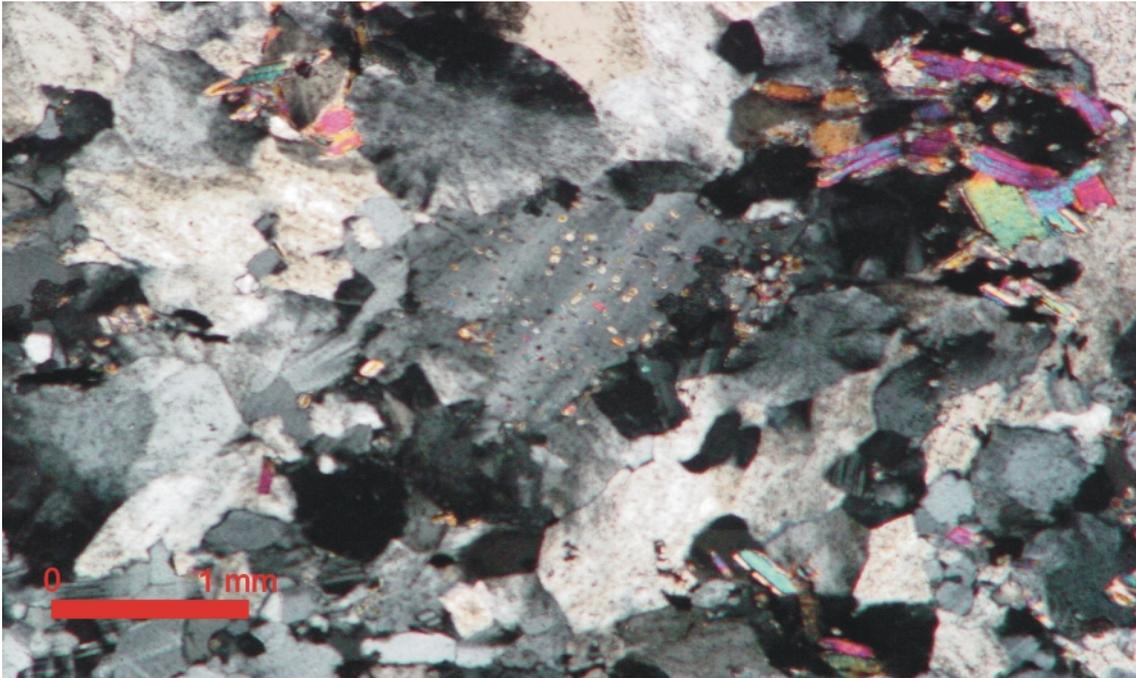
**Fotografia 5.6.** Fotografia do afloramento do Granito El Refugio (BO-03-12).



**Fotografia 5.7.** Afloramento do Granito isotrópico El Refugio (BO-03-012).

O plagioclásio ocorre de forma tabular com maclas polissintéticas, apresentando inclusões de agulhas de muscovita e epidoto. Os acessórios estão representados por zircões que aparecem à maneira de inclusões nas micas e minerais opacos.

Por último observaram-se as inclusões de minerais secundários como muscovita e epidoto, que se apresentam restritos nos plagioclásios, exceto as muscovitas que também aparecem em formas de agulhas com bordas corrosivas e fortes cores de interferências. Com todos os dados, esta rocha é classificada como um granito (Fotografia 5.9).



**Fotomicrografia 5.8.** Amostra BO-03-012 do granito El Refugio, cujos plagioclásios apresentam inclusões de agulhas de muscovita, acompanhadas de epidoto, objetiva 2.5 x, nicóis (x).

#### 5.4.3 Granito San Ramón (BO-03-14)

A oeste da cidade de Santo Ramón e na estrada em direção a cidade de Santa Cruz, encontra-se o granitóide Santo Ramón (BO-03-14). Nas amostras de mão se observou que esta rocha apresenta uma coloração cinza, de granulometria média, parcialmente foliado, com quartzo, K-feldspato e biotita.

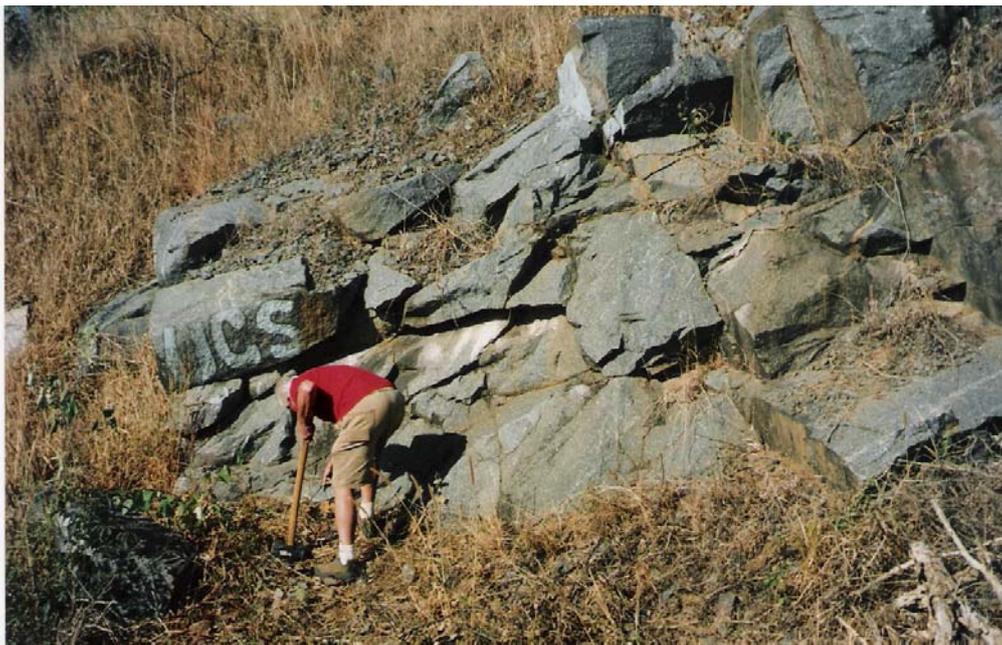
Em descrições microscópicas se identificou a presença de quartzo (31%), microclina (24%), plagioclásio (20%), ortoclásio (2%), biotita (10%), piroxênio (12%), minerais acessórios (2%) e minerais secundários (1%), composição que permitiu classificar como um granito.

Os fenocristais que abundam na rocha são microclinas, seguidas por plagioclásios e quartzos em menores proporções. Os dois primeiros minerais apresentam zonação normal e o quartzo apresenta-se com bordas suturadas e não fraturados.

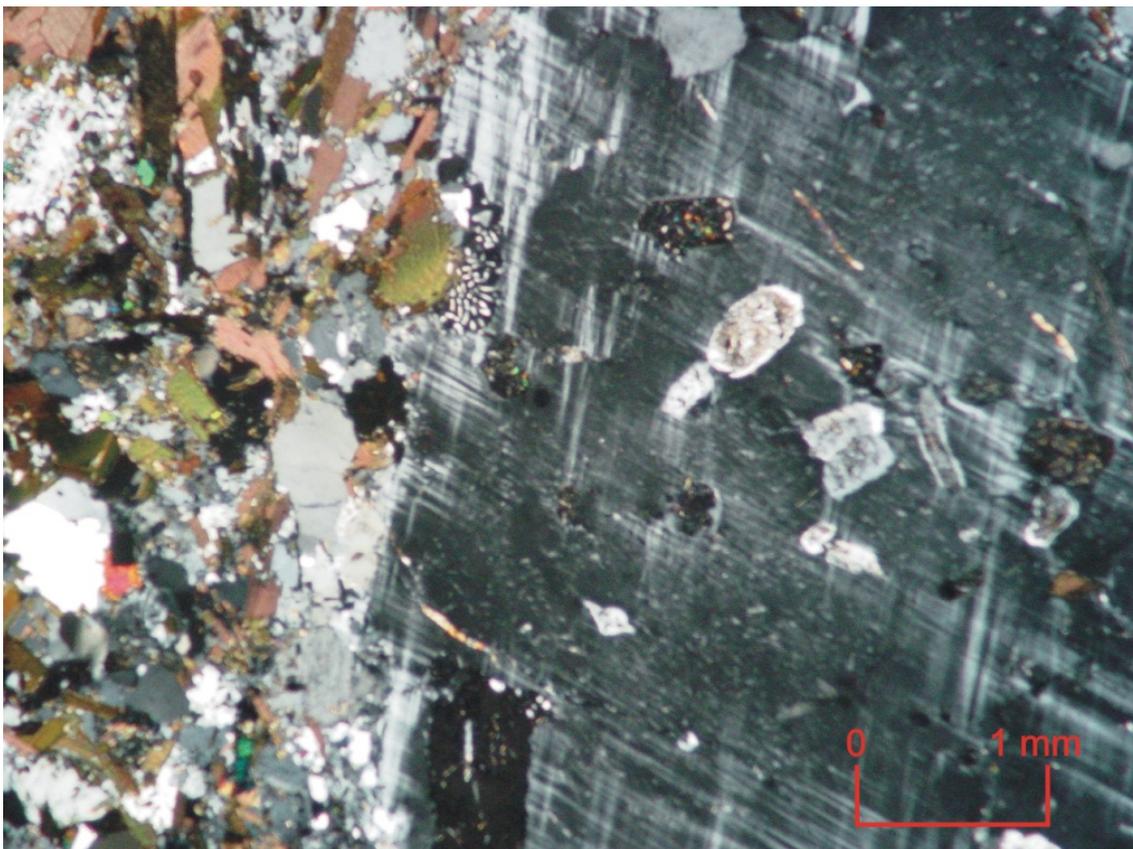
A microclina se observa com inclusões de agulhas de muscovita e também como inclusões nos plagioclásios.

O plagioclásio variedade oligoclásio ( $An_{5.6-6}$ ), apresenta zonação normal, com inclusões de muscovita e epidoto. O ortoclásio aparece de forma subédrica, limpa e não fraturado.

Os minerais máficos estão representados por biotita e piroxênio variedade augita, ambos com inclusões de apatita e zircão. A biotita apresenta cloritização e o piroxênio encontra-se maclado segundo a lei de Carlsbad.



**Fotografia 5.8.** Visão geral do afloramento do Granito San Ramon (BO-03-14), a 1km da localidade do mesmo nome, pela rodovia para Santa Cruz. Servindo como escala o Dr. Orestes Santos.



**Fotomicrografia 5.10.** Amostra BO-03-014 do granito San Ramón mostrando o fenocristal de microclina com inclusões de quartzo, plagioclásio e epidot. Nas bordas do fenocristal mirmequitas, quartzos e biotitas em menor tamanho, objetiva 2.5 x, nicóis (x).

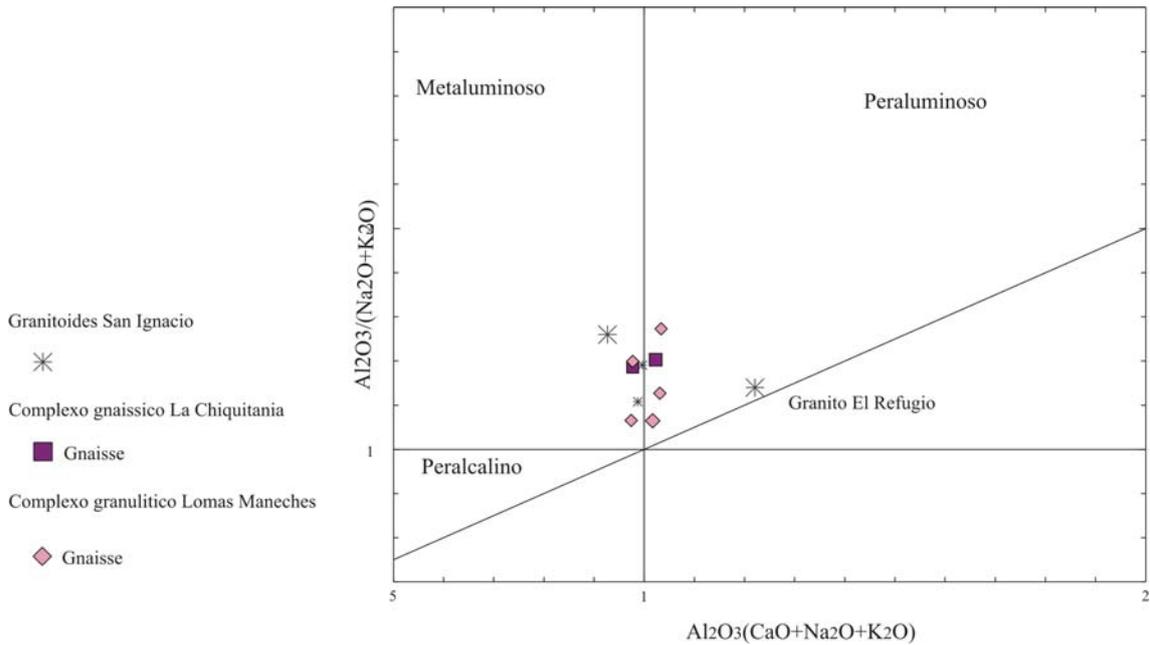
## 5.5 Geoquímica

A partir dos estudos petrográficos tomaram-se 12 amostras para análises geoquímicas dos complexos Lomas Maneches, La Chiquitania e os granitóides San Ignacio. As amostras foram analisadas segundo os métodos descritos no Capítulo 2. Os dados foram tratados mediante o programa NEWPET e são apresentados a seguir.

### 5.5.1. Classificação com base na saturação de alumina

Um dos critérios válidos na classificação química das rochas é mediante a saturação de alumina, com base nas proporções moleculares e dadas pela relação  $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O + CaO) : Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$  todos óxidos expressos em proporções molares. Conhecida de maneira abreviada como A/CNK, esta proposta foi apontada por Shand (1927) em homenagem ao famoso petrólogo que contribuiu para o desenvolvimento do conceito de alumina-saturação. Esta teoria divide as rochas em três grupos: uma rocha é peraluminosa quando  $A/CNK > 1$ , metaluminosa quando  $A/CNK = 1$  e peralcalino quando  $A/CNK < 1$ .

As amostras analisadas correspondem aos ortognaisses de composição granítica Lomas Maneches, ortognaisse La Chiquitania e granitóides San Ignacio. Estas amostras quando lançadas no diagrama  $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$  versus  $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$  caem em dois campos distintos. As amostras do Lomas Maneches e do Chiquitania variam de metaluminosa à debilmente peraluminosa (Figura 5.1). As amostras de granitoides San Ignacio também variam desde metaluminosas a debilmente peraluminosas, salvo o Granito El Refugio que se apresenta com um comportamento peraluminoso .



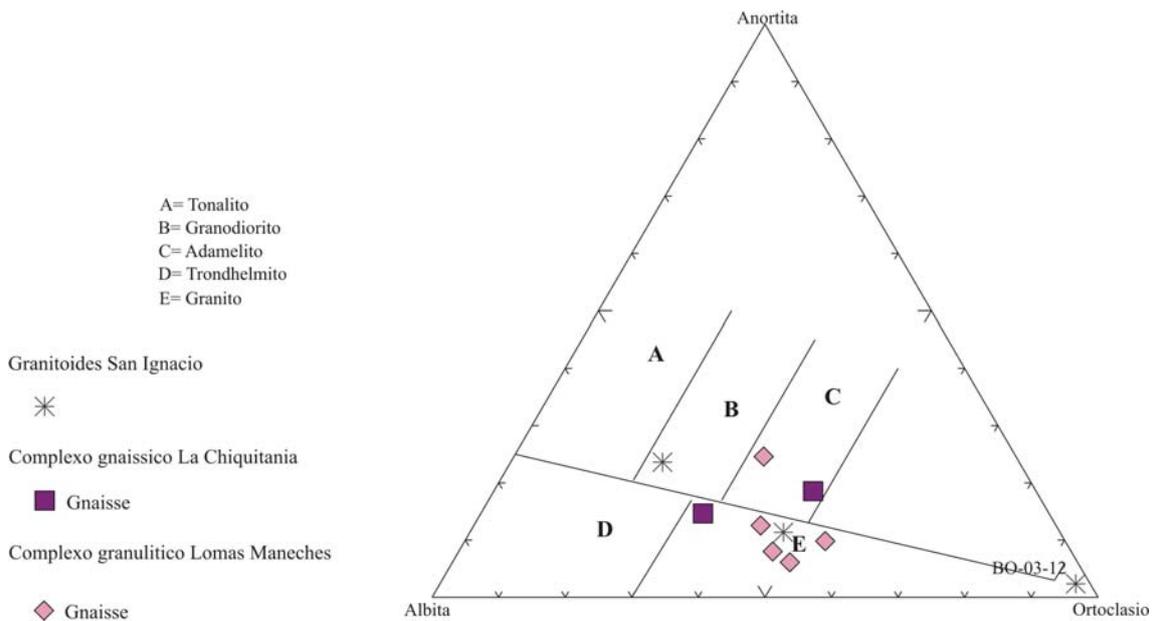
**Figura 5.1.** Diagrama proposto por Shand (1927, 1943), que mostra a saturação de alumina das unidades do embasamento.

### 5.5.2. Classificação em função da Norma

A classificação, tomando-se em conta a relação Albita-Anortita-Ortoclásio, proposta por O'Connor em 1965, se torna aplicável a rochas com composição acima de 10% do quartzo normativo. Segundo Rollinson (1993) este diagrama ternário representa uma projeção do quartzo sobre a fase feldspática do tetraedro.

Neste trabalho as rochas da unidade Lomas Maneches apresentam uma composição granítica a adamelítica.

As rochas que pertencem ao Complejo gnáissico La Chiquitania apresentam uma composição granítica e os granitóides San Ignacio variam de granito a granodiorito salvo a amostra BO-03-12 do Granito El Refugio que se encontra fora dos parâmetros de classificação apresentando uma porcentagem anômala de K-feldspatos (Figura 5.3).



**Figura 5.2.** Classificação das rochas do embasamento, mediante a composição normativa An-Ab-Or, proposta por O' Connor (1995).

### 5.5.3 Ambientes Tectônicos

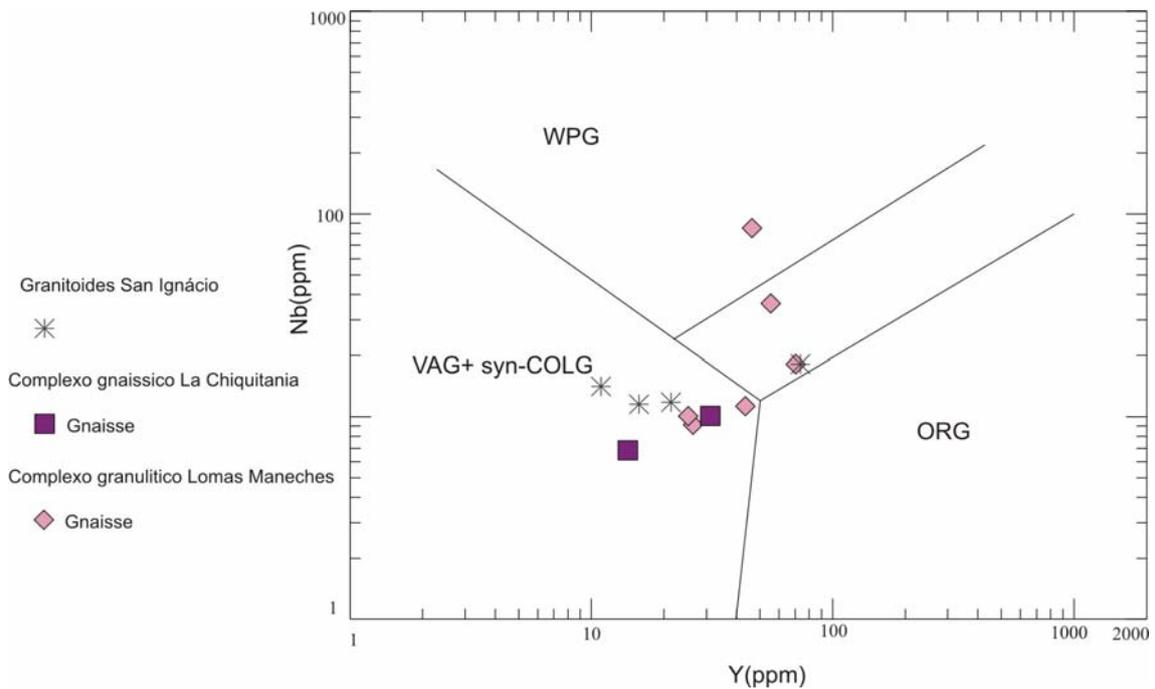
Pearce *et al.* (1984) sugerem diagramas discriminantes como um meio de interpretação tectônica, a partir de uma base de dados de 600 análises químicas de elementos maiores e elementos traços em amostras provenientes de ambientes conhecidos, podendo-se demonstrar que a maior parte dos granitos exibe conteúdo de elementos traços representativos. Os elementos traços usados são Rb, Y, Nb e Rb-Yb-Ta, sobre projeções de Y, Nb, Y-Ta, Rb-(Y+Nb) e Rb-(Yb+Ta)

Na classificação dos diagramas propostos por Pearce *et al.* (1984), as rochas podem ser formadas nos seguintes ambientes tectônicos: ORG (granitos de cordilheiras oceânicas), mais conhecidos como plagiogranitos oceânicos, subdivididos nos grupos tipo N-MORB (normal), tipo E, T- MORB (anômalos) e tipo SSZ de for-arc. Nestas rochas a hornblenda é o mineral ferro-magnésiano dominante. Outro ambiente é denominado de **VAG** (granitos de arco vulcânico). Estas intrusões vão de calcioalcalinas a alcalinas ou calcioalcalinas com elevado conteúdo de K. Estas rochas são interpretadas como produto de uma subducção, como a Cordilheira dos Andes. Podem ser

subdivididas em ambientes oceânicos (de arcos toleíticos a calcioalcalinos) e continental (de margem continental ativa que vai de composição toleítica a shoshonítica). Em adição é proposto o **WPG** (granitos de intraplaca). Estas granitos podem ser subdivididos em intracontinental, crosta continental atenuada e intraoceânica. Por fim tem-se o **COLG** (granitos colisionais). Estes granitos de colisão podem ser subdivididos de acordo com o tipo de colisão (continente- continente, continente-arco e arco-arco) e de acordo com a relação temporal, como o evento de maior deformação (sin-colisional e post-colisional). A maior parte dos dados obtidos foi sobre a base dos cinturões Hercínicos, Himalaianos e Alpinos.

Aplicando-se os diagramas com base na relação Nb (ppm)-Y(ppm), pode-se observar que as rochas da unidade Lomas Maneches encontram-se no campo de arco vulcânico, com exceção dos gnaisses Lomas Maneches (BO-03-007, BO-03-008, BO-03-018), que se apresentam como rochas geradas em um ambiente de intra-placa. Os gnaisses La Chiquitania encontram-se em um ambiente de arco vulcânico e o granitóides San Ignacio também (BO-03-012, BO-03-14), com exceção do Granito San Andrés (BO-03-010) que aparentemente foi gerado em um ambiente de intra-placa. (Figura 5.4).

O diagrama tectônico em função do Rb (ppm) e Y+Nb (ppm) mostra um comportamento similar ao da figura anterior, isto é, as rochas do embasamento encontram-se na parte central do diagrama (Figura 5.8), menos o enderbito do Complexo granulítico Lomas Maneches, pois eles se encontram em um ambiente de arco vulcânico (VAG).

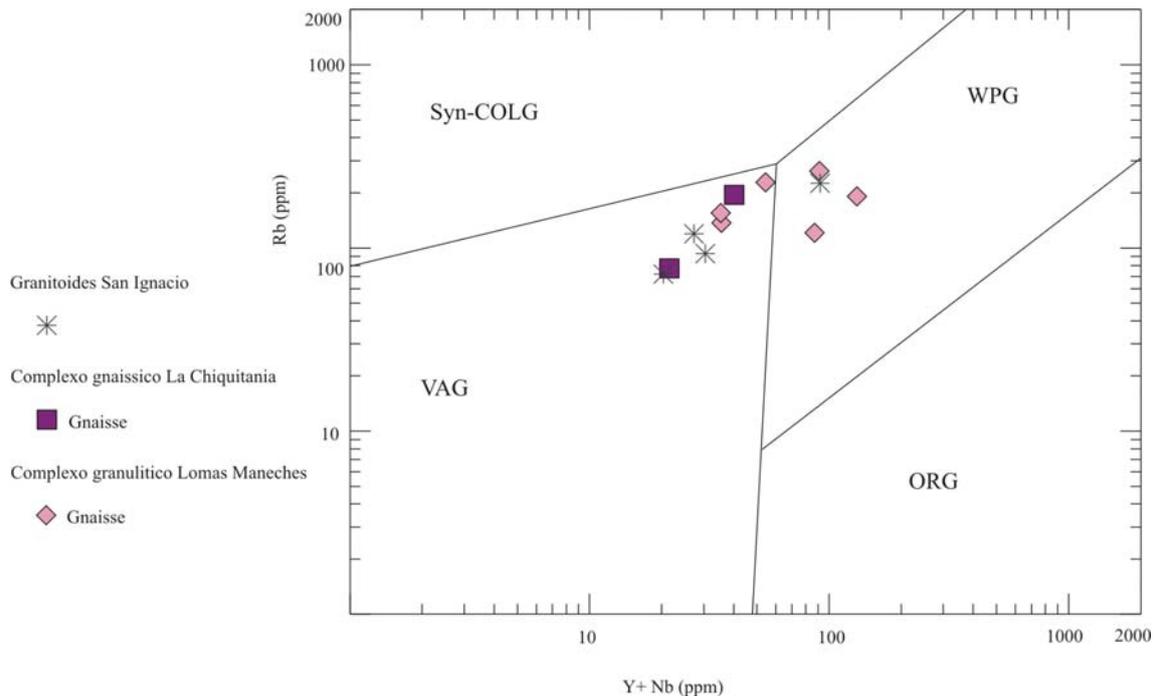


**Figura 5.3.** Diagrama tectônico em função do Y(ppm) e Nb (ppm), mostrando um ambiente sin-colisional (syn-COLG), granitos de intra-placa (WPG), granitos de arco vulcânico (VAG) e granitos de Cordilheira oceânica (ORG), desenvolvidos por Pearce *et al.* (1984).

Outro diagrama apresentado neste trabalho é o diagrama tectônico também desenvolvido por Pearce *et al.* (1984), cuja discriminação tectônica é baseada no conteúdo de Rb (ppm) e Y+Nb (ppm).

Nesta ocasião o comportamento é similar ao da figura anterior, isto é, as rochas do embasamento aparentemente encontram-se geradas em dois ambientes (arco vulcânico e intra-placa), descrita a seguir: os gnaisses e o enderbito da unidade Lomas Maneches caem no campo de arco vulcânico, salvo as amostras BO-03-07, BO-03-08 e BO-03-18 que encontram-se num ambiente de intra-placa.

As rochas da unidade La Chiquitania e os granitoides San Ignacio encontram-se no campo de arco vulcânico, com exceção do Granito San Andrés que se encontra no campo de intra-placa (Figura 5.4)



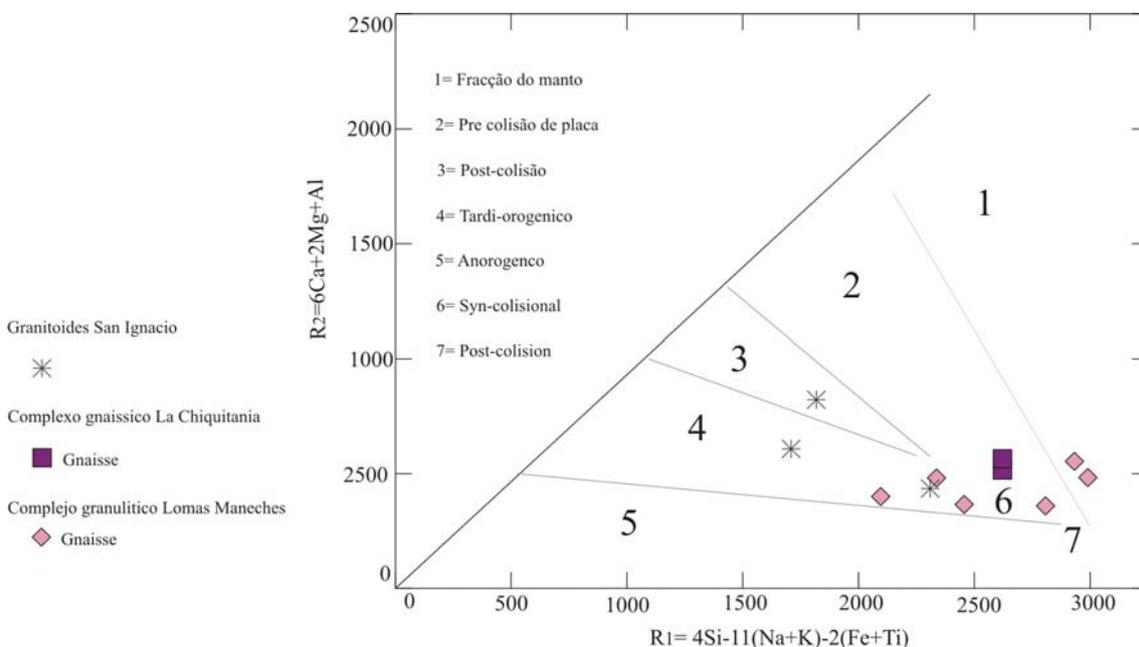
**Figura 5.4.** Diagrama tectônico em função do Rb (ppm) e Y+Nb (ppm), mostrando um ambiente sin-colisional (syn-COLG), granitos de intraplaca (WPG), granitos de arco vulcânico (VAG) e granitos de Cordilheira oceânica (ORG), desenvolvidos por Pearce *et al.* (1984).

Outro método de classificação química foi proposto por De la Roche *et al.* (1980) é aplicável a rochas vulcânicas e plutônicas. Esta caracterização foi proposta com base na proporção de cátions (milications). Os resultados são traçados em um gráfico binário X-Y, usando os parâmetros R1-R2, sendo que R1 é desenhado no eixo X e é definido como  $R_1 = [4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)]$  onde Fe representa o ferro total.

R<sub>2</sub> é lançado no eixo Y e é definido como  $R_2 = (Al + 2Mg + 6Ca)$ . As vantagens desta classificação, segundo Rollinson (1993), são: 1) os elementos maiores são utilizados como parâmetros nesta classificação, 2) o esquema é suficientemente geral para se aplicar a todo tipo de rochas ígneas, 3) a composição dos minerais pode ser delineada no diagrama, seguindo uma ampla comparação entre os dados químicos e modais e 4) a diminuição da saturação de sílica e a troca dos feldspatos em composição podem ser detectadas.

Batchelor & Bowden (1985) empregaram este diagrama em estudos petrogenéticos de rochas granitóides, onde consideraram dois mecanismos possíveis para a formação dos magmas. Os mecanismos foram 1) fusão parcial, 2) cristalização fracionada, a partir de álcali basalto, basalto com alto valor em alúmina e basalto toleítico e 3) mistura de magmas.

A Figura 5.5 mostra o lançamento dos valores de  $R_1$  e  $R_2$  para os resultados químicos dos enderbitos e gnaisses Lomas Maneches e indica que foram gerados em um ambiente tardi-orogênico, salvo a amostra BO-03-003, que cai no campo de origem mantélica. As mostras BO-03-002 e BO-03-005 posicionam-se no campo de plágio-granitos. Os ortogneisses La Chiquitania foram produto de um magmatismo de margem ativa. Os granitos do evento San Ignacio podem ser interpretados como gerados em ambientes post-colisionais a post-orogênicos. Estas rochas apresentam composição que indicam serem formadas em processos de colisão de placas, algumas amostras de origem manto-derivadas e também amostras formadas em ambientes que variam desde post-orogênicos a post-colisionais, não significando necessariamente que tenham sido formadas em um mesmo período de tempo.



**Figura 5.5** Visualização do diagrama multicatiônico de Batchelor & Bowden (1985) mostrando a disposição das rochas do embasamento e dos granitoides San Ignacio.

## **5.6. Classificação tomando-se como base os Elementos Terras Raras**

### **5.6.1 Terras raras para as rochas da unidade Lomas Maneches**

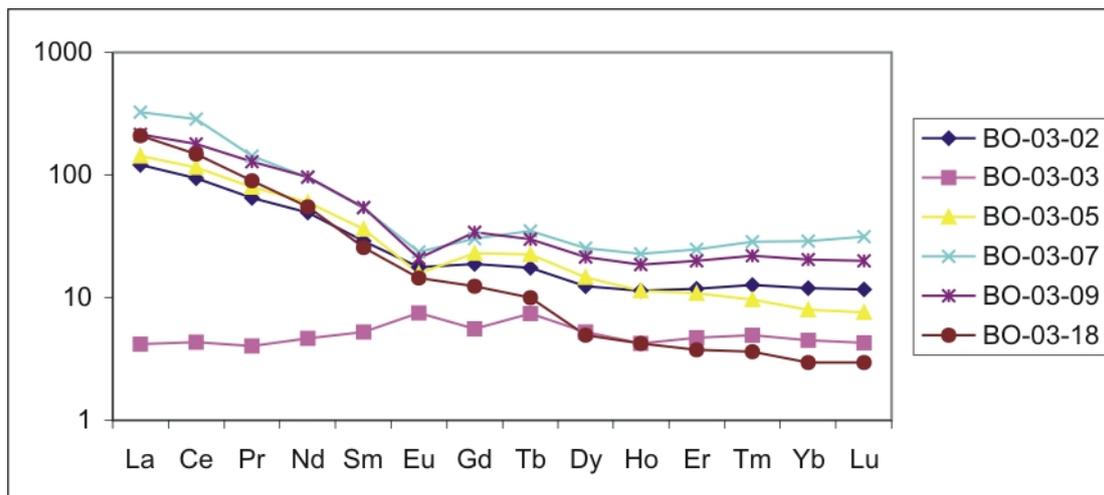
Com o objetivo de se determinar as possíveis fontes e processos de solidificação magmática foram analisados os elementos terras-raras (ETR) das unidades Lomas Maneches, do La Chiquitania e dos granitos do evento San Ignacio.

Segundo Valente (2000) existe uma maneira prática e eficaz na hora de estudar a fonte de rochas magmáticas através dos chamados diagramas de variação multi-elementares, onde são lançados os elementos traços. Um caso específico destes diagramas é aquele em que são lançados apenas os ETR, como apresentado a seguir.

Nos diagramas de Elementos Terras Raras (ETR), as composições das amostras representativas de suíte magmática são normalizados pela composição de um padrão escolhido, os quais podem ser: condrito, manto primitivo ou MORB. Segundo Rollinson (1995), estes padrões dos ETR são controlados pela química da fonte e do equilíbrio fundido-sólido no magma durante o processo de cristalização.

Na Figura 5.6, são apresentados os padrões dos ETR para as amostras da unidade Lomas Maneches. A amostra BO-03-03 apresenta uma inclinação positiva suave na porção dos ETR leves até o Eu onde se apresenta uma leve anomalia positiva, provavelmente devido à concentração de minerais félsicos com Ca, como o plagioclásio. Na porção dos ETR pesados, o padrão é horizontalizado. Este padrão de ETR para a amostra de enderbita pode ser comparado aos padrões de rochas mantélicas ou mantoderivadas, sugerindo esta fonte para esta amostra.

As amostras restantes apresentam padrão de ETR equivalente com inclinação dos ETR leves (indicando o enriquecimento destes), anomalia negativa de Eu e leve inclinação nos ETR pesados, sugerindo um processo de fracionamento magmático para a geração destas rochas.

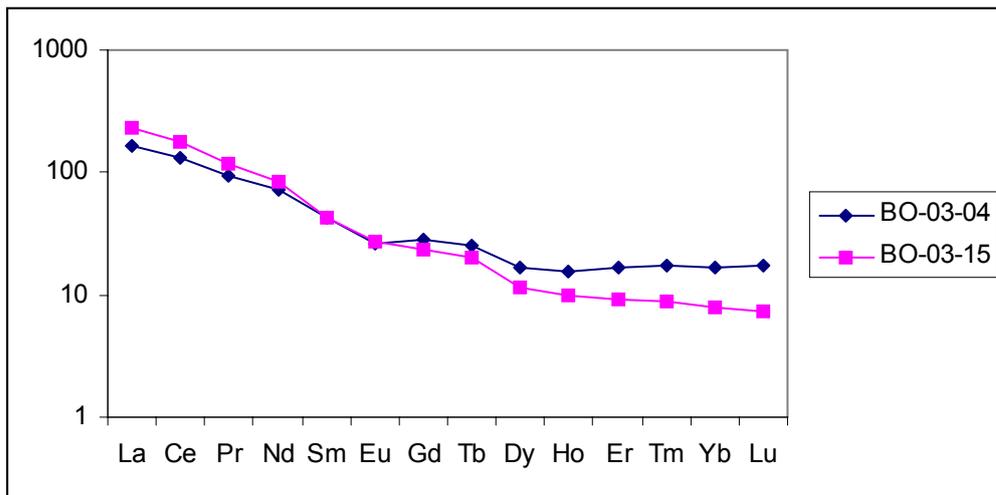


**Figura 5.6. Padrão de terras-raras da unidade Lomas Maneches do pré-cambriano Boliviano, normalização pelo Condrito segundo Boynton (1984).**

### 5.6.2 Terras raras para as rochas da unidade La Chiquitania

As rochas da unidade La Chiquitania apresentam dois padrões equivalentes onde se pode observar a inclinação positiva, nos ETR leves, anomalia negativa de Eu não significativa e inclinações levemente positivas nos ETR pesados, para a amostra BO-03-04 ou horizontalizadas, para a amostra BO-03-15 (Figura 5.7).

A amostra BO-03-15 foi definida pela petrografia como uma rocha granítica possivelmente ortoderivada. Já a amostra BO-03-04 apresenta granada, o que pode sugerir uma origem metassedimentar. Porém os padrões de ETR equivalentes para as amostras BO-03-15 e BO-03-04 sugerem uma fonte única. Desta forma, a partir da petrografia e dos resultados geoquímicos é sugerido uma ortoderivação para as duas amostras.



**Figura 5.7.** Padrão de terras-raras da unidade gnaiss La Chiquitania do pré-cambriano Boliviano, normalização pelo Condrito segundo Boynton (1984).

### 5.6.3 Terras raras para as rochas da orogenia San Ignacio

As amostras graníticas geradas no evento San Ignacio apresentam dois padrões distintos de ETR. O primeiro, exemplificado pelas amostras BO-03-14 (Granito San Ramón) e BO-03-16 (Migmatito San Javier), apresenta uma leve inclinação para os ETR leves e nos ETR pesados observa-se uma leve horizontalização. Em adição estas duas amostras não apresentam anomalia negativa de Eu.

No segundo padrão de ETR dos granitos San Ignacio, para as amostras BO-03-10 (Granito San Andrés) e BO-03-12 (Granito El Refugio), observa-se uma inclinação maior para os ETR leves, uma anomalia negativa de Eu e os ETR pesados apresentam um padrão horizontalizado. Estes resultados sugerem a existência de dois grupos de rochas que podem ter fontes diferentes ou passado por processos de fracionamento diferentes (Figura 5.8).

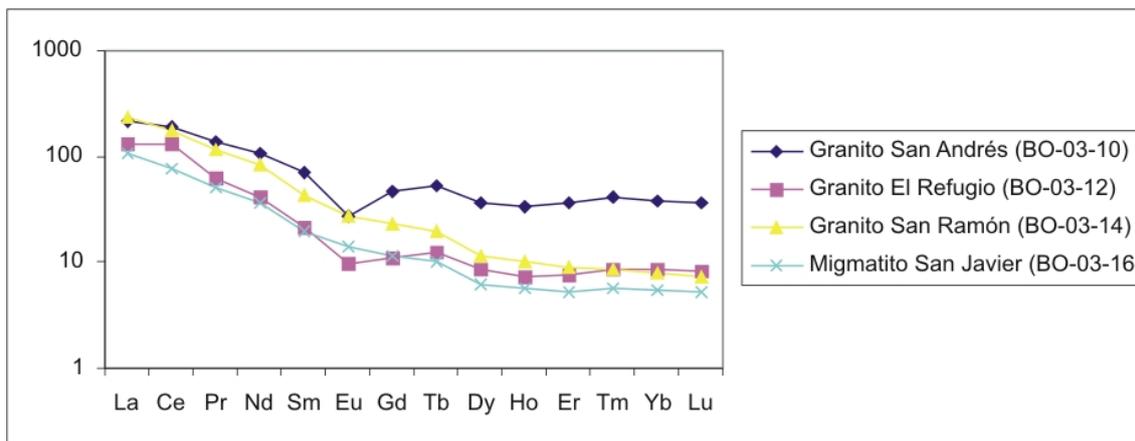


Figura 5.8. Padrão de terras raras da Orogenia San Ignacio do pré-cambriano Boliviano, normalização pelo Condrito segundo Boynton (1984).

## 5.7 Discussão dos resultados

Neste item serão discutidos os resultados obtidos a partir dos estudos petrográficos e geoquímicos apresentados nos itens anteriores. As rochas das unidades Lomas Maneches e La Chiquitania foram agrupadas como embasamento segundo Litherland *et al.* (1986) e Boger *et al.* (2005). Não obstante neste momento serão discutidas isoladamente, uma vez que ainda não existe uma idade definida para os ortognaisses La Chiquitania,

Tanto a petrografia quanto os diagramas de classificação geoquímica concluem os gnaisses Lomas Maneches apresenta uma composição ácida a intermediária. As rochas podem variar desde granito (dados da petrografia) até adamelito (segundo a composição química). Uma amostra de composição básica é caracterizada na petrografia devido à abundância de plagioclásios cálcicos. A química desta amostra (BO-03-03) revela uma composição enderbítica devido ao conteúdo de CaO (11,36 %).

A unidade La Chiquitania apresenta uma composição granítica confirmada tanto na petrografia, quanto no diagrama classificatório (QAP), quanto na classificação mediante a composição normativa proposta por O'Connor (1995) e observada na Figura 5.2.

Tomando em conta a composição das rochas as unidades Lomas Maneches e La Chiquitania em conjunto, pode-se sugerir que elas são representantes de uma suíte calcioalcalina.

A discriminação de ambientes tectônicos com base no conteúdo das variações  $R_1$  versus  $R_2$  não se encontra clara para o embasamento, uma vez que as amostras aparecem em três campos (mantélico, pré-colisão e tardi-orogênico). No diagrama Rb *versus* Y+Nb as amostras aparecem no campo de arco magmático e de intra-placa. No diagrama Nb *versus* Y a maioria das amostras aparecem no campo de arco magmático, porém três amostras estão no campo de intra-placa. E por isso que tomando como base a petrografia e os dados da geoquímica pode-se sugerir que as rochas da unidade Lomas Maneches foram geradas em um ambiente de arco magmático produto de uma subducção.

Outro parâmetro que pode ser avaliado é a caracterização da fonte geradora de magmas a partir dos diagramas de variação multi-elementares com ETR. Neste sentido, o enderbito Lomas Maneches pode ser comparado aos padrões de rochas manto-derivadas e os gnaisses Lomas Maneches sugerem serem produto de um processo de fracionamento magmático. Não obstante, a unidade La Chiquitania, na área de estudo, pode ser caracterizada como ortoderivada e, juntamente com a unidade Lomas Maneches, pode ser proposta uma origem manto-derivada para ambas.

Seguindo o tempo geológico, foi registrada a Orogenia San Ignacio, resultando volumosas unidades graníticas cartografiadas por Litherland *et al.* (1986). Tanto a petrografia, quanto a classificação química permite sugerir que esta orogenia produziu magmas de uma composição intermediária desde granitos a granodioritos, sugerindo uma suíte calcioalcalina, salvo o Granito El Refugio que ao longo da classificação apresenta incompatibilidades com o restante das amostras, tanto na determinação do índice de aluminisidade, quanto no diagrama normativo proposto por O'Connor (1965).

Com base na discriminação tectônica, as rochas da Orogenia San Ignacio caem tanto em ambientes de intra-placa, arco vulcânico, quanto gerados em ambientes post-colisional a post-orogênicos. Estes diagramas não permitem uma associação clara, mais podem ser interpretados de forma que os granitos foram gerados em ambientes convergentes pré a sin-colisionais.

Segundo ainda os ETR foi possível caracterizar a existência de dois grupos de rochas que passaram por processos de fracionamento diferentes.

A partir dos dados petrográficos, geoquímicos e da literatura, pode-se sugerir que as rochas da Orogenia San Ignacio aqui estudadas foram geradas em ambiente de arco magmático continental, onde a crosta sílica mais antiga pode ser representada pelas rochas das Unidades Lomas Maneches e La Chiquitania.