

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Geologia e gênese dos depósitos de Zn-Pb de Shalipayco e
Florida Canyon, centro-norte do Peru**

SAULO BATISTA DE OLIVEIRA

Orientador: Prof. Dr. Caetano Juliani

Tese de Doutorado

Nº 595

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Caetano Juliani

Dr. Peter Szatmari

Dr. Paulo César Boggiani

Dr. Nilson Francisquini Botelho

Dr. Rafael Rodrigues de Assis

SÃO PAULO
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a) via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação: Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

De Oliveira, Saulo Batista

Geologia e gênese dos depósitos de Zn-Pb de Shalipayco e Florida Canyon, centro-norte do Peru / Saulo Batista de Oliveira; orientador Caetano Juliani. -- São Paulo, 2018.

154 p.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia) -- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2018.

1. Florida Canyon. 2. Shalipayco. 3. Depósitos Mississippi Valley-type. 4. Grupo Pucará. 5. Evaporitos. I. Juliani, Caetano, orient. II. Título.

Resumo

De Oliveira, S.B., 2018, Geologia e gênese dos depósitos de Zn–Pb de Shalipayco e Florida Canyon, centro-norte do Peru, Tese de doutorado, São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 154 p.

As mineralizações *Mississippi Valley-type* (MVT) dos depósitos de Zn–Pb de Shalipayco no centro do Peru e de Florida Canyon no norte do Peru, separados por centenas de quilômetros e hospedados na mesma sequência de rochas carbonáticas e evaporíticas de mais de mil quilômetros de extensão motivaram diversos questionamentos que vieram a compor esta tese. As questões fundamentais em que se basearam esta pesquisa são quais as possíveis conexões genéticas entre esses depósitos e como elas se relacionam com a evolução da bacia de Pucará. Assim o estudo enfoca os processos pré-, pós- e formadores do minério ocorrentes em ambos os depósitos, a idade das mineralizações, os controles estruturais e litológicos destas mineralizações, e as implicações para descoberta de novos depósitos neste contexto geológico. Estudos petrográficos, paragenéticos e de caracterização mineralógica, apoiados por análises isotópicas de carbono, oxigênio e estrôncio nos carbonatos e de enxofre, rubídio-estrôncio e chumbo-chumbo nos sulfetos permitiram identificação de fontes do fluido, de enxofre e de metal para mineralizações, a caracterização dos processos de interação fluido-rocha, das condições físico-químicas e dos mecanismos de deposição dos minérios nos depósitos de Florida Canyon e Shalipayco. As mineralogias de minério compostas por esfalerita, galena e pirita são as mesmas nos dois depósitos ocorrendo hospedadas em rochas denominadas dolomito poroso ou brecha dolomítica evaporítica. Estas rochas formam estratos permeáveis e porosos bem definidos, interpretados como fácies de ambiente deposicional sabkha intercalados em calcários finos da sequência do Grupo Pucará de idade Triássico Inferior a Jurássico Superior. Estes estratos originalmente de evaporitos provavelmente se tornaram dolomitos de granulação grossa durante diagênese de soterramento. Estes processos modificaram drasticamente as rochas originais e geraram porosidade e permeabilidade que tornaram estas rochas excelentes hospedeiras de hidrocarbonetos e mineralizações sulfetadas de Zn e Pb. Poros preenchidos por betume foram posteriormente preenchidos por esfalerita e galena e finalmente selados por dolomita tardia. Isótopos de carbono, oxigênio e estrôncio e imagens de catodoluminescência suportam a distinção de carbonatos de diagênese precoce, de diagênese de soterramento e tardios associados aos sulfetos de Zn e Pb, tanto em Florida Canyon quanto em

Shalipayco. Os isótopos de enxofre indicam mistura de fontes de enxofre reduzido (BSR, TSR e/ou degradação térmica de matéria orgânica) que teriam se acumulado nos estratos de dolomito poroso e de brecha evaporítica. A mineralização MVT é posterior à migração e acumulação de óleo, e ambas ocorrem nas mesmas rochas do Grupo Pucará. O reconhecimento de mesmas rochas hospedeiras, mesma mineralogia e em mesma paragênese, condicionada por mesmos controles estruturais nos depósitos de Shalipayco e Florida Canyon permitiu assumir mesmos processos atuantes na Bacia Pucará. Foi possível associar estes processos geradores de rocha, de estruturas, de fluidos mineralizantes e de migração destes fluidos aos principais eventos tectônicos descritos na literatura para evolução Andina peruana. A estrutura dômica de Florida Canyon provavelmente se formou por halocinese durante a orogênese Juruá (157–152 Ma); a migração de hidrocarbonetos deve ter ocorrido durante o evento Mochica (100–95 Ma); e as mineralizações MVT de Zn–Pb de Shalipayco e Florida Canyon provavelmente sincrônicas, devem ter ocorrido durante ou logo após a orogênese Peruvian (86–83 Ma). Em Florida Canyon a mineralização supergênica de Zn é dada por smithsonita, hemimorfita e goethita, tendo sido gerada predominantemente por substituição direta da mineralização hipogena. Por correlação com as mineralizações zincíferas supergênicas da Mina Grande e Cristal no mesmo distrito de Bongará, pode-se atribuir a idade do Mioceno superior à de Florida Canyon.

Palavras-chave: Florida Canyon, Shalipayco, Depósitos Mississippi Valley-type, Grupo Pucará, Evaporitos

Abstract

De Oliveira, S.B., 2018, Geology and genesis of the Zn-Pb deposits of Shalipayco and Florida Canyon, central-northern Peru, PhD thesis, São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 154 p.

The Mississippi Valley-type (MVT) Zn-Pb deposits of Shalipayco in central Peru and Florida Canyon in northern Peru are separated by hundreds of kilometers and hosted in the same sequence of carbonate and evaporite-bearing rocks that span more than thousand kilometers in the Pucará basin motivated several questions that came to compose this thesis. Fundamental questions that underpin the research of this study are what are the possible genetic connections between these deposits and how do they related to the evolution of the Pucará basin. This study focuses on the investigation of the pre-, post- and ore-forming processes that occurred in both deposits; the age of the ore forming events; the structural and lithological controls on mineralization; and the implications for the discovery of new deposits in the basin. Petrographic, paragenetic and mineralogical studies supported by isotopic analyzes of carbon, oxygen and strontium in carbonates and sulfur, rubidium-strontium and lead-lead in the sulfides allowed the identification of possible fluid, sulfur and metal sources for mineralization, characterization of the rock-fluid interaction processes, physicochemical conditions and ore deposition mechanisms in the Florida Canyon and Shalipayco deposits. The sphalerite, galena and pyrite mineral assemblages are the same in the two deposits and occurs in porous dolostone or evaporite dolomitic breccia. These rocks form well-defined porous and permeable strata interpreted as depositional sabkha facies intercalated with fine limestones of the Pucará Group sequence from the Lower Triassic to the Upper Jurassic. These former evaporite-bearing strata were probably altered to coarse-grain dolomite during burial diagenesis. These processes drastically modified the original rocks and generated porosity and permeability that made these rocks an excellent host for hydrocarbons and Zn and Pb mineralization. Pores filled with bitumen were later filled by sphalerite and galena and finally sealed by late dolomite. Carbon, oxygen and strontium isotopes and cathodoluminescence images support the distinction between carbonates from early diagenesis, burial diagenesis, and late Zn and Pb mineralization, both in Florida Canyon and in Shalipayco. The sulfur isotopes indicate a mixture of reduced sulfur sources (BSR, TSR and/or possibly thermal cracking of organic matter) that would have accumulated in the porous dolomite and evaporite breccia strata interpreted as sabkha facies.

The MVT mineralization occurred after the migration and accumulation of oil, in the same Pucará Group host rocks. The recognition of same host rocks, mineralogy and paragenesis, and same structural controls in the Shalipayco and Florida Canyon deposits suggests that the same processes of diagenesis and mineralization occurred on a basin-scale. It is possible to associate these processes of rock diagenesis, development of structural features and the generation and migration of the mineralizing fluids to the main tectonic events of the Peruvian Andean evolution. The Florida Canyon dome probably involved halokinesis during the Juruá orogeny (157-152 Ma). The migration of hydrocarbons probably occurred during the Mochica event (100-95 Ma) and the Shalipayco and Florida Canyon Zn-Pb MVT mineralization probably occurred during or just after the Peruvian orogeny (86-83 Ma). The supergene Zn mineralization in Florida Canyon deposit consists of smithsonite, hemimorphite and goethite which formed by direct replacement of hypogene sulfide mineralization. Supergene zinc mineralization in the Mina Grande and Cristal deposits in the Bongará district, occurred during the late Miocene, which may have also account for the supergene ores at the Florida Canyon deposit.

Keywords: Florida Canyon, Shalipayco, Mississippi Valley-type deposits, Grupo Pucará, Evaporites

1 Introdução

A gênese de depósitos de Zn–Pb hospedados em rochas carbonáticas, denominados depósitos *Mississippi Valley-type* (MVT), tem intrigado diversos autores nas últimas décadas. Muito se avançou desde as primeiras descrições (Bastin, 1939) mas ainda existem muitas questões em aberto quanto a formação destes depósitos. A presente tese estudou dois depósitos de Zn–Pb denominados Florida Canyon e Shalipayco, hospedados na mesma sequência de rochas carbonáticas e evaporíticas do Grupo Pucará do Jurássico–Triássico, mas distando centenas de quilômetros entre si, localizados, respectivamente, nas regiões norte e central do Peru. Ambos os depósitos apresentam diversas características muito semelhantes às descritas em outros depósitos MVT ao redor do mundo. Além disso, com os resultados das novas observações de campo e em testemunhos de sondagem, e de análises de geoquímica isotópica foram possíveis novas interpretações que diferem dos modelos clássicos até então propostos para a geração dos depósitos MVT. Também são discutidos e comparados nos dois depósitos e em escala regional, a relação entre os eventos e processos geológicos formadores das mineralizações e antecessores a esta, durante a diagênese.

Nos dois depósitos a empresa Nexa Resources (anteriormente Votorantim Metais) conduz trabalhos de Exploração Mineral desde meados dos anos 2008 até o presente, dispondo de um grande acervo de dados de sondagens diamantadas ao longo dos corpos de minério. A aplicação de estudos metalogenéticos aprofundando o conhecimento de depósitos minerais em estágio de exploração mineral tem cada vez mais apresentado importantes contribuições a descoberta de novos recursos minerais e para a melhor interpretação e modelagem dos corpos de minério conhecidos. Esta tese foi desenvolvida em estreita cooperação entre a Universidade de São Paulo, a Colorado School of Mines e a empresa Nexa Resources, onde o candidato também desenvolve atividades profissionais como geólogo de exploração mineral.

Objetivos

O presente trabalho de pesquisa tem como objetivo entender a gênese e evolução dos depósitos de Zn–Pb de Shalipayco e Florida Canyon hospedados nas sequências carbonáticas e evaporíticas do Grupo Pucará. Os seguintes questionamentos foram propostos no início deste trabalho:

i) Como se formaram os depósitos de Zn–Pb de Shalipayco e Florida Canyon? Qual a natureza dos fluidos, mecanismos de precipitação, e fonte de enxofre e de metais em cada um deles?

ii) Os mesmos processos pré-, pós- e formadores do minério ocorrem em ambos os depósitos?

iii) Ocorre apenas um evento mineralizantes ou mais de um? Qual a idade da mineralização em Shalipayco e Florida Canyon? As mineralizações destes dois depósitos são sincrônicas?

iv) Qual o contexto tectônico e a sua influência na formação dos depósitos MVT do Peru?

v) Quais os controles das mineralizações de Zn–Pb presentes no Grupo Pucará? Quais são as implicações para descoberta de novos depósitos neste contexto geológico?

Hipóteses

Durante o início da pesquisa as seguintes hipóteses foram consideradas:

i) Para depósitos MVT as possíveis fontes de enxofre comumente apontadas são: água do mar conata, matéria orgânica, evaporitos, reservatórios de gás H₂S e/ou sulfetos diagenéticos, (Leach *et al.*, 2005). Os principais mecanismos de precipitação dos sulfetos de zinco e chumbo normalmente são mistura de fluidos basinais e fluidos meteóricos ou interação fluido–rocha (Sverjensky, 1986). O enxofre pode ter origem no próprio local de precipitação de sulfetos ou ser transportado. Os metais sempre são transportados a partir de diferentes fontes crustais externas à sequência carbonática, não existindo uma rocha fonte específica para sua origem (Leach *et al.*, 2005).

ii) As observações de campo e descrições iniciais apontam muitas semelhanças entre os depósitos de Shalipayco e Florida Canyon. No entanto estes depósitos estão distantes aproximadamente mil quilômetros, e no distrito onde está localizado o depósito de Shalipayco, estão também presentes diversos outros depósitos de metais base relacionados a sistemas do tipo pórfiro e epitermal, levantando a hipótese de Shalipayco também ter uma possível origem magmática–hidrotermal, estando neste caso associado a um sistema do tipo *carbonate-replacement type* (CRD) (Megaw *et al.*, 1988).

iii) Os depósitos MVT mundialmente conhecidos apresentam idades em geral em dois grandes períodos da história geológica, durante o Paleozoico e entre o Cretáceo e o Neógeno

(Leach *et al.*, 2001). Depósitos MVT são epigenéticos por definição, com idades de formação variando de estágios diagenéticos iniciais a dezenas ou centenas de milhões de anos mais novos do que as rochas hospedeiras. A idade do Grupo Pucará é definida como do Triássico Superior a Jurássico Inferior pela presença de fósseis (Sanchez, 1995) e por idades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ em zircão de $201,58 \pm 0,17$ Ma em cinzas vulcânicas intercaladas as sequências carbonáticas (Schaltegger *et al.*, 2008). As relações de campo, como a ocorrência de mineralização de Zn–Pb posterior a sequências Cretáceas mais recentes que o Grupo Pucará na região de Bongará, próximo a localização de depósito de Florida Canyon, indicam idade mínima para a formação destes depósitos.

iv) A evolução tectônica dos Andes no Peru é dividida em três grandes ciclos: o ciclo pré-Andino (Pré-cambriano ao Paleozoico), um período transicional extencional no qual a Bacia Pucará se desenvolveu (Triássico Superior ao Jurássico Inferior), e o Ciclo Andino (Jurássico Inferior até o presente) (Mégard, 1987; Benavides-Cáceres, 1999). A evolução estrutural andina peruana segundo Mégard (1984) é caracterizada por sucessivos estágios orogênicos de deformação denominados: Mochica (Cenomaniano), Peruvian (Santoniano–Campaniano), Incaic (Eoceno Médio a Superior) e Quechua (Mioceno–Plioceno), aos quais a circulação de fluidos que geraram os depósitos MVT devem estar associados.

v) Os possíveis controles litológicos das mineralizações sulfetadas de Zn–Pb são os dolomitos, aos quais os corpos de minério ocorrem associados, e também as evidências de possíveis evaporitos que estiveram presentes nas sequências carbonáticas hospedeiras. Os controles estruturais por falhas são fundamentais para circulação de fluidos nas rochas encaixantes das mineralizações, ocorrendo diversas possíveis famílias de falhas com direções variadas NW, NE e N.

Com base nas amostras de afloramentos em campo e de testemunhos de sondagem disponíveis, elaborou-se um programa com objetivo de um estudo detalhado da geologia e metalogênese dos dois depósitos, buscando:

- A caracterização mineralógica da mineralização, enfocando texturas, associações paragenéticas e zoneamento metálico;
- O reconhecimento e distinção das alterações diagenéticas e hidrotermais, focando no condicionamento da mineralização;
- A aplicação de isótopos estáveis de oxigênio (O), carbono (C) e enxofre (S) buscando identificação de fontes do fluido e de enxofre a temperatura de deposição do minério por

geotermometria e a determinação das condições físico-químicas e mecanismos de deposição do minério;

- A aplicação de isótopos radiogênicos sistema Rb-Sr e sistema Pb-Pb, buscando a identificação da fonte de fluidos dos metais, a caracterização dos processos de interação fluido-rocha, e datação da mineralização.

- Atestar ao final um modelo integrado que sirva como base para um modelo de exploração para os distritos de Florida Canyon e de Shalipayco.

Estruturação da tese

Conforme previsto no regulamento do Programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, este doutorado será estruturado na forma de quatro artigos, sendo que dois primeiros foram submetidos para publicação em periódicos científicos internacionais especializados sobre os temas abordados, e encontram-se em revisão, enquanto que os dois últimos serão submetidos para publicação nos próximos meses.

Artigo 1

O artigo intitulado *The Zn–Pb mineralization of the Florida Canyon, an evaporite-related Mississippi Valley-type deposit in the Bongará District, Northern Peru* foi submetido ao periódico *Economic Geology* em Abril de 2018 e está em estágio de revisão no presente momento.

O objetivo deste estudo foi detalhar a mineralização sulfetada de Zn–Pb do depósito Florida Canyon, quanto a suas texturas, geoquímica, controles litológicos e estruturais e relações temporais entre elas. São apresentados dados geoquímicos isotópicos inéditos de C, O e Sr para os minerais carbonáticos e de S para os sulfetos, além dos modelos geológico e estrutural em 3D elaborado pelo autor e disponibilizado pela empresa. O texto traz novas interpretações com relação a estudos anteriores realizados no mesmo depósito para a origem da dolomitização que precede a mineralização sulfetada e também para o horizonte de rochas hospedeiras, sendo este um nível de rochas originalmente evaporíticas alteradas durante o soterramento e diagênese. O estudo ainda apresenta indícios que permitem traçar a relação temporal prévia de migração de hidrocarbonetos antes da mineralização de Zn–Pb, muitas vezes reconhecido em sistemas MVT mas ainda pouco compreendida.

Artigo 2

O artigo intitulado *Mineral characterization of the nonsulfide Zn mineralization of the Florida Canyon deposit, Bongará District, Northern Peru* foi submetido ao periódico *Applied Earth Science: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section B* em Abril de 2018, tendo sido aceito para publicação em Novembro de 2018.

Este texto traz a descrição inédita das mineralizações supergênicas de Zn presentes no depósito Florida Canyon. Foram utilizados neste artigo dados de caracterização mineralógica utilizando DRX e MLA–MEV para amostras de 65 sondagens. Com base em dados da literatura dos dois outros depósitos supergênicos de Mina Grande e Cristal, localizados no mesmo distrito de Bongará, no norte do Peru, foi possível estabelecer comparativos e discutir possíveis eventos recentes relacionados a gênese deste depósito.

Artigo 3

O artigo intitulado *Geology and Genesis of the Shalipayco evaporite-related Mississippi Valley-type Zn–Pb deposit, Central Peru: geological and C–O–S isotopic constraints* deve ser submetido ao periódico *Mineralium Deposita* no 1º semestre de 2019.

Este estudo aborda descrições inéditas do depósito Shalipayco em seus aspectos geológicos, geoquímicos, e no entendimento de sua origem, processo gerador e de deposição de fluidos hidrotermais mineralizantes. Contempla os dados de análises petrológicas, e de isótopos estáveis de oxigênio, carbono e enxofre para amostras selecionadas em campo de 8 sondagens e de afloramentos, além da base de dados litogeoquímicos (ICP-MS) disponibilizados pela Nexa Resources. É discutida uma possível origem da mineralização de Zn–Pb estar associada a fluidos magmáticas o que caracterizaria um depósito do tipo *Carbonate-replacement (CDR)*. O estudo revela que predominam características de sistemas MVT no depósito de Shalipayco e que estas estariam associadas a estruturas de direção principal norte. No entanto, ocorrências sulfetadas com calcopirita, galena e esfalerita aparentemente tardias, com associação geoquímica distinta (elevados valores de Ag, As, Cd, Cu, Hg e Sb), relacionadas a estruturas NW, puderam ser reconhecidas e são atribuídas a sistemas epitermais ocorrentes no distrito.

Artigo 4

O artigo intitulado *Structural control and timing of evaporite-related Mississippi Valley-type Zn–Pb deposits in Pucará Group, Northern Central Peru* deve ser submetido ao periódico *Journal of South American Earth Sciences* no 1º semestre de 2019.

Este artigo analisa as mineralizações em escala regional, apresentando uma compilação dos resultados dos estudos locais nos depósitos de Shalipayco e Florida Canyon, e também os disponíveis na literatura para a Mina de San Vicente, abordando assim os três maiores depósitos de Zn-Pb na Província MVT da Bacia Pucará. Traz como dados inéditos as análises de isótopos radiogênicos Rb-Sr e Pb-Pb e gerando assim um modelo geológico integrado útil para a geração de um modelo exploratório nestes distritos.

Referencias

- Bastin, E.S., 1939, Contributions to a Knowledge of the Lead and Zinc Deposits of the Mississippi Valley Region, Geological Society of America, 156 p.
- Benavides-Cáceres, V., 1999, Orogenic evolution of the Peruvian Andes: the Andean cycle: Geology and ore deposits of the Central Andes, v. 7, p. 61-107.
- Leach, D.L., Bradley, D., Lewchuk, M.T., Symons, D.T., de Marsily, G., Brannon, J., 2001, Mississippi Valley-type lead–zinc deposits through geological time: implications from recent age-dating research: *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 711–740.
- Leach, D.L., Sangster, D.F., Kelley, K.D., Large, R.R., Garven, G., Allen, C.R., Gutzmer, J., Walters, S., 2005, Sediment-hosted Pb–Zn Deposits: a global perspective: *Economic Geology*, v. 100, p. 561–608.
- Mégard, F., 1984, The Andean orogenic period and its major structures in central and northern Peru: *Journal of the Geological Society*, v. 141, p. 893–900.
- Mégard, F., 1987, Structure and evolution of the Peruvian Andes, *in*: Schaer, J. P., Rodgers, J., (Eds.), *The Anatomy of Mountain Ranges*: Princeton, New Jersey, United States, Princeton University, p. 179–210.
- Megaw, P.K.M., Ruiz, J., Titley, S. R., 1988, High-temperature, carbonate-hosted Ag–Pb–Zn–(Cu) deposits of northern Mexico: *Economic Geology*, v. 83, p. 1856–1885.
- Sánchez, A., 1995, Geología de los cuadrángulos de Bagua Grande, Jumbilla, Lonya Grande, Chachapoyas, Rioja, Leimebamba y Bolívar: hojas 12-g, 12-h, 13-g, 13-h, 13-i, 14-hy 15-h, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico Peru.
- Schaltegger, U., Guex, J., Bartolini, A., Schoene, B., Ovtcharova, M., 2008, Precise U–Pb age constraints for end-Triassic mass extinction, its correlation to volcanism and Hettangian post-extinction recovery: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 267, p. 266–275.
- Sverjensky, D.A., 1986, Genesis of Mississippi Valley-type lead–zinc desposits: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 14, p. 177–199.

6 Discussões e Conclusões Finais

A presente tese em linhas gerais teve como principal objetivo melhor compreender a geologia e gênese dos depósitos de Zn–Pb de Florida Canyon e Shalipayco, e pode-se afirmar que tal resultado foi alcançado, gerando novas contribuições e interpretações para a formação desta classe de depósitos hidrotermais de metais base.

Algumas das perguntas inicialmente propostas foram respondidas e as hipóteses colocadas no início desta tese foram testadas. A seguir são resumidas as conclusões alcançadas com o estudo de cada um dos dois depósitos separadamente em escala local em um primeiro momento, e depois em escala regional analisando-se o cinturão de depósitos MVT peruano como um todo.

Para o depósito Florida Canyon:

– A mineralização sulfetada no depósito de Florida Canyon apresenta um controle estrutural principal dado por um domo definido por sondagem e apresenta dois diferentes estilos: i) um primeiro predominantemente *stratabound* hospedado em dolomitos porosos e brechas de dissolução evaporíticas, que acompanham a estrutura dômica, e ii) um segundo, discordante das camadas e de mais alto teor de Zn e Pb, associado a brechas evaporíticas diapíricas.

– A distribuição de teores dentro da estrutura dômica está associada a falhas de alto ângulo secundárias de direção N–NE delimitadas por falhas de cavalgamento regionais andinas de direção geral NW.

– Antes da mineralização, a diagênese das rochas da plataforma carbonática e evaporítica da sequência de Pucará desempenhou um papel fundamental condicionando onde iria ocorrer a precipitação dos sulfetos de Zn e Pb. A diagênese das rochas carbonáticas e evaporíticas iniciais produziu novas fases de carbonatos, modificou e criou novas vias de circulação de fluidos e gerou armadilhas estruturais e de hidrocarbonetos que determinaram onde o depósito mineral se formou.

– As fases de carbonatos diagenéticos são muito mais abundantes do que fases mais tardias associadas a mineralização sendo distinguíveis através das assinaturas isotópicas de Sr e imagens de catodoluminescência. Dolomita e calcita diagenéticas ocorrem predominantemente em texturas de substituição enquanto que dolomita hidrotermal associada a esfalerita e galena ocorre principalmente em texturas de preenchimento de espaços vazios.

– A mineralização sulfetada de Zn e Pb é posterior a migração de hidrocarbonetos. Esfalerita e galena preenchem poros que anteriormente foram preenchidos por hidrocarbonetos, atualmente betume.

– No depósito de Florida Canyon são encontradas diversas evidências de evaporitos pretéritos, totalmente substituídos e/ou transformados, tais como texturas de pseudomorfos de minerais evaporíticos (gipsita e halita), brechas de dissolução evaporíticas e dolomitos porosos. Estruturas como o próprio domo que define o depósito e corpos de minério subverticais sugerem movimentação de sal (halocinese) anterior a formação da mineralização sulfetada, durante a diagênese inicial e de soterramento.

– A mineralogia não-sulfetada em Florida Canyon consiste em smithsonita (principalmente), hemimorfita, cerussita e goethita. A gênese desta mineralização está associada com falhas de pequeno rejeito que permitiram a circulação de água meteórica atingindo profundidades de centenas de metros, oxidando a mineralização hipogênica sulfetada em substituição direta. A assembleia mineralógica supergênica é um indicador paleoclimático sugerindo clima úmido durante sua formação. Em analogia ao depósito de Zn não-sulfetado Cristal, localizado também no Distrito de Bongará, a idade do Mioceno Superior é atribuída a mineralização supergênica de Florida Canyon.

Para o depósito de Shalipayco:

– O depósito Shalipayco apresenta uma compartimentação estratigráfica muito semelhante à do depósito Florida Canyon, também hospedado na Formação Chambará, destacando-se horizontes com mesmas características pré-mineralização, como brecha evaporítica, dolomito poroso e pseudomorfos de minerais evaporíticos.

– As mineralizações de Zn–Pb de Shalipayco apresentam diversas características comuns a depósitos MVT, sendo claramente epigenéticas, morfologia *stratabound*, mineralogia simples com esfalerita, galena e pirita, e composições isotópicas de chumbo e enxofre indicando fontes crustais.

– O depósito de Shalipayco encontra-se geograficamente localizado em um distrito com diversos outros depósitos com associação magmática hospedados nas rochas do Grupo Pucará, como os depósitos *skarn* de Atacocha e Milpo, e epitermais de Cerro Pasco, Colquijirca e Morococha, levando a hipótese de uma origem do tipo *carbonate-replacement* (CRD). Depósitos CRD apresentam muitas semelhanças com depósitos MVT, no entanto, as principais diferenças são altas temperaturas e fonte magmática de fluidos e do enxofre. Os dados de

isótopos de enxofre em sulfetos ($\delta^{34}\text{S} = -23,3$ a $-6,2\%$) e isótopos de carbono e oxigênio em dolomita esparítica associada a mineralização ($\delta^{13}\text{C} = -0,1$ a $+1,6\%$ e $\delta^{18}\text{O} = +17,5$ a $+25,3\%$) não corroboram essa hipótese não coincidindo com fontes de fluido derivados da consolidação de magmas. As assinaturas isotópicas de carbono, oxigênio e chumbo dos depósitos hidrotermais próximos com associação magmática como Cerro Pasco, Morococha, Atacocha e El Porvenir também são distintas dos valores obtidos para Shalipayco, que são mais próximos dos valores de depósitos MVT de San Vicente e Florida Canyon. Indicadores de temperatura de inclusões fluidas e geotermômetros de isótopos de enxofre obtidos para Shalipayco (<160 °C) não indicam altas temperaturas típicas de depósitos CRD (200 ° a 500 °C), mas sim de depósitos MVT (90 ° a 180 °C).

– A ocorrência sulfetada denominada Veta Eddy, associada a um sistema de falhas NW que limita o depósito de Shalipayco em sua porção sul, apresenta assinatura geoquímica de elementos traço distinta, com valores relativamente elevados de Ag, As, Cd, Cu, Hg e Sb, o que sugere uma associação distal com sistemas tipo epitermais. No entanto, estudos específicos direcionados a esta ocorrência não-econômica devem ser conduzidos para confirmar esta hipótese.

Para o cinturão de depósitos MVT hospedados no Grupo Pucará.

– Os depósitos MVT de Zn–Pb de Florida Canyon, Shalipayco e San Vicente apresentam semelhanças quanto a litologia, mineralogia, estratigrafia, paragênese e controle estrutural, assim, assume-se que os processos de formação das rochas hospedeiras e da mineralização foram os mesmos nestes depósitos.

– O controle estrutural dos depósitos de Shalipayco e Florida Canyon é condicionado por estruturas extensionais secundárias sub-verticais com direção N, NNE e NNW, prévias a mineralização, relacionadas a movimentos *strike-slip* posteriores a estruturação geral andina de falhas de empurrão de direção geral NW.

– A estrutura dômica do depósito Florida Canyon é interpretada como produto de movimentos de sal de níveis evaporíticos do Grupo Pucará e do Grupo Mitu, que atuaram como níveis incompetentes e plásticos que permitiram a movimentação de camadas superiores durante a orogênese Juruá (157–152 Ma).

– A gênese do estágio pré-mineralização de dolomitização que formou brechas evaporíticas e dolomito poroso durante diagênese de soterramento é atribuído ao período entre

orogêneses Juruá e Mochica. A migração de óleo para estas rochas reservatórios ocorreu provavelmente durante o evento Mochica (100–95 Ma).

– As análises de Rb–Sr em esfalerita do depósito Florida Canyon, conjuntamente com relações temporais de campo revelam que a mineralização de Zn e Pb se formou durante ou logo após o Santoniano durante a orogênese Peruvian (86–83 Ma).