

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA**

LAISA STINGELIN COLAÇO

**PETROGRAFIA E QUÍMICA DE ROCHA TOTAL DO DEPÓSITO DE CU-AG
HOSPEDADO EM CARBONATOS DE TULLACONDRA, EM MALLOW, IRLANDA**

CURITIBA

2018

LAISA STINGELIN COLAÇO

**PETROGRAFIA E QUÍMICA DE ROCHA TOTAL DO DEPÓSITO DE CU-AG
HOSPEDADO EM CARBONATOS DE TULLACONDRA, EM MALLOW, IRLANDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geologia da Universidade Federal do
Paraná como requisito parcial à obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Filipe de Oliveira
Cordeiro

Co-orientadora: Dra. Anelize Bahniuk
Rumbelsperger

CURITIBA

2018



“But it's been no bed of roses,

No pleasure cruise.

I consider it a challenge before the whole human race,

And I ain't gonna lose”.

Queen

AGRADECIMENTOS

“Je schöner und voller Erinnerung, desto schwerer die Trennung! Aber die Dankbarkeit verwandelt die Erinnerung in eine stille Freude. Man trägt das vergangene Schöne nicht wie einen Stachel, sondern wie ein kostbares Geschenk in sich!”

Na tentativa de agradecer a todos que de alguma forma estiveram presentes nesta caminhada, brevemente agradeço por todas oportunidades que tive durante a jornada acadêmica e dos familiares e amigos que participaram nestes anos.

Desde das oportunidades dados por meios meus queridos pais, Marconi e Vanessa, que desde o início foram preocupados em fornecer tudo o que podiam e sempre colocar a família em primeiro lugar. Sou grata pelo amor, companhia e conselhos tão especiais durante esse tempo de amadurecimento, em que os mais diversos desafios apareceram e mesmo distantes, sem suas orações não teria chego aqui.

Ao meu irmão, Marlon que me ensinou ser menos egoísta e reclamar menos da vida. À nona Dirorah e à Oma Leony que sempre foram mulheres fortes e corajosas para sua época, me deixando seu grande exemplo, não desistir. Ao Tio Anderson, que com seu entusiasmo e inteligência, sempre me motivaram ter ambição e pensar no futuro. A minha irmazinha querida, Louise que tantas vezes me escutou e aconselhou, além de me proporcionar uma adolescência movida à Queen – aqui estamos nós: “I want it all!”. Também a Tia Tânia, outra mulher corajosa e fantástica, com quem tive oportunidade de conviver.

Aos grandes amigos da uni, principalmente a Paula e Letícia, com quem passei tempo suficiente para serem chamadas de melhores amigas. Ao menino do Wacken, que me encontrou mesmo que nos 45’ do segundo tempo e que tem me feito sorrir e motivado além de demonstrar muito carinho por mim. Aos amigos de pesquisa queridos, Andressa e Andy que me aguentaram nos momentos de desespero e com quem sempre pude contar. Ao Pedro que mesmo longe se dispôs a continuar conosco e ser exemplo para minha segunda profissão, como professora. E também aos alunos de alemão, com quem pude compartilhar bons momentos.

RESUMO

O depósito de Cu-Ag de *Tullacondra* está localizado ao norte-noroeste da cidade de Mallow, no condado de Cork, no sul da Irlanda. O mesmo tem gênese pouco entendida, no entanto há semelhanças com o padrão estrutural de grandes depósitos de Zn-Pb tipo *Irish* ao norte da Irlanda. A mineralização de Cu e Ag ocorre estruturalmente no flanco norte da anticlinal com eixo E-W, onde os flancos tem caimentos suaves para o norte e sul. Os corpos mineralizados são hospedados em rochas carbonáticas da unidade *Lower Limestone Shale* do estágio *Courseyan* (início do Carbonífero Inferior) depositados em regime distensivo durante o desenvolvimento da Bacia de Munster. A geometria do depósito de Cu em *Tullacondra*, é vertical enquanto do corpo contendo Ag, stratabound e contém cerca de 3,6 Mt a 0,7% de Cu e 27,5 ppm de Ag e 0,6 Mt a 150 ppm de Ag com 0,6% de Cu, respectivamente. Estratigraficamente, as rochas hospedeiras encontram-se acima de rochas clásticas da unidade *Old Red Sandstone* (ORS) de protólitos caledonianos (Neoproterozóico ao Siluriano) e sob os carbonatos micríticos do Complexo de *Waulsortian*. O *Lower Limestone Shale* tem aproximadamente 90 m de espessura e é subdividido da base para o topo nas unidades Upper Transition Beds, Uniform Calcarenite, Lower Shaly Calcarenite, Oolitic Calcarenite, Upper Shaly Calcarenite, Ballyvergin Shale e *Tullacondra* Limestone. O vulcanismo que atingiu a área no final do *Courseyan* e início do *Chadian* é tido como uma das possíveis fontes de calor e metais como Cu e Ag, associando-se a idade da mineralização a este evento. Acredita-se que superfícies de oxirredução que limitam algumas unidades serviram de armadilha química para desestabilização de fluidos e início da mineralização, que coincidem com intervalos de altos teores. A relação entre óxidos maiores e metais base foi analisada através de diversos gráficos, que mostraram correlações positivas entre os elementos Cu, Ag, As, Co, Cd e Ni, cuja mineralização aponta para próximo dos condutos alimentadores. A correlação com o Zn é negativa, e as razões Zn/Cu tendem aumentar para norte. Detalhes sobre a geometria dos corpos mineralizados são apresentados conforme os resultados petrográficos e químicos obtidos. A cronologia entre as fases sulfetadas indica a sobreposição de fluidos mineralizadores, observado com a geometria *Tullacondra* para Ag e distribuído ao longo do perfil estratigráfico para o Cu. Os dados foram amostrados na Irlanda pelo orientador desta monografia, sendo que as amostras aqui estudadas são intervalos importantes de três furos de sondagem M73-03, 11 e 19, cujas as lâminas foram descritas e comparadas aos relatórios de sondagem, classificadas e analisadas (química de rocha total) para os furos M73-03 e 11. O objetivo desta pesquisa é a determinação de um modelo genético compatível com os dados obtidos, assim como o padrão da distribuição dos metais e a influência do contexto estrutural na gênese destes depósitos.

Palavras chave: Irlanda, Depósitos *Irish*, Depósitos de Cu-Ag em rochas carbonáticas, Bacia de Munster, Carbonífero Inferior.

ABSTRACT

The Tullacondra Cu-Ag deposit is located north-northwest of Mallow at Cork County in the south of Ireland. The Tullacondra deposit has a vaguely understood genesis, however there are similarities to the structural pattern of large Zn-Pb Irish-Type deposits in the north of Ireland. The mineralization occurs structurally on the anticline's northern flank of with EW-axis, where both flanks have a smooth dip to the north and south. The ore bodies are hosted in carbonate rocks of the Lower Limestone Shale Unit, which were deposited during the Courceyan Stage (at beginning of the Lower Carboniferous) in an extensive regime during the development of the Munster Basin. The geometry of copper-body at Tullacondra deposit is mainly vertical and the silver-body, stratabound. They contain about 3.6 Mt at 0.7% Cu and 27.5 g / t Ag 0,6 Mt to 150 ppm Ag with 0,6%Cu, respectively. Stratigraphically, Lower Limestone Shale Unit lays above clastic rocks of the Old Red Sandstone (ORS) Unit, whose photoliths were formed during the Caledonian (Neoproterozoic to Silurian) and under the micritic carbonates of the Waulsortian Complex. The Lower Limestone Shale has approximately 90 m thickness and is subdivided from the base to the top in the Upper Transition Beds, Uniform Calcarenite, Lower Shaly Calcarenite, Oolitic Calcarenite, Upper Shaly Calcarenite, Ballyvergin Shale and Tullacondra Limestone. The volcanism that stroke the area at the end of the Courceyan and early Chadian is considered to be as one of the possible sources of heat and metals such as Cu and Ag and the mineralization ages are associated to this event. It is believed that oxidation surfaces that worked as boundaries to some units as chemical trap that caused destabilization of fluids and the beginning of mineralization. Coincidentally, these intervals show the highest concentrations of Cu-Ag. The relationship was between oxides and base metals analyzed through several graphs, which showed positive correlations between Cu, Ag, As, Co, Cd and Ni elements, whose mineralization points towards the feeders. The correlation with Zn is negative and the Zn / Cu ratios tend to increase towards the north. Details on the geometry of the mineralized bodies are presented according to the petrographic and chemical results obtained. The chronology between the sulfide minerals indicates the overlap of mineralizing fluids, verified trough the geometry for the Ag-body and the Cu-body distributed along the stratigraphic profile. The data was sampled in Ireland by the supervisor of this research and the samples studied here are important intervals of three wells M73-03, 11 and 19, whose thin sections were described and compared to the drilling-data, classified and analyzed after the chemical-data, for the total-rock analysis for the wells M73-03 and 11. The main purpose of this research is the determination of a compatible genetic model with the obtained data, as well as understanding the pattern of metal distribution and the influence of the structural context on the genesis of these deposits.

Keywords: Ireland, *Irish* deposits, Cu-Ag deposits hosted in carbonated rocks, Munster Basin, Lower Carboniferous.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Mapa de localização do depósito de Tullacondra na cidade Mallow, próximo ao condado de Cork, no sul da Irlanda. No mapa à esquerda, com as principais vias de acesso em rosa e a malha urbana em amarelo (Slowey, 2010). 1
- Figura 2:** Principais províncias localizadas na Irlanda. Destaque para a Província de *Irish Midlands*, na qual estão os principais depósitos minerais em rochas carbonáticas do Carbonífero Inferior (Gregg et al, 2001). 4
- Figura 3:** Coluna geológica com as principais relações entre as fácies sul e norte do *Irish Midlands* no Carbonífero Inferior, ênfase para a unidade Lower Limestone Shale que contém os depósitos de cobre em Mallow (Gregg et al., 2001). 5
- Figura 4:** Coluna cronoestratigráfica com os Estágios para os eventos tectônicos que atuaram nas *Irish Midlands* e a posição estratigráfica dos depósitos tipo *Irish* na Irlanda (Hitzman, 1999). 6
- Figura 5:** Esquema dos aspectos tectônicos da Irlanda. Desenho sem escala, mas com posições aproximadas dos depósitos de metais bases hospedados em sedimentos. Destaque para o distrito de Mallow, ao sul, onde elementos de falha de empurrão e zona de cisalhamento dextral são observados (Johnston, 1999). 8
- Figura 6:** Esquema gráfico com os elementos de *relay ramps* associados a falhas normais, que facilitam a condução e mistura de fluidos (Peacock & Sanderson, 1994). .. 9
- Figura 7:** Mapa regional da geologia da Irlanda contendo a localização das principais minas de Zn-Pb ao Centro-Norte da Irlanda. No sul da Irlanda estão localizados os depósitos de Cu-Ag semelhantes ao distrito de Mallow marcados em vermelho – Ballyvergin, Gotrdrum e Aherlow (Exploration and Mining Division Ireland, 2005). 10
- Figura 8:** Mapa geológico da região ao noroeste de Mallow. A anticlinal de Kilmaclenine é principal estrutura regional do conjunto, assim como os falhamentos e zonas de cavalgamento (para norte), discriminado as principais unidades litoestratigráficas. No centro da anticlinal afloram as rochas do ORS e carbonatos que hospedam os depósitos de Cu-Ag de *Tullacondra*. (Wilbur & Carter, 1986 modificado por Silva, 2017). 11
- Figura 9:** Secção transversal N-S do flanco norte da Anticlinal de Kilmaclenine, com a disposição geométrica dos principais corpos mineralizados. Na base, a geometria do corpo mineralizado em Cu-Ag tipo stratabound e o disseminado subvertical (Wilbur & Carter, 1986 modificado por Silva, 2017). 12
- Figura 10:** Organização estratigráfica para as unidades do Carbonífero Inferior para a região Centro-Sul da Irlanda. A espessura de cada unidade é descrita na imagem assim, como subdivisão das unidades na figura ao lado para o início do estágio do Courceyan. A posição relativa das mineralizações está na figura (James, 2013). 14
- Figura 11:** Seções dos depósitos da região Centro-Sul da Irlanda: A: Depósito de Cu-Ag de Ballyvergin; B: Depósito de Cu-Ag de Aherlow (Johnston, 1999) e C: Depósito de Cu-Ag-Hg de Gortdrum (Johnston, 1996). 16
- Figura 12:** Fotomicrografias das lâminas polidas do furo M73-03 com as principais texturas de minério descritas por Silva (2017). **A** e **B**: Calcopirita disseminada nos calcarenitos. Foto em luz plano polarizada e refletida. **C** e **D**: Calcopirita disposta segundo o acamamento. Foto em luz plano polarizada e refletida. **E**: Veio discordante e

maciço de calcopirita em amostra macroscópica. **F:** Veio em luz refletida com a paragênese Bn-Ccp. **G:** Cristal de Bn em veio de calcita e **H:** Mineralização em estilólito contendo cristal de Cc (Adaptado de Silva, 2017)..... 18

Figura 13: Fotografias da unidade Upper Shaly Calcarenite. **A:** Em luz transmitida com nicóis em cruzado, o arcabouço e matriz micrítica. Em detalhe, quadro com fóssil substituído por Chal. **B:** Cristal contendo sulfetos de Cu e As/Sb disseminado. **C:** Cristais de sulfetos em luz refletida. **D:** Em luz transmitida os estilólitos contendo muscovita e quartzo.....24

Figura 14: Fotomicrografias da Unidade Oolitic Calcarenite. **A:** Em luz transmitida com nicóis cruzados, o *floatstone*, que representa as rochas da unidade. **B:** Também em nicóis cruzados, pisólito substituído por calcedônia. **C:** Sob luz refletida, cristal de arsenopirita envolto por bordas de Calcocita. **D:** Ainda sob luz refletida, cristal de bornita com pontos brancos onde ocorre arsenopirita.....25

Figura 15: A, B e C: Fotografia da Unidade Lower Shaly Calcarenite, representada por veio de calcita, com quartzo e feldspato contendo sulfetos (**A**), com cristais de calcopirita e bornita (**B, C**) em luz refletida. **D:** Arcabouço da Unidade Uniform Calcarenite em luz transmitida com nicóis cruzados. **E:** Arcabouço da Unidade Upper Shaly Transition Beds em luz transmitida com nicóis cruzados, estilólitos são comuns nesta unidade.....27

Figura 16: A, B e C: Fotomicrografias da Unidade Lower Transition Beds, sob luz transmitida em A e C, arcabouço contendo muscovita ripiforme e microclínio e com cristais alongados (orientados) em C. **B:** Sob luz refletida, cristais disseminados de Bornita e Calcopirita. **D e E:** Fotografia da Unidade Old Red Sandstone, com veio de calcita, quartzo e microclínio em D. **E:** Contato do calcarenito e arenito com muscovitas ripiformes.....29

Figura 17: Perfil estratigráfico para os furos **M73-03 (A)** e **M73-11 (B)** na próxima página, contendo além das unidades litoestratigráficas descritas nos respectivos relatórios de sondagem com base nas profundidades dadas por Fitzell (1973) e Wilbur (1973a; anexo 1), a delimitação das principais fases sulfetadas descritas nas lâminas. Os quadros em vermelho indicam o intervalo com a mineralização verticalizada em Cu. Os quadros em laranja mostram os intervalos onde a mineralização stratabound em Ag ocorre. Figura A adaptada de Silva (2017). **Figura B** produzida pela autora com escala 1:20. WLR:Klimaclenine Limestone, ABL: Waulsortian Formation, TCL: Tullacondra Limestone, BVF: Ballyvergin Shale, CSY: Silty Calcarenite, COC: Oolitic Calcarenite, CLS: Lower Shaly Calcarenite, CUF: Uniform Calcarenite, TSU: Upper Transition Beds, TSL: Lower Transition Beds e ORS: Old Red Sandstone.30

Figura 18: Fotografias das lâminas **A:** M-73-162 (20x) e **B:** M-73-203 (5x) com nicóis cruzados, após o teste com alizarina para identificação de carbonatos. Em azul são carbonatos com Fe, em vermelho calcita e sem coloração, dolomita (Fotos cedidas por Andressa Araújo Silva).34

Figura 19: Fotografia da amostra M-73-133 no furo M73-19 pertencente a unidade CLS, onde é possível reconhecer as paragêneses dos minerais de minério. Onde no centro ocorrem cristais acinzentados, entre eles, arsenopirita, tetraedrita/tennantita e galena(?), envolvidas por bornita e calcopirita, que por fim são envolvidas por bornita e calcocita. (Foto cedida por Andressa Araújo Silva).41

Figura 20: Quadro mostrando a evolução temporal das sequências paragéticas do depósito de <i>Tullacondra</i> . (Modificado de Silva, 2017).	42
Figura 21: Seção geológica para o furo M73-11 com os principais intervalos mineralizados e suas geometrias baseadas nos dados petrográficos e químicos (Modificado de Rathdowney Resources, 2007).	44
Figura 22: Mapa geral do Sul da Irlanda com a distribuição da dolomitização no Waulsortion Limestone até a borda norte do front do Cinturão Herciniano e até a borda do Maciço de Wicklow (Hitzman <i>et al.</i> , 1998).	47
Figura 23: Modelo genético para os depósitos tipo Irish baseado em dados sísmicos, onde as rampas de transferência servem de conduto para a percolação e mistura de fluidos. No sul e sudeste, ocorrem as maiores temperaturas para os fluidos mineralizados devido a associação dos fluidos com o vulcanismo que atingiu a área durante o Chadian até o Asbian (Wilkinson & Hitzman, 2014).	48
Figura 24: Mapas para a distribuição dos elementos Cu, Ag, Zn, Pb, As, Ni e Cd no depósito de Lischeen, bem como as principais estruturas regionais catalogadas (adaptado de Torremans <i>et al.</i> , 2018).	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estratigrafia da porção amostrada do furo M73-03 segundo Fitzell (1973) e caracterização petrográfica de alguns intervalos amostrados.	17
Tabela 2: Rotina de análise dos elementos do Laboratório ALS Global	20
Tabela 3: Estratigrafia da porção amostrada do furo M73-11 segundo Wilbur (1973a) e caracterização petrográfica de alguns intervalos amostrados.	22
Tabela 4: Tabela resumo das principais características comuns aos depósitos tipo Irish.	50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Gráficos para os principais elementos e metais que formam os minerais de minério no furo M73-03. Na legenda, ABL: Klimaenine Formation, TCL: <i>Tullacondra</i> Limestone, BVF: Ballyvergin Shale, CUS: Upper Shaly Calcarenite, COC: Oolitic Calcarenite, CLS: Lower Shaly Calcarenite, CUF: Uniform Calcarenite, TSU: Upper Transition Beds, TSL: Lower Transition Beds e ORS: Old Red Sandstone.	33
Gráfico 2: Concentração em ppm de metais formadores de minérios no depósito de <i>Tullacondra</i> versus profundidade de cada amostra analisada para o furo M73-03. O início do gráfico corresponde à profundidade da primeira rocha amostrada.	36
Gráfico 3: Gráficos para os principais elementos e metais que formam os minerais de minério no furo M73-11. Na legenda, CUS: Upper Shaly Calcarenite, COC: Oolitic Calcarenite, CUF: Uniform Calcarenite, TSU: Upper Transition Beds, TSL: Lower Transition Beds e ORS: Old Red Sandstone.	37

Gráfico 4: Concentração em ppm de metais no depósito de *Tullacondra* versus profundidade de cada amostra analisada para o furo M73-11. O início do gráfico corresponde à profundidade da primeira rocha amostrada.39

LISTA DE ABREVIATURAS

apy - arsenopirita

bn – bornita

cal – calcita

ccp – calcopirita

cc – calcocita

chal – calcedônia

dol – dolomita

hem – hematita

ms – muscovita

mc – microclínio

qtz – quartzo

rt – rutilo

td – tetraedrita

tn – tennantita

Fonte: Chace (1956) e Whitney & Evans (2010)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTO E PROBLEMA.....	2
1.2. OBJETIVOS.....	2
2. REVISÃO TEÓRICA	3
2.1 GEOLOGIA REGIONAL.....	3
2.2 GEOLOGIA DO DEPÓSITO DE <i>TULLACONDRA</i>	11
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
4. RESULTADOS	22
4.1 Petrografia	22
4.2 Geoquímica de Rocha-Total	32
4.3 Geometria do Corpo de Minério.....	42
5. DISCUSSÃO	46
5.1 Deposição e Diagênese	46
5.2 Evolução e Geometria da Mineralização.....	47
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	51
REFERÊNCIAS.....	53
ANEXO I: Tabela resumo das profundidades e intervalos das unidade litoestratigráficas dos perfis de sondagem M73-03, 11 e 19	59
ANEXO II: Dados Geoquímicos para análise de Rocha-Total dos furos M73-03 e 11	60

1. INTRODUÇÃO

A presente pesquisa busca complementar o estudo inicial sobre a petrografia do depósito de *Tullacondra*, localizado aproximadamente a 10 km a NNW da cidade de Mallow, no condado de Cork, sul da Irlanda (Figura 1). Devido a ocorrências próximas de Cobre (Cu) e Prata (Ag) no depósito de *Gortdrum* (também no sul da Irlanda), foi descoberto em 1973 o depósito de Cu e Ag de *Tullacondra*, o qual apresenta uma zona mineralizada discordante 3,6 Mt a 0,7% de Cu e 2,7g/t de Ag, bem como outra zona tipo stratabound enriquecida em Ag com 0,6 Mt a 150g/t de Ag com 0,6% de Cu (Wilbur & Carter, 1986).

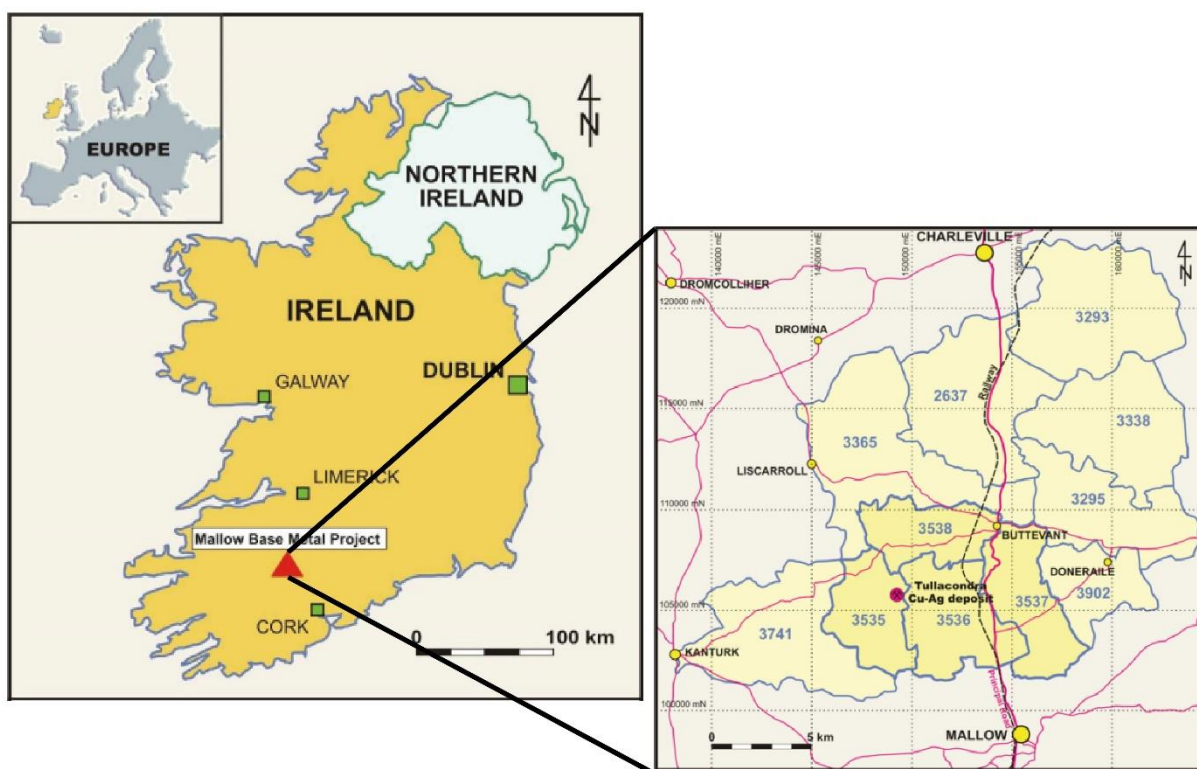


Figura 1: Mapa de localização do depósito de Tullacondra na cidade Mallow, próximo ao condado de Cork, no sul da Irlanda. No mapa à esquerda, com as principais vias de acesso em rosa e a malha urbana em amarelo (Slowey, 2010).

O cobre é um metal base que tem ampla aplicação na indústria metalúrgica, confecção de ligas metálicas e de grande importância para produção de materiais condutores de eletricidade. Justifica-se assim a busca por novos tipos de depósitos e portanto a geração de modelos que definam sua gênese e tenham aplicabilidade.

O depósito de cobre de *Tullacondra* é composto principalmente por carbonatos argilosos, de unidades carbonáticas basais de idade Carbonífero Inferior (Estágio *Courceyan* – atualmente definido como Tournaisiano), a qual também hospeda os depósitos de Zinco (Zn) e Chumbo (Pb), de mesma idade, do tipo *Irish* com afinidades ao modelo Mississipi-Valey (MVT) (Johnston, 1999). Embora haja semelhanças quanto ao ambiente mineralizador com relação aos depósitos MVT, a gênese dos depósitos de cobre e prata é pouco conhecida e ambos diferem quanto ao contexto tectônico e a concentração do elemento Cu, baixas em sistemas MVT.

Busca-se portanto, através do estudo dos depósitos já conhecidos na região o melhor entendimento para o modelo metalogenético desses depósitos de cobre e prata associados aos depósitos tipo *Irish*, além do estudo de suas paragêneses metalogenéticas, das texturas e da geometria do minério.

1.1. CONTEXTO E PROBLEMA

Sabe-se que o depósito de *Tullacondra*, através de comparações com depósitos semelhantes da região de Cork e no Centro-Sul da Irlanda, foi gerado pela percolação de fluidos hidrotermais altamente salinos e redutores em rochas carbonáticas hospedeiras do estágio Tournaisiano – de 358,9 até 346,7 Ma. Esses fluidos teriam aproximadamente 240° C, que percolaram através de um sistemas de fraturas verticais e precipitaram sulfetos contendo Cu e Ag.

No entanto ainda persistem dúvidas quanto a gênese deste depósito. No contexto dos depósitos tipo *Irish*, como o depósito de *Tullacondra* em Mallow está inserido? Quais os contrastes e semelhanças? Como a química de rocha-total dos furos pode auxiliar a organizar a distribuição dos elementos nos furos?

Sobre a mineralização, como a percolação de fluidos por fraturas verticais gera corpos mineralizados tipo *Tullacondra*? Qual a sequência de cristalização dos sulfetos e isso confirmaria a formação do depósito por *overprinting* de fluidos mineralizadores?

1.2. OBJETIVOS

Identificar e definir as paragêneses minerais através do estudo petrográfico para o furo de sondagem M73-11 e em parte do furo M73-19, a fim de estabelecer a relação estratigráfica entre as unidades litológicas e a geometria dos corpos

mineralizados. Bem como reconhecer características microscópicas importantes relativas ao depósito, como as texturas e paragêneses de minério e intervalos que hospedam a mineralização de Cu-Ag.

Interpretar, comparar e contrastar os dados químicos de rocha-total para os furos M73-03 e M73-11 em gráficos binários e em perfis. Com a finalidade de delimitar o corpo mineralizado, identificar as fases de mineralização e os processos de alteração sobrepostos ao depósito.

Comparar com os dados anteriormente obtidos no trabalho de Silva (2017) para o furo de sondagem M73-03, com o intuito de aprofundar o entendimento sobre a gênese e a geoquímica do depósito de *Tullacondra*. Ademais, definir novos alvos para amostragem, através da visualização do conjunto fornecida pelos três furos de sondagem já amostrados.

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1 GEOLOGIA REGIONAL

A evolução geológica da porção centro-sul da Irlanda é essencial para o entendimento da gênese dos depósitos irlandeses de Cu-Ag e também de Zn-Pb, relacionados às unidades carbonáticas de idades carbonífero-devoniano. Segundo Slowey (2010), após as colisões durante a Orogenia Caledoniana, que resultaram no fechamento do paleoceanos Iapetus, ao longo do Neoproterozóico e Siluriano (Phillips & Sevastopulo, 1986), consolidaram o terreno, onde atualmente se localiza a Irlanda.

A Orogenia Caledoniana foi marcada por metamorfismo regional, plutonismo e falhamentos (Phillips & Sevastopulo, 1986; James, 2010). Tais rochas serviram como embasamento rochoso para a deposição de sedimentos da Bacia de *Munster*, ao Sul da Irlanda, os quais são compostos por conglomerados, arenitos, siltitos e folhelhos, da unidade litológica *Old Red Sandstone* (ORS) (James, 2010). Provavelmente, o protólito desta unidade é o Maciço de *Leinster* e possui porções aflorantes no sudeste da Irlanda, como observado na Figura 2 (Gregg *et al.*, 2001).

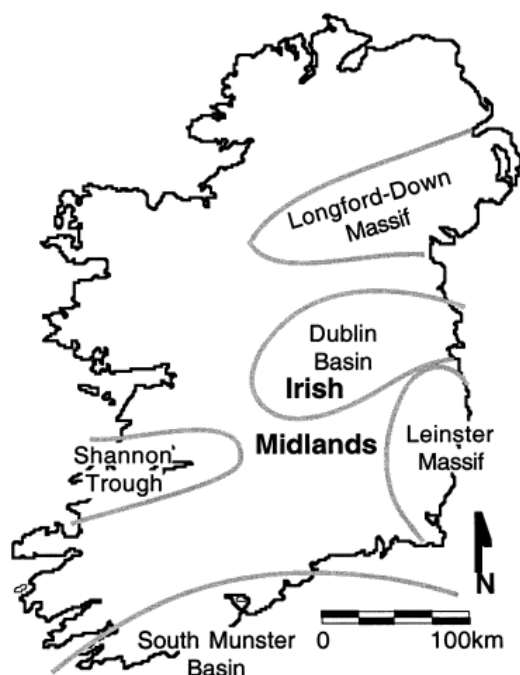


Figura 2: Principais províncias localizadas na Irlanda. Destaque para a Província de *Irish Midlands*, na qual estão os principais depósitos minerais em rochas carbonáticas do Carbonífero Inferior (Gregg et al, 2001).

Já no Devoniano Superior (Figura 3), iniciou-se a subsidência da Bacia de *Munster* e início da sedimentação marinha da plataforma Irlandesa sobre as rochas continentais (ORS), que se estendeu desde o Devoniano até o Estágio *Arundian* no Carbonífero Inferior (James, 2010). Uma transgressão progressiva para o norte propiciou as condições de plataforma rasa no Carbonífero Inferior (Estágio *Courceyan*) e posterior subsidência (Andrews, 1992).

Segundo Johnston (1999), toda a sequência de rochas sedimentares depositadas durante o Devoniano Superior ao fim do Carbonífero no Estágio *Brigantian* até a porção norte da Irlanda, compõem a Província de carbonatos de *Irish Midlands* (Figura 2), cujos os grupos basais do sul estão depositados sobre o ORS, e consistem em carbonatos argilosos e siltitos, pertencentes a Unidade *Lower Limestone Shale* (como em *Tullacondra*), e seu equivalente lateral ao norte, o Grupo *Navan*, gerado em ambiente de sedimentação marinho raso e entremarés (Philcox, 1984), que conta localmente com sedimentos evaporíticos.

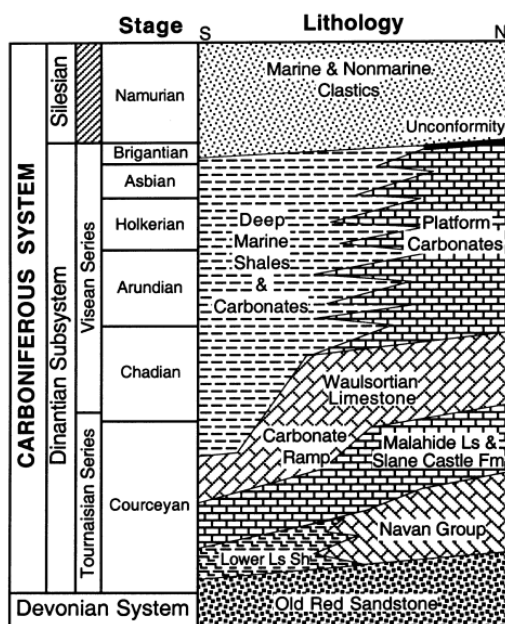


Figura 3: Coluna geológica com as principais relações entre as fácies sul e norte do *Irish Midlands* no Carbonífero Inferior, ênfase para a unidade Lower Limestone Shale que contém os depósitos de cobre em Mallow (Gregg et al., 2001).

As sequências em plataforma rasa foram sucedidas por carbonatos de águas profundas e argilitos. Além de turbiditos carbonosos e conglomerados, cuja a deposição foi controlada por uma série de falhas, sendo que a deposição entre essas bacias continuou com carbonatos de plataforma rasa dominados por oólitos (James, 2010). Tanto as unidades carboníferas do estágio *Courceyan* ao sul quanto as ao norte, são cobertas por uma espessa sequência de carbonatos argilosos bioclásticos e novamente sobrepostas por carbonatos micríticos do Complexo *Waulsortian*, que se estende ao sul e leste da Irlanda, com idades relativas ao *Courceyan* Médio, no sul e *Chadian* ao norte (James, 2010).

Conforme Hitzman & Large (1986), o Complexo de *Waulsortian* é o principal hospedeiro das mineralizações de Zn-Pb no sul da Irlanda em relação aos depósitos ao norte que se concentram no Grupo Navan (Figura 3), cujo depósito corresponde a um dos maiores depósitos mundiais de Zn-Pb, com +70Mt a 10% de Zn e 2,6% de Pb (Hitzman & Large, 1986).

Cronoestratigraficamente, a mineralização ocorre entre os Estágios *Famennian* (Devoniano Superior) até o *Arudian* (Hitzman, 1999) para os depósitos de Zn-Pb nas *Irish Midlands* (Figura 4). Os depósitos de Cu na *Bacia de Munster* também estão

hospedados em rochas clásticas devonianas, onde os minérios ocorrem geralmente em veios mineralizados, diferentemente dos depósitos que ocorrem ao norte, onde predominam minérios de Zn (Johnston, 1996).

No entanto conforme datações em piritas do depósito de Silvermines, a mineralização tem 334.0 ± 6.1 Ma, apontando para formação pós-diagenética para os depósitos na região, pois muitas idades podem refletir a remagnetização que ocorreu durante a Orogenia Herciniana (Hnatyshin, 2015).

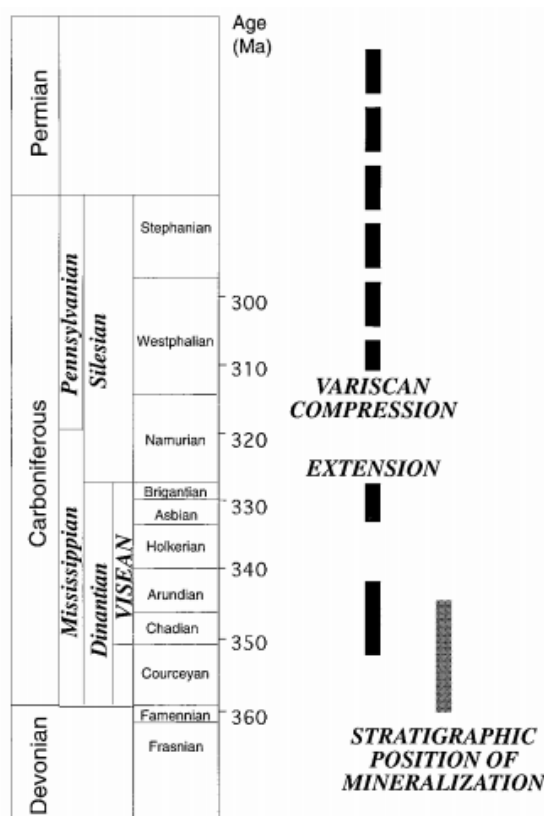


Figura 4: Coluna cronoestratigráfica com os Estágios para os eventos tectônicos que atuaram nas *Irish Midlands* e a posição estratigráfica dos depósitos tipo *Irish* na Irlanda (Hitzman, 1999).

Conforme Hitzman (1999), a razão dos metais mostra variação regional, onde os teores de Cu e Pb decrescem e de Zn aumentam para norte, o que sugere a geração desses depósitos por um fenômeno regional. Evidências em inclusões fluidas (Wilkinson, 2010) comprovam a variedade dos fluidos ao longo das *Irish Midlands*, sendo que ao sul os fluidos têm alta salinidade (11-19 wt% de NaCl) e temperaturas entre 150-260° e ao norte, os fluidos são caracterizados por baixa salinidade (5-14 wt% de NaCl) e baixas temperaturas (100-190°C), que podem ter influências de

depósitos hospedados em rochas vulcânicas, já que o raio Zn/Pb aumenta sentido norte (Wilkinson *et al.*, 2007).

A exemplo do depósito de Navan, já anteriormente apresentado, é associado a um grande número de falhas, assim como o depósito em *Tullacondra*, onde a geometria dos corpos mineralizados e sua extensão é delimitada por tais estruturas. A textura do minério é de substituição e pós-compactação, confirmando o caráter epigenético dos depósitos, pois tais características também são comuns a maioria dos depósitos em *Waulsortian* (Johnston, 1999).

Em geral, a tectônica da região durante o Devoniano Inferior até o *Arudian* foi extensional, havendo dois períodos de tempo com maior atuação tectônica - no Devoniano Superior e do *Courseyan* até *Arudian*. Neste último, acredita-se que as falhas com *trends* para o norte serviram como trajeto para os fluidos mineralizadores.

A reativação de falhas caledonianas NE-SW durante o Carbonífero Superior até o Permiano, durante a Orogenia Herciniana, que propiciou o incremento do volume de fluidos circulantes, através da deformação das rochas da região sul da Bacia de *Munster*, dando continuidade aos processos de mineralizadores (Johnston, 1999).

Com a Orogenia Herciniana houve a mudança do regime extensional para o compressional com direção N-S verificado ao sul da Irlanda por zonas de cavalgamento e cisalhamentos de componentes dextrais (E-NE e N-NE), já ao norte as evidências são menos intensas, com dobramentos de eixo E-W e falhamentos inversos (Figura 5, Wilbur & Carter, 1986). Já na região de Mallow, a falha de empurrão mapeada tem relação com a Orogenia Herciniana (James, 2010).

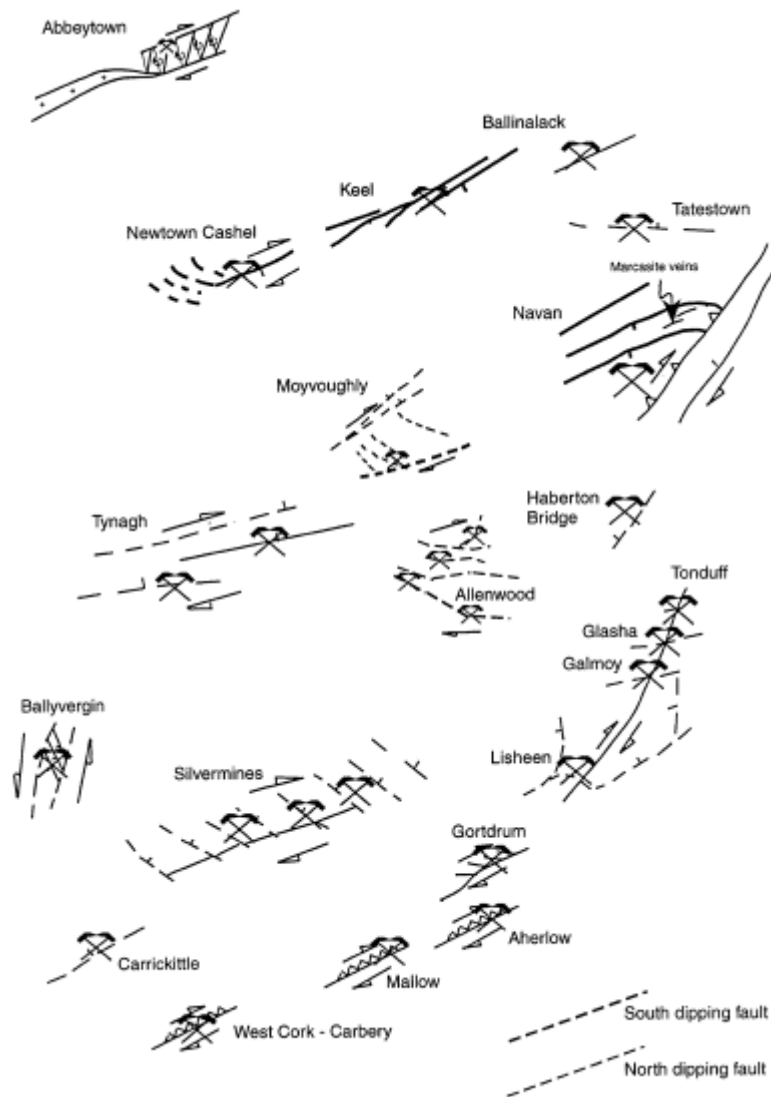


Figura 5: Esquema dos aspectos tectônicos da Irlanda. Desenho sem escala, mas com posições aproximadas dos depósitos de metais bases hospedados em sedimentos. Destaque para o distrito de Mallow, ao sul, onde elementos de falha de empurrão e zona de cisalhamento dextral são observados (Johnston, 1999).

Ainda conforme Wilkinson & Hitzman (2010), os depósitos hospedados no Complexo Walsortian ocorre nas paredes de falhas normais, geradas durante um movimento transtensional com formação de sistemas de rampas de transferência *relay ramps*, cujo o conceito segundo Fossen (2012), pode ser explicado por camadas sub horizontais flexionadas entre a extremidades de falhas, causado pela transferência da deformação entre duas falhas (Figura 6).

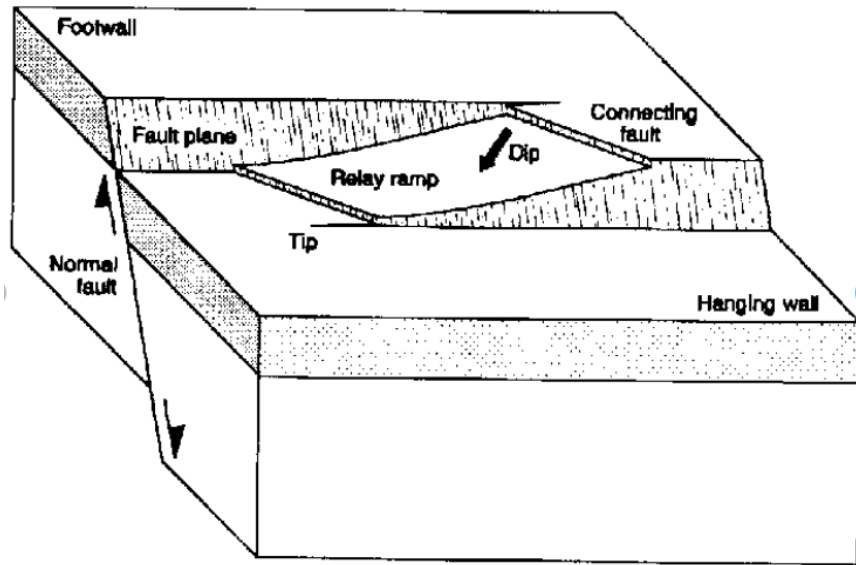


Figura 6: Esquema gráfico com os elementos de *relay ramps* associados a falhas normais, que facilitam a condução e mistura de fluidos (Peacock & Sanderson, 1994).

Dentre outras estruturas registradas na estratigrafia da porção norte na plataforma irlandesa são descritos diques máficos e finas bandas de tufos, que representam a atividade vulcânica durante os Estágios *Chadian* Inferior até o *Asbian*. Já na porção sudoeste nas *Midlands*, a atividade vulcânica é mais expressiva, com derrames bimodais e alcalinos, diques máficos e bandas de tufos (Hitzman & Large, 1896; James, 2010), descritos principalmente no condado de Limerick.

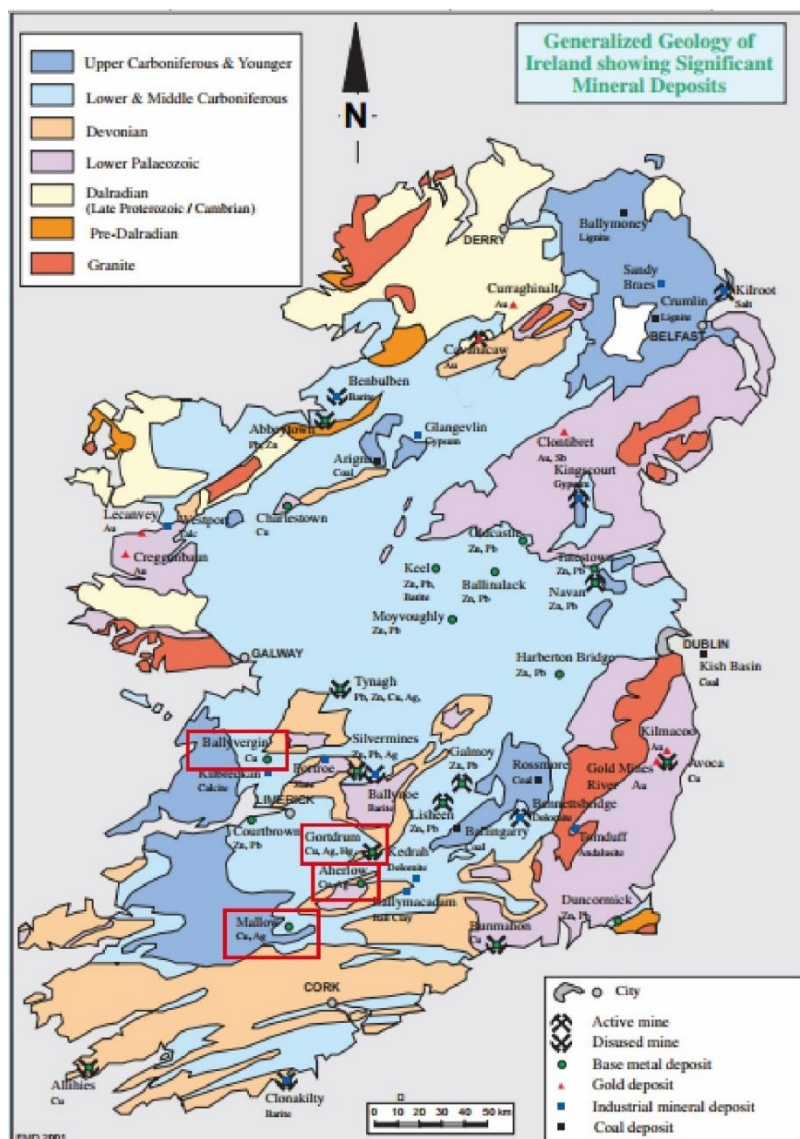


Figura 7: Mapa regional da geologia da Irlanda contendo a localização das principais minas de Zn-Pb ao Centro-Norte da Irlanda. No sul da Irlanda estão localizados os depósitos de Cu-Ag semelhantes ao distrito de Mallow marcados em vermelho – Ballyvergin, Gortdrum e Aherlow (Exploration and Mining Division Ireland, 2005).

Ainda, localizado próximo a Mallow, o depósito de Cu-Ag-Hg de Gortdrum (Figura 7), tem associação com o complexo vulcânico da sinclinal de Limerick (Steed, 1987). Outro depósito com mineralização semelhante a Mallow e Gortdrum, é o Ballyvergin no condado de Clare (Andrew, 1987), que possui na região de Steele's Turret, a 10 km ao sul de Ballyvergin, registros de cinzas com granulação grossa, lapilli-tufos e olivina basaltos com vesículas, também datados do Estágio *Asbian*.

2.2 GEOLOGIA DO DEPÓSITO DE TULLACONDRA

Sobre a arquitetura das unidades litológicas que compõem as sucessões carboníferas que hospedam o depósito de *Tullacondra*, estas recobrem o ORS e encontram-se na porção norte da anticlinal de *Kilmaclenine* (Figura 8 e 9). A compressão N-S gerada pela Orogenia Herciniana, mais intensa na porção sudoeste da Irlanda, é responsável pela por tais estruturas em Mallow, cujos cavalgamentos colocam rochas devonianas do ORS do sul sobre o *Coal Measures* mais recente (Wilbur & Carter, 1986). A anticlinal (Figura 8), tem eixo E-NE com mergulhos suaves para norte e sul, ainda é cortada por cavalgamentos e falhas normais de direções, ENE-WSW e N-S, respectivamente.

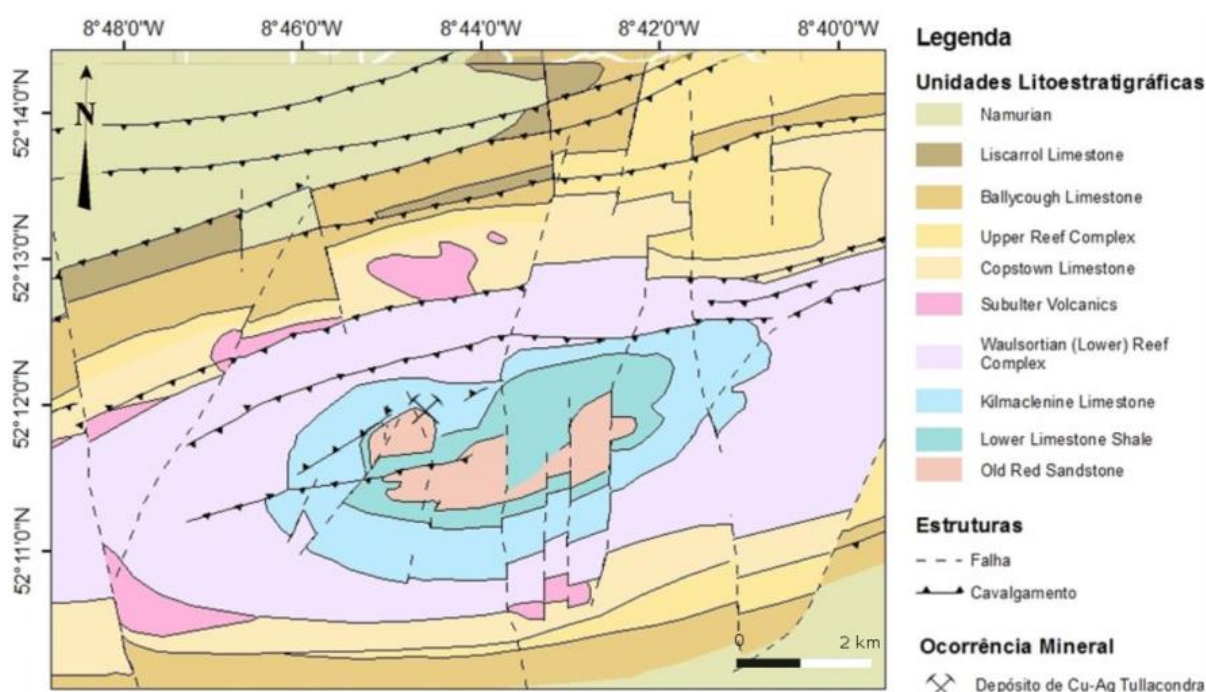


Figura 8: Mapa geológico da região ao noroeste de Mallow. A anticlinal de Kilmaclenine é principal estrutura regional do conjunto, assim como os falhamentos e zonas de cavalgamento (para norte), discriminado as principais unidades litoestratigráficas. No centro da anticlinal afloram as rochas do ORS e carbonatos que hospedam os depósitos de Cu-Ag de *Tullacondra*.(Wilbur & Carter, 1986 modificado por Silva, 2017).

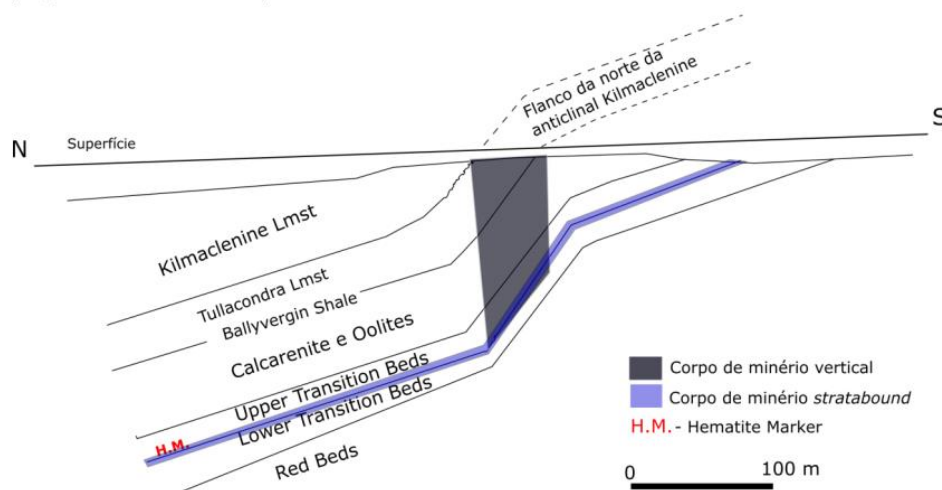


Figura 9: Secção transversal N-S do flanco norte da Anticlinal de Kilmacleanine, com a disposição geométrica dos principais corpos mineralizados. Na base, a geometria do corpo mineralizado em Cu-Ag tipo stratabound e o disseminado subvertical (Wilbur & Carter, 1986 modificado por Silva, 2017).

As sucessões basais são os conglomerados, arenitos, siltitos e argilitos do *Old Red Sandstone* (ORS) do Devoniano Superior com espessura aproximada de 500 m, que aparece exposta no centro da anticlinal e é coberta por carbonatos argilosos e calcarenitos do Estágio *Courseyan* pertencentes a unidade *Lower Sandstone Shale* composta da base para o topo por *Lower* e *Upper Transition Beds*, *Uniform Calcarenite*, *Lower Shaly Calcarenite*, *Oolitic Calcarenite*, *Silty Calcarenite*, *Upper Shaly Calcarenite*, *Ballyvergin Shale*, *Tullacondra Limestone* e a Formação *Kilmacleanine* (Figura 10; James, 2013).

Resumidamente, as unidades *Lower* e *Upper Transition Beds*, tem variação granulométrica dista, sendo a primeira mais arenosa e a segunda mais argilosa. Isto explica-se pela a mudança gradual entre uma sequência continental para outra marina, marcado por um evento de oxidação, onde ocorre uma camada pouco espessa contendo pequenas concentrações de hematita arredondadas entre as séries de transição. Esta é descrita como *Hematite Marker* e é considerada a primeira superfície cronoestratigráfica nesses depósitos (Wilbur & Carter, 1986).

	Thickness (metres)	Lithostratigraphic unit & code		Dominant litho-type
NAMURIAN	<5-120	OVB	Overburden	Sand, clay, silt, gravel, pebble/boulder beds
	>400	NAM	Namurian (undifferentiated)	Flaggy sandstone & shale
ASBIAN-BRIGANTIAN	200	LCL	Liscarrol Fm	Bedded dark bioclastic limestone, chert common
	200-400	BLC	Ballyclough Fm	Dark, fine-grained bedded limestone; cherty towards base
CHADIAN-ASBIAN	0-375	HZW	Hazelwood Fm (Upper Cracoan Reef Complex)	Unbedded, massive, pale calcilutite/micrite; thin calcarenite; lacks bryozoa
	150-300	CPS	Copstown Fm	Dark, bedded argillaceous limestone; cherty near base; may be dolomitic
COURCEYAN	0-100	VOL/INT	Subulter Volcanics	Dark, thin-bedded pyroclastics, sills[?] & dykes[?]
	450-600	WLR	Waulsortian [Lower] Reef Complex	Unbedded, massive, pale bryozoan calcilutite/micrite; may be dolomitised; maybe cherty/siliceous near base
	80-100	ABL	Kilmaclenine (Ballysteen) Fm	Uniform, bedded dark crinoidal calcarenite; may be dolomitised
	10-45	TCL	Tullacondra Limestone	Crinoidal with thin shale; cherty towards base
	70-90	LLS	Lower Limestone Shale (undifferentiated)	Shaly crinoidal limestone, shale, oolite & sandy calcarenite
	10-45	TSS	Transition Series	Conglomerate, shale, sandstone, calc sandstone
	U. DEVONIAN	>500	ORS	Old Red Sandstone
		PZL	Basement complex	Sandstone, siltstone, shale, basaltic volcanics & volcaniclastics.

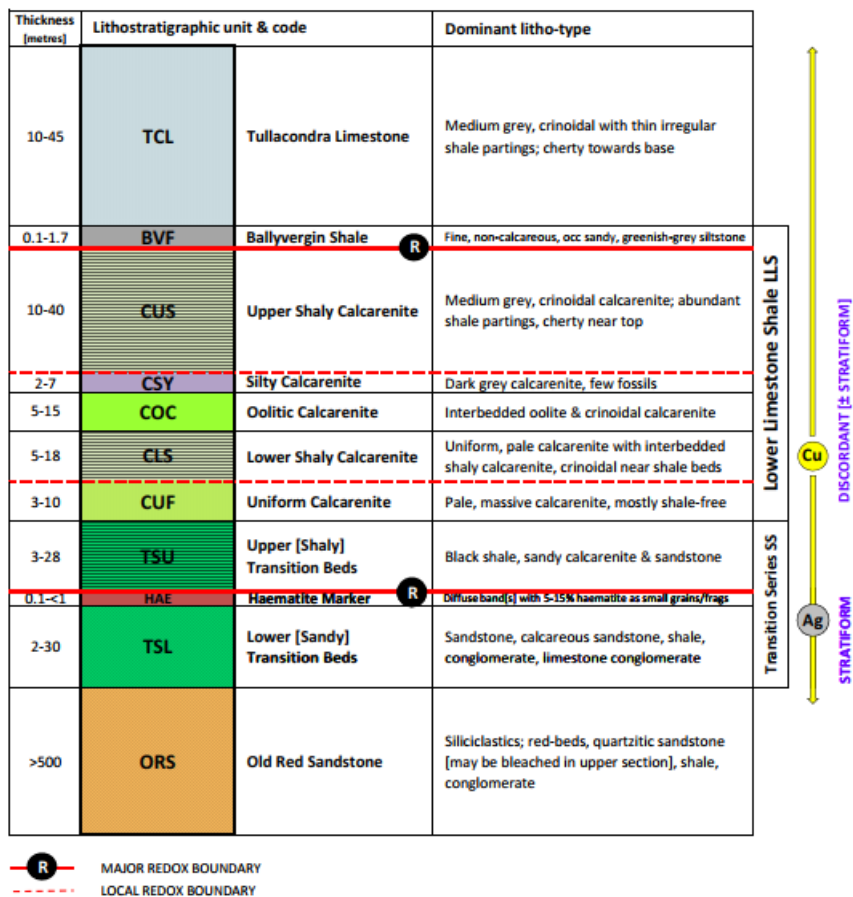


Figura 10: Organização estratigráfica para as unidades do Carbonífero Inferior para a região Centro-Sul da Irlanda. A espessura de cada unidade é descrita na imagem assim, como subdivisão das unidades na figura ao lado para o início do estágio do Courceyan. A posição relativa das mineralizações está na figura (James, 2013).

Conforme James (2013), acima das camadas anteriormente citadas estão depositadas sequências de calcarenitos maciços do *Uniform Calcareenite* e acima desta em seguida, o *Lower Shaly Calcareenite* – representado pela intercalação de calcarenitos maciços e calcarenitos com porções siltosas contendo crinóides. A próxima unidade é *Oolitic Calcareenite* contendo calcarenitos bioclásticos e oólitos, em seguida há o *Silty Calcareenite*, composto por calcarenitos cinza-escuros com poucos fósseis. E acima das unidades anteriores está a *Upper Shaly Calcareenite*, caracterizada por calcarenitos com crinóides com níveis contendo folhelhos e com algum cherte no topo.

Uma segunda camada com grande espaçamento lateral, o Folhelho de Ballyvergin, conhecido no sudeste da *Midlands* é usado como superfície de correlação

e logo acima deste encontram-se os carbonatos médios acinzentados e bioclásticos com finas intercalações de folhelhos do *Tullacondra Limestone*.

Sobre as unidades do *Lower Sandstone Shale*, ocorre calcarenito dolomitizado e na base silicificado (Figura 10) do Complexo de *Waulsortian*, localizados no centro da anticlinal com 450-600 m de espessura. No topo aparecem os diques máficos, níveis piroclásticos e tufo da unidade *Subulter* de idade *Chadian*. Sobrepostas ocorrem as demais unidades do centro para o topo, as formações *Copstown*, *Upper Reef Complex*, *Ballyclough*, *Liscarrol* e *Namurian*, que compreendem camadas de carvão, arenitos e carbonatos do final do Carbonífero Inferior (James, 2013).

Já a mineralização em Cu e Ag, como proposto por Wilbur & Carter (1986), está confinada às unidades basais carbonáticas do Carbonífero, mas que também aparece disseminada verticalmente entre as unidades do *Lower Limestone Shales* (LLS), *Transition Series* (SS) e *Old Red Sandstone* (ORS) como já exemplificado na Figura 9, sendo as duas primeiras os principais alvos de mineralizações, pois contém as duas superfícies limites de redução (James, 2013).

Depósitos próximos e geneticamente semelhantes a *Tullacondra* são os depósitos de Aherlow (Cu-Ag), Gortdrum (Cu-Ag-Hg) e Ballyvergin (Cu-Ag) como nos perfis da figura 11. Segundo Johnston (1999), estes depósitos têm caráter epigenético, pois os sulfetos aparecem substituindo carbonatos, ou seja, tem sua gênese após a deposição.

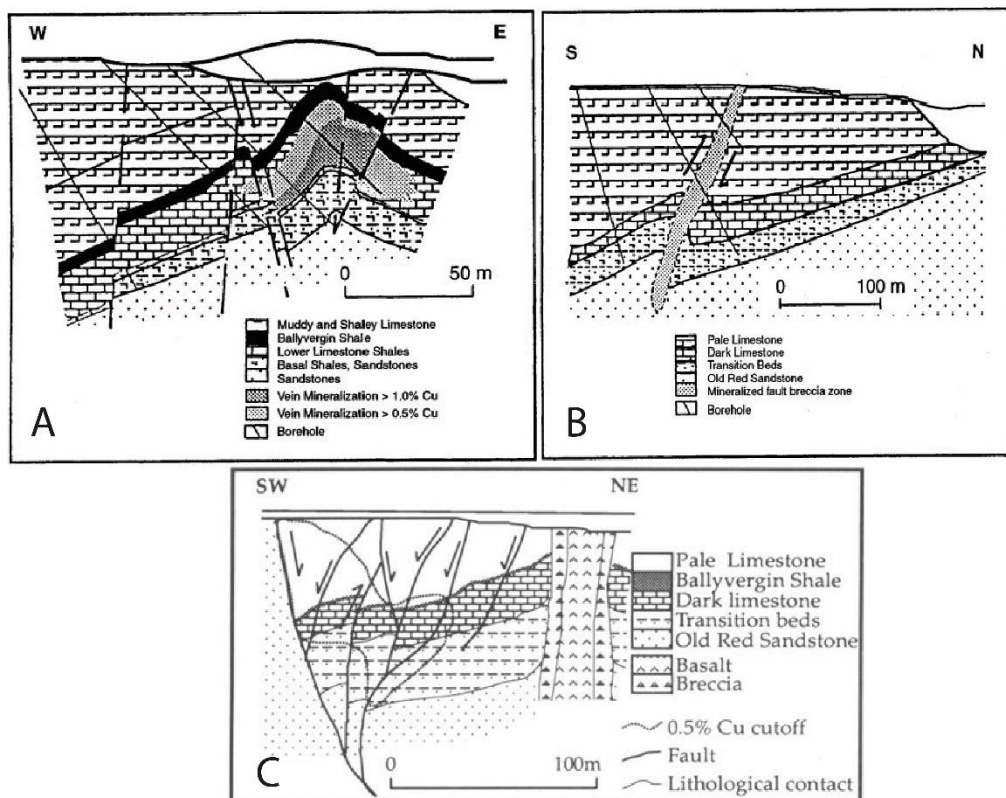


Figura 11: Seções dos depósitos da região Centro-Sul da Irlanda: A: Depósito de Cu-Ag de Ballyvergin; B: Depósito de Cu-Ag de Aherlow (Johnston, 1999) e C: Depósito de Cu-Ag-Hg de Gortdrum (Johnston, 1996).

Os principais minerais de minérios encontrados em Mallow são sulfetos de cobre, como a bornita e calcopirita. Ademais, ocorrem covelita e calcocita, também sulfetos de prata e arsênio, como a tennantita/tetraedrita, pirita e arsenopirita com menores quantidades de esfalerita e galena. Sobre os minerais de ganga, predominam a calcita, dolomita e quartzo, às vezes barita (Wilbur & Carter, 1986).

Segundo Silva (2017), para o furo M73-03, o zonamento dos minérios, segue a sequência: tennantita/tetraedrita/freibergita-argentotennantita → calcopirita → bornita → calcocita, encontrados na tabela 1 com as assembléias minerais e espessuras das unidades descritas.

Tabela 1: Estratigrafia da porção amostrada do furo M73-03 segundo Fitzell (1973) e caracterização petrográfica de alguns intervalos amostrados.

Unidade	Amostras	Espessura*	Características da seções polidas por unidade	Assembleia Mineral
Tullacondra Limestone	M73-3-27 M73-3-39 M73-3-69 M73-3-94	28 m	Calcarenito médio com bioclastos e veios de calcita. Localmente fino. Ocorrência de calcedônia em bioclastos e veios.	cal±dol±qtz±chal± mala±hem
Ballyvergin Shale	M73-3-119	1 m	Folhelho cinza esverdeado.	ms±cal±dol±qtz± ap±chl±zr±rt
Upper Shaly Calcarenite	M73-3-132 M73-3-143 M73-3-154 M73-3-162 M73-3-196 M73-3-203 M73-3-218 M73-3-233 M73-3-241 M73-3-254	40 m	Calcarenito médio cinza claro com bioclastos intercalados por camadas de marga e folhelho cinza claro a escuro. Feições estilolíticas são comuns e ocorrem algumas vezes no meio de clastos. Ocorrência de calcedônia em bioclastos e veios.	cal±dol±qtz±ms± chal±rt±ap±zr
Oolitic Calcarenite	M73-3-283 M73-3-293	9 m	Calcarenito médio cinza claro com feições estilolíticas locais. Ocorrência de quartzo euédrico.	cal±dol±qtz±ms ±zr
Lower Shaly Calcarenite	M73-3-318 M73-3-328	14 m	Marga fina a localmente média cinza esverdeada com feições estilolíticas locais.	cal±dol±qtz±ms ±rt
Uniform Calcarenite	M73-3-347	4 m	Arenito médio com feições estilolíticas locais.	qtz±cal±ms±rt
Upper Transition Series Beds	M73-3-374	9 m	Arenito médio esverdeado.	qtz±cal±ms±mnz
Lower Transition Beds	M73-3-393 M73-3-412	12 m	Arenito médio esverdeado e folhelho cinza escuro brechado com veio e vênulas de calcita.	qtz±cal±ms±rt

* Espessuras baseadas no log para o furo de sondagem M73-03 por Fitzell (1973). As profundidades das amostras coletadas podem ser observadas no anexo 1.

Sendo as principais texturas de minério encontradas nas lâminas polidas: 1) Disseminada (Figura 12a e 12b); 2) Paralela ao acamamento (Figura 12c); 3) Maciças discordantes a sub paralelas (Figura 12d); 4) Discordantes, hospedadas em veio, por percolação horizontal dos fluidos mineralizadores (Figura 12e, 12f e 12g) e 5) Associada a estilólitos, que comprova a cronologia dos sulfetos, podendo esta ser durante ou após mineralização, confirmando o caráter epigenético do depósito (Figura 12h).

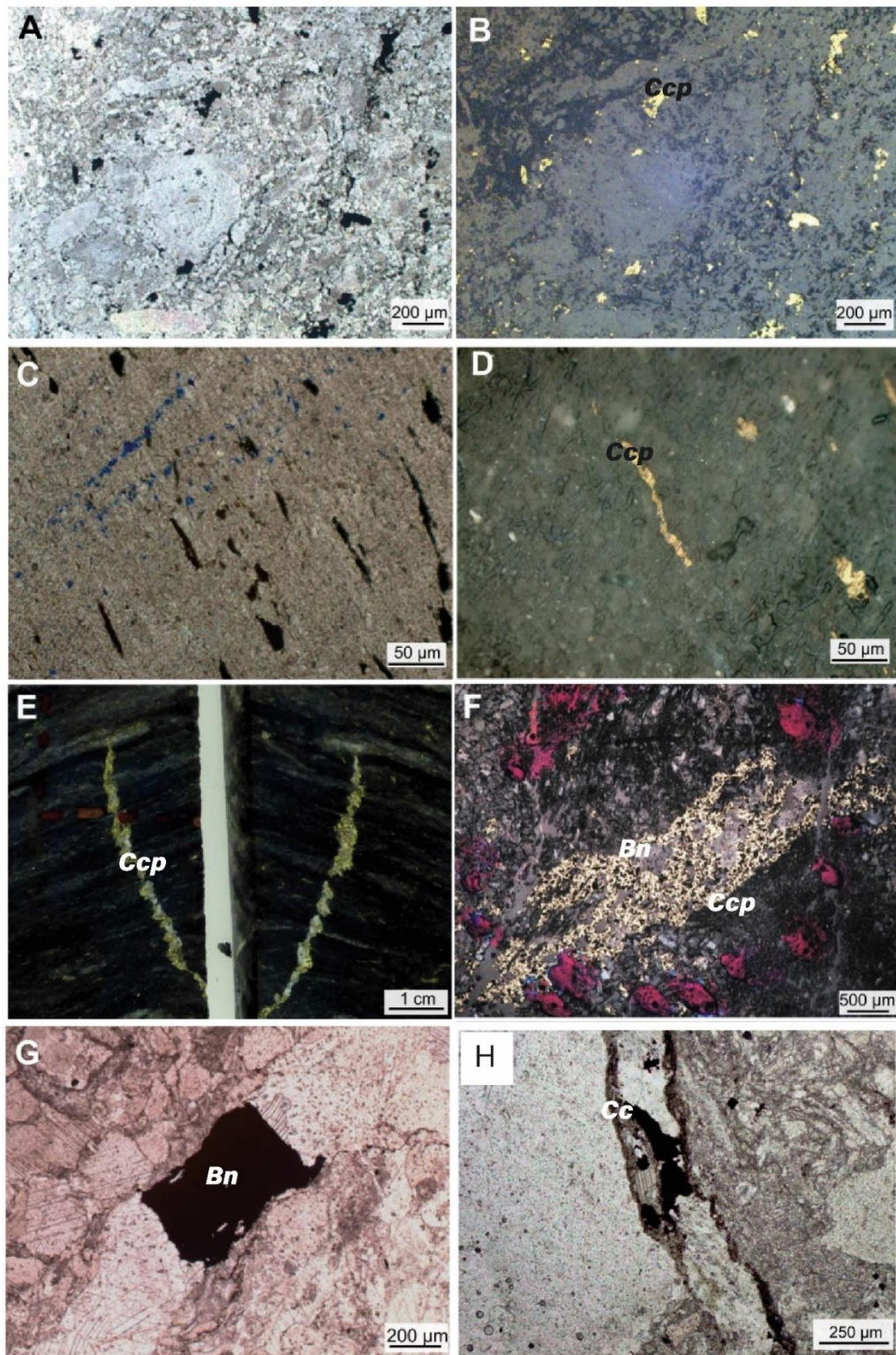


Figura 12: Fotomicrografias das lâminas polidas do furo M73-03 com as principais texturas de minério descritas por Silva (2017). **A e B:** Calcopirita disseminada nos calcarenitos. Foto em luz plano polarizada e refletida. **C e D:** Calcopirita disposta segundo o acamamento. Foto em luz plano polarizada e refletida. **E:** Veio discordante e maciço de calcopirita em amostra macroscópica. **F:** Veio em luz refletida com a paragénesse Bn-Ccp. **G:** Cristal de Bn em veio de calcita e **H:** Mineralização em estilólito contendo cristal de Cc (Adaptado de Silva, 2017).

Sobre os modelos metalogenéticos para o depósito de cobre de *Tullacondra*, são sugeridos por Silva (2017) dois principais modelos, sendo o primeiro associado ao encontro de fluidos oxidantes ricos em Cu, As e Fe com camadas redutores ricas em matéria orgânica, semelhante ao zoneamento mineral que ocorre no depósito de *White Pine (Sediment-hosted copper sulfide deposit)*, onde os sulfetos ricos em Cu, como a bornita e calcocita substituem os sulfetos ricos em ferro (calcocita e pirita) em folhelhos carbonosos, conforme Ripley *et al.* (1985).

O segundo modelo é correlato a gênese dos depósitos de Zn-Pb do tipo *Irish*. Tais depósitos são gerados em ambientes distensionais com sulfetos de Zn-Pb hospedados em sedimentos, como as rochas carbonáticas do Carbonífero Inferior na Irlanda. Esses depósitos tem grande variabilidade de suas características em comum com outros depósitos como *Mississippi Valley-type* ou SEDEX, sendo assim difícil sua classificação. São em geral depósitos tardi-diagenéticos, controlados por falhas e associados a fraturas e brechas, em distensão da margem continental com temperaturas moderadas a baixas (280-70°C) e temporal -e espacialmente associados à atividade vulcânica.

Segundo Wilkinson & Hitzman (2010), nos depósitos hospedados no *Walsortian Limestone* no sul da Irlanda alcançaram temperaturas de até 280°. O fluido mineralizador, conforme dados de inclusões fluidas, é uma mistura entre um fluido com salinidade baixa a moderada (8-19 wt% NaCl equiv.), redutor e pobre em enxofre, contendo metais e de temperatura moderada (130 to 240°C) com uma salmoura (alta salinidade, >20 wt% NaCl equiv.) de baixa temperatura (50-130°C), enriquecido em Br, durante a formação do minério (Wilkinson & Hitzman, 2010).

Portanto, os fluidos geradores dos depósitos de Zn-Pb do tipo *Irish* são combinação de fluidos derivados da água do mar, levemente ácidos de caráter descendente que lixiviaram os metais de rochas carboníferas (Willkinson & Hitzman, 2010). Processo o qual, foi facilitado pelo vulcanismo durante o *Chadian*, representado pelas rochas piroclásticas da unidade vulcânica de *Subulter* (Wilbur & Carter, 1986), as quais podem ter sido a fonte de calor, fluidos e metais para a gênese desses depósitos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da monografia foram realizadas no Laboratório de Laminação do LAMIR (Laboratório de Análises de Minerais e Rochas) do Departamento de Geologia (DEGEOL) da UFPR, 15 lâminas polidas para descrição petrográfica por microscópio de luz polarizada realizados no Laboratório de Pesquisa em Microscopia (LAPEM), também pertencente ao DEGEOL. O microscópio de luz transmitida e refletida utilizado foi o Olympus® - BX60 com câmera acoplada Nikon® - Coolpix 990 MDC Lens para as fotografias das lâminas, o material de apoio para a classificação das rochas carbonáticas foi Folk (1962) e para identificação dos sulfetos foi *Copper Minerals under the microscope* (Hjeltström, 2015) e *The Ore Minerals under the microscope* (Pracejus, 2008). As amostras laminadas são referentes ao furo M73-11, de testemunhos coletados pelo orientador deste trabalho, na Irlanda. Igualmente, esses testemunhos foram descritos, comparados com dados de perfil de sondagem de Fitzell (1973) e Wilbur (1973a e 1973b) e agrupados segundo as unidades litoestratigráficas da região.

Para este trabalho ainda foram reutilizadas as descrições petrográficas de 23 lâminas polidas de Silva (2018) para o furo M73-03, a fim de comparar as texturas de minério, o conteúdo mineral principalmente a paragénese dos sulfetos. Foram realizadas ainda análises químicas de rocha-total para **38** amostras (**14** do furo M73-11 e **24** do furo M73-03) para comparação com os dados obtidos para ambos os furos de sondagem. Através da pesagem de aproximadamente 30 g de amostra e moagem em panela de carbeto de tungstênio no moinho n°0139 da marca AMEF, no LAMIR intercalados com processos de descontaminação com pulverização de quartzo nas panelas após cada moagem.

Tais dados foram analisados e fornecidos pelo Laboratório ALS Global e financiado pela empresa “Diversified Asset Holdings” (Tabela 2).

Tabela 2 - Rotina de análise dos elementos do Laboratório ALS Global

Análise	Elementos Analisados
---------	----------------------

<p>Elementos maiores: SiO₂, Al₂O₃, FeOT, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, Cr₂O₃, TiO₂, MnO, P₂O₅, SrO, BaO, Ag, Cd, Co, Cu, Li, Mo, Ni, Pb, Sc e Zn</p> <p>(digeridos com quarto ácidos)</p>	<p>ICP-AES (<i>inductively coupled plasma optical emission spectrometry</i>) e determinação do LOI</p>
<p>Ba, Ce, Cr, Cs, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Nb, Nd, Pr, Rb, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, W, Y, Yb e Zr</p> <p>(digestão por ácido nítrico, clorídrico e fluorídrico, fundidos em pérolas)</p>	<p>ICP-MS (<i>inductively coupled plasma – mass spectroscopy</i>)</p>
<p>As, Bi, Hg, In, Re, Sb, Sc, Te e Tl</p> <p>(digeridos por água régia)</p>	<p>ICP-MS</p>

Os limites de detecção para os elementos traço variam entre **0,002 até 100 ppm. Carbono total e enxofre foram analisados através do método de forno Leco (adaptado de Cordeiro *et al.*, 2018).**

Foram ainda utilizados dados obtidos com auxílio da mestrando e colega de pesquisa, Andressa de Araújo Silva, que forneceu fotografias das análises usando Alizarina (para distinguir os carbonatos, sendo a cor azul para carbonatos de Fe, vermelho para calcita e sem cor, dolomita) em amostras macroscópicas e também nas lâminas do furo M73-03 e 19. Bem como o fornecimento de algumas fotografias das lâminas do furo M73-19 para comparação com os sulfetos do furo M73-03 e 11.

Os gráficos dos dados de rocha-total foram confeccionados no programa Microsoft® Excel® 2016 e posteriormente interpretados. As colunas estratigráficas foram geradas no programa Sedlog®, software grátis fornecido pela Univerisade de Londres. As seções e os perfis do depósito de *Tullacondra* foram digitalizadas e desenhadas no programa de edição Adobe Illustrator® CC 2018, assim como o tratamento das figuras aqui apresentadas.

4. RESULTADOS

4.1 Petrografia

São apresentados os dados petrográficos para amostras coletadas do furo M73-11, obtidos pela análise de seções polidas sob luz transmitida e também refletida, para definição dos minerais opacos. Um resumo dos dados de log de perfuração referentes às lâminas descritas, é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Estratigrafia da porção amostrada do furo M73-11 segundo Wilbur (1973a) e caracterização petrográfica de alguns intervalos amostrados.

Unidade	Amostras	Espessura	Características Gerais das Unidades descritas	Assembléia Mineral
Upper shaly calcarenite	M-11-290	42 m	<i>Calcarenito finos a muito finos, escuros, bioclásticos, contendo bandas finas de folhelho que aumentam com a profundidade. Ocorrem calcopirita e bornita disseminados</i>	cal±chal±ccp±bn±td/tn±ox
	M-11-296			cal±chal±qtz±ccp±bn±cc±apy
	M-11-310			cal±chal±ccp±tn/td
	M-11-312			Sem lâmina
Oolitic calcarenite	M-11-319	57 m	<i>Calcarenito cinza-escuro com oólitos e também com material bioclástico com bandas de folhelhos, onde aparecem vênulas sub horizontais contendo minerais de calcopirita/bornita, veio de calcita contendo cristais de bornita, bem disseminada e vênulas de calcita cortando o acamamento.</i>	cal±chal±qtz±ccp
	M-11-336			cal±chal±qtz±ccp±bn±py±ox±rt
	M-11-347			cal±ccp±bn±cc±apy±rt
	M-11-359			cal±qtz±chal±bn±cc±apy±td/tn±rt
Lower shaly calcarenite	M-11-389	18 m	<i>Intercalações entre calcarenitos cinza-claros bioclásticos e bandas argilosas (folhelhos), por vezes aparecem cristais de bornita e calcopiritas euédricas em veios, mas também finos disseminados. São observados vênulas de calcita cortando o acamamento e intraclastos.</i>	cal±qtz±mc±bn±ccp
Uniform calcarenite	M-11-404	15 m	<i>Calcarenito cinza-claro médio, sem porções com folhelho. Comum a ocorrência de veios de calcita cortando o acamamento e também vênulas de calcita segundo o acamamento. Estrolitos são observados, bem como calcopirita e bornita em agregados finos disseminados.</i>	cal±chal±qtz±ccp±bn±ox±rt
				qtz±cal±ms±ccp±bn±

Upper transition beds	M-11-422	27 m	<i>Intercalações entre folhelhos e calcarenitos finos fossilíferos e calcarenitos cinza-escuros médios, contendo minerais micáceos. Há vênulas e veio de calcita subhorizontal, que contém bornita e calcopirita, cortando o acamamento. Há também bornita e em menores quantidades calcopirita disseminada. Aparecem cristais subédricos e arredondados de hematita.</i>	apy
	M-11-431			Sem lâmina
Lower transition beds	M-11-442	32 m	<i>Predominam fácies arenosas com arenitos contendo carbonato intercaladas com bandas de folhelhos cortados por veios de calcita contendo bornita.</i>	qtz±mc±cal±ms± ccp±bn±apy
	M-11-450			qtz±mc±cal±ms± ccp±bn±apy
Old Red Sandstone	M-11-498	52 m	<i>Arenitos avermelhados e cinza-esverdeados maciços com (aspecto recristalizado) cortados por veios de calcita.</i>	qtz±mc±cal±ms±ox±bn
	M-11-510			qtz±mc±ms±cal±ox

* Espessuras baseadas no log para o furo de sondagem M73-11 por Wilbur (1973a). As profundidades das amostras coletadas podem ser observadas no anexo 1.

Diferentemente do furo M73-3, já descrito por Silva (2017), o furo M73-11 foi amostrado a partir da unidade *Upper shaly calcarenite*, assim contém informações em maior profundidade do depósito de *Tullacondra*, como a superfície cronoestratigráfica, a *Hematite Band* e a unidade basal do depósito, o *Old Red Sandstone*. A seguir, são descritas em detalhes os dados petrográficos, bem como as texturas de minério e demais elementos vistos em lâmina polida. As rochas hospedeiras do depósito são principalmente calcarenitos, margas e folhelhos com idades do *Courseyan* Inferior e descritas a seguir, segundo as unidades do topo para a base.

Upper Shaly Calcarenite (CUS)

As amostra referentes a essa unidade são M-11-290, 296, 310 e compõem a intercalação de níveis mais pelíticos com níveis mais arenosos (Figura 13a). São calcarenitos e folhelhos com bioclastos substituídos por calcedônia, e os sulfetos, calcopirita, bornita, calcocita, arsenopirita e tetraedrita/tennantita são agregados muito finos disseminados segundo o acamamento (Figura 13b e c). A matriz dessas rochas é carbonática, com alguns cristais de calcita (1 mm) e também fósseis. Na amostra M-11-290, estilólitos são abundantes, onde sulfetos com hábitos euédricos (hexagonais e tabulares) estão contidos. Ademais, os sulfetos tendem a ocorrer disseminados no

nível arenoso da lâmina. Já na amostra M-11-296, os sulfetos se concentram na porção mais siltosa, também ocorrem estilólitos (Figura 13d) e vênulas de calcita segundo o acamamento, onde também ocorrem sulfetos orientados.

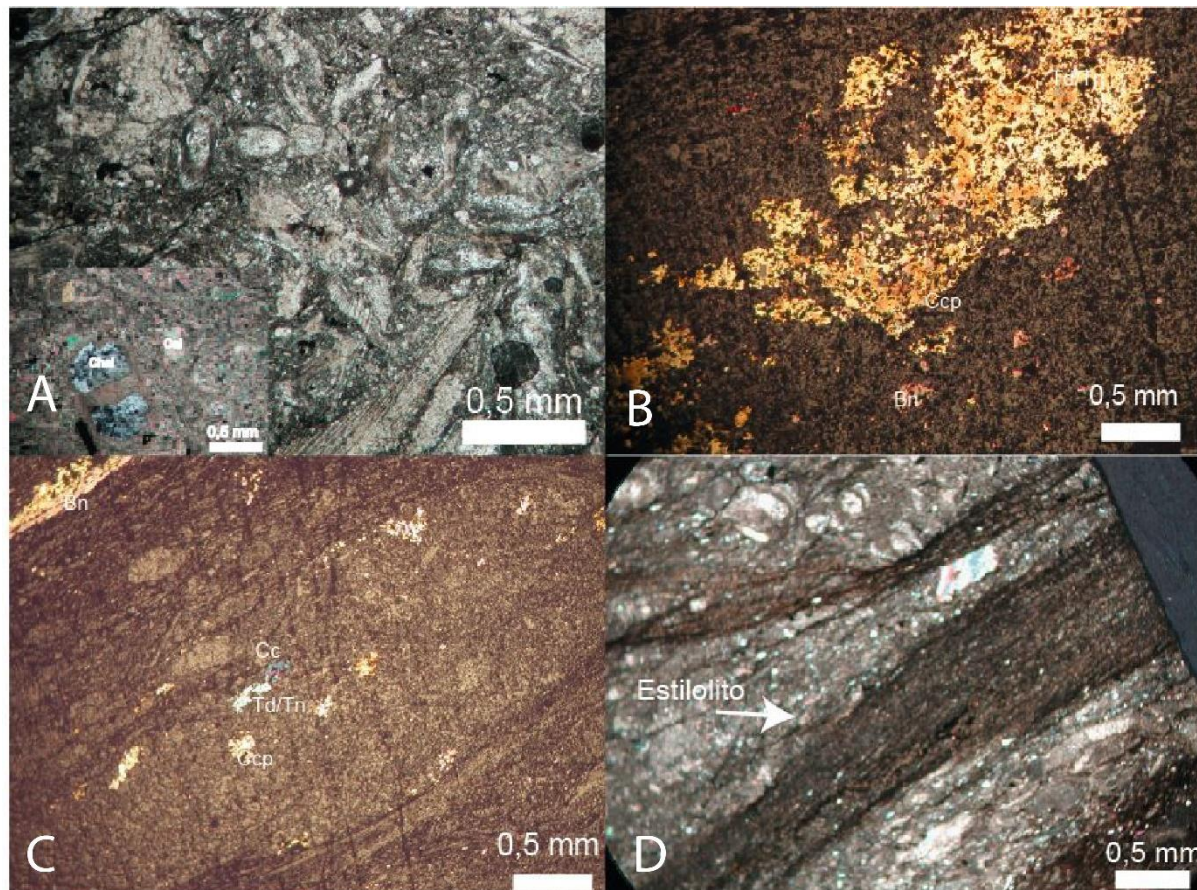


Figura 13: Fotografias da unidade Upper Shaly Calcarenite. **A:** Em luz transmitida com nicóis em cruzado, o arcabouço e matriz micrítica. Em detalhe, quadro com fóssil substituído por Chal. **B:** Cristal contendo sulfetos de Cu e As/Sb disseminado. **C:** Cristais de sulfetos em luz refletida. **D:** Em luz transmitida os estilólitos contendo muscovita e quartzo.

Oolitic Calcarenite (COC)

Esta unidade é caracterizada pela grande quantidade de oólitos encontrados na matriz carbonática. São principalmente calcarenitos com calcedônia substituindo os núcleos de calcita de oólitos e fósseis (Figura 14a e b). Os sulfetos aqui descritos são os mesmos da unidade anterior, com predomínio de textura disseminada em agregados anédricos. Ocorrem também feições de substituição, ou seja, tanto nos oólitos quanto nos fósseis contendo sulfetos por substituição dos carbonatos (lâmina M-11-347, 359). Vênulas cortando o acamamento também contém e distribuem os sulfetos entre a matriz (lâmina M-11-359) e a paragênese entre calcocita-bornita, além

de um *overprinting* das fases sulfetadas, calcopirita e bornita sob tetraedrita/tennantita e arsenopirita (Figura 14 c e d).

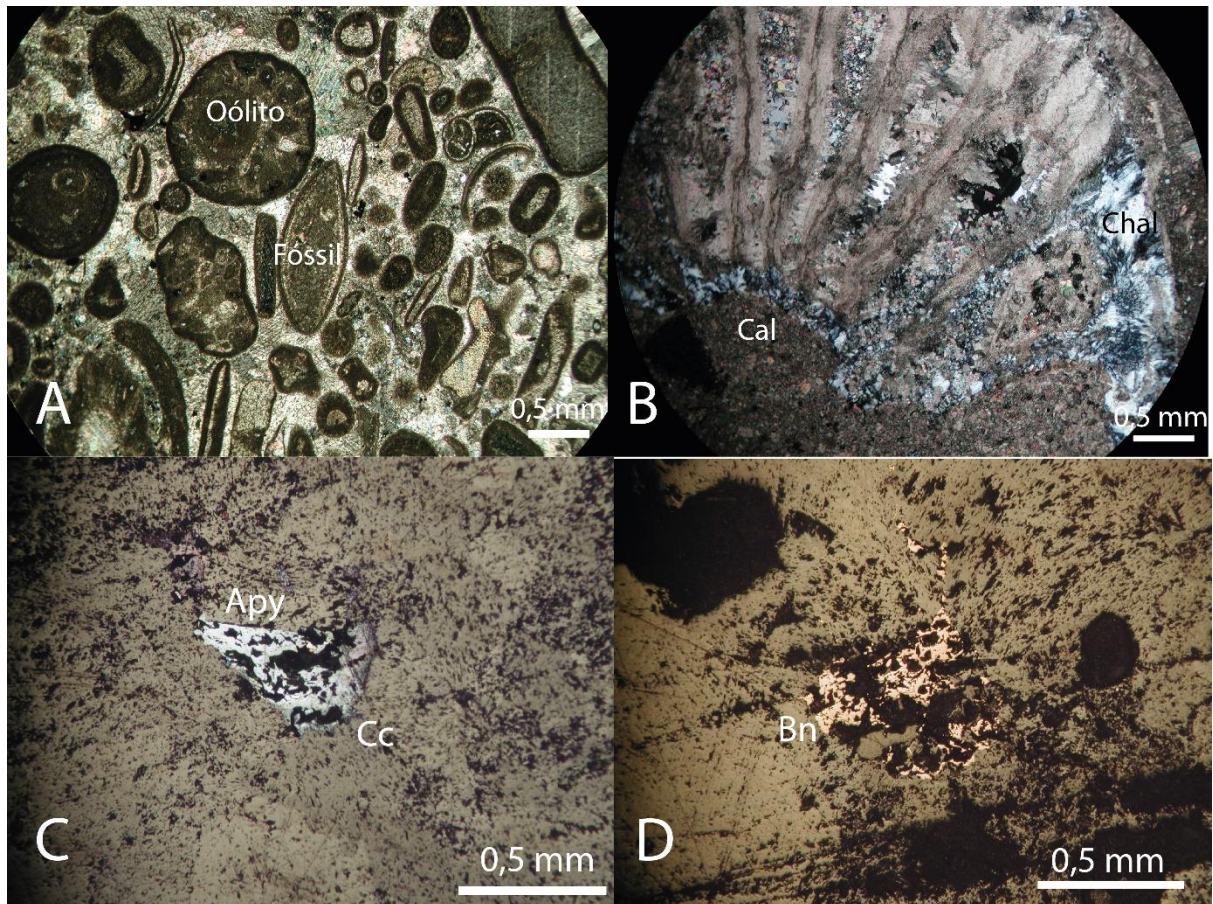


Figura 14: Fotomicrografias da Unidade Oolitic Calcarene. **A:** Em luz transmitida com nicóis cruzados, o *floatstone*, que representa as rochas da unidade. **B:** Também em nicóis cruzados, pisólito substituído por calcedônia. **C:** Sob luz refletida, cristal de arsenopirita envolto por bordas de Calcocita. **D:** Ainda sob luz refletida, cristal de bornita com pontos brancos onde ocorre arsenopirita.

Lower Shaly Calcarene (CLS)

A amostra M-11-389 que representa este intervalo, não é inteiramente representativa, pois mostra um veio de calcita (Figura 15a) que ocorre no intervalo que contém calcarenitos e folhelhos. Entretanto, ocorre a paragênese de sulfetos bornita-calcopirita disseminadas (Figura b e c) entre os cristais de calcita. Foi ainda observado alguns cristais de quartzo alongados com extinção ondulante. Inclusive, foi descrita por Wilbur (1973a), a ocorrência de uma mancha de prata nativa no intervalo 379,5' (115,67 m de profundidade).

Uniform Calcarene (CUF)

Intervalo definido pela ocorrência de apenas calcarenitos cinza-escuros sem intercalações de folhelho ou marga. Na lâmina M-11-404, há uma porção do calcarenito que contém oólitos em matriz de cimento esparítico (Figura 15 d), com substituições de oólitos e fósseis por sulfetos. Um veio de calcita com estilólitos escuros contendo bornita disseminada, separa o calcarenito anterior de outra fácies mais quartzosa. Esta porção contém quartzos angulosos entre a matriz esparítica e migra abruptamente para outra fácies que contém mais oólitos e fósseis em matriz esparítica. Os sulfetos, calcopirita e bornita, estão disseminados em ambas as fácies.

Upper Transition Beds (TSU)

Segundo James (2013) e Wilbur & Carter (1986), a unidade de transição superior contém margas intercaladas com calcarenitos e arenitos. Na lâmina M-11-422 são observadas lâminas escuras com granulação muito fina composto por quartzo e carbonato (marga) intercaladas com porções mais claras, composto por matriz carbonática com quartzo muito fino e oólitos/fósseis definindo a fácies calcarenito. Cristais muito finos e ripiformes de muscovita ocorrem disseminados. A arsenopirita ocorre disseminada e alongada na matriz e em estilólitos (Figura 15e), além da calcopirita e bornita nos núcleos e bordas de fósseis e cristais maiores. O acamamento é cortado por veio de calcita que contém calcopirita-bornita e arsenopirita.

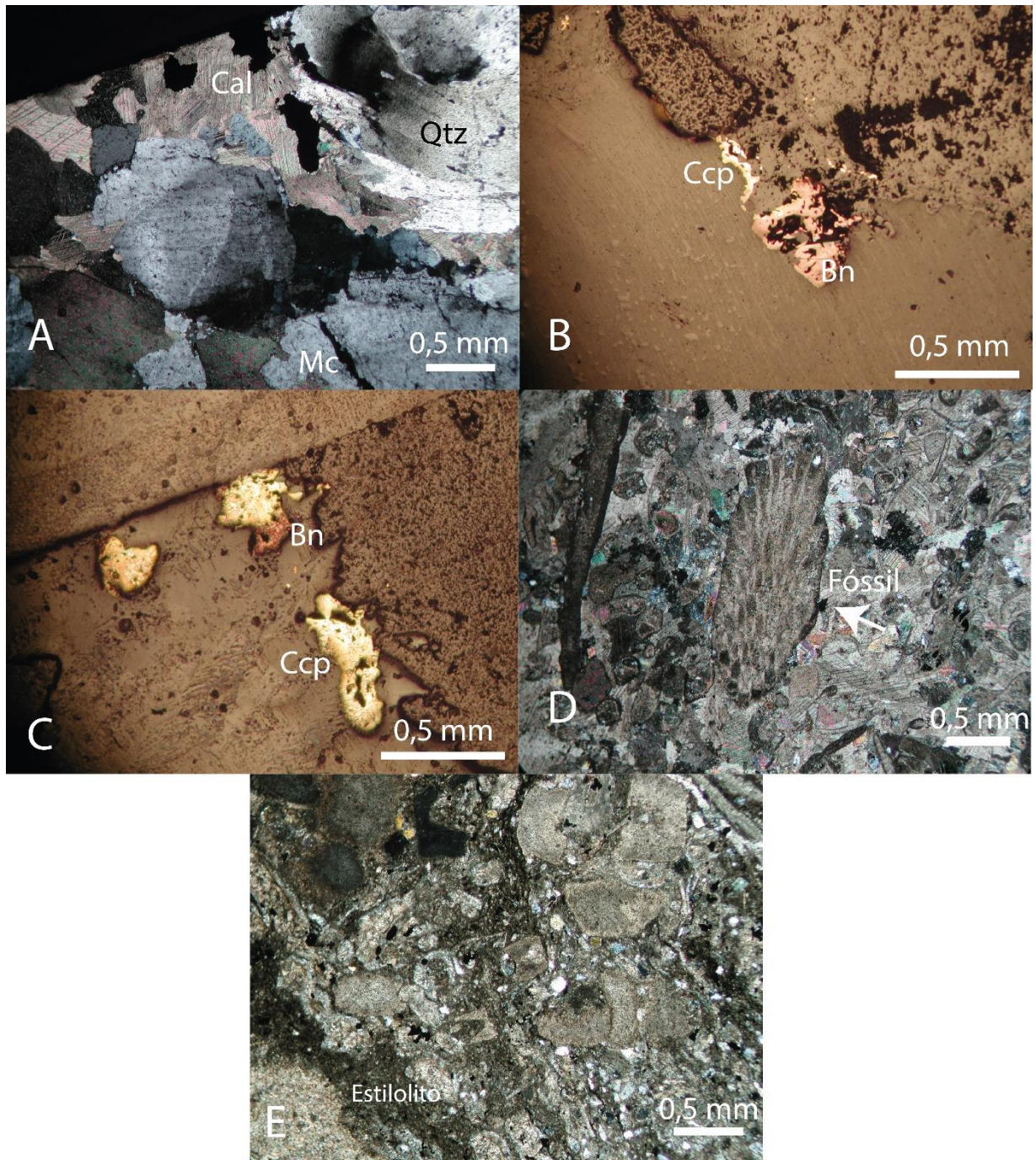


Figura 15: A, B e C: Fotografia da Unidade Lower Shaly Calcarenite, representada por veio de calcita, com quartzo e feldspato contendo sulfetos (A), com cristais de calcopirita e bornita (B, C) em luz refletida. D: Arcabouço da Unidade Uniform Calcarenite em luz transmitida com nicóis cruzados. E: Arcabouço da Unidade Upper Shaly Transition Beds em luz transmitida com nicóis cruzados, estilólitos são comuns nesta unidade.

Lower Transition Beds (TSL)

Inverso da unidade acima descrita, predomina a ocorrência de fácies arenosas em detrimento da fácies pelíticas. Tanto a lâmina M-11-442 e 450, são arenitos com calcáreos. O arcabouço é definido por cristais finos de quartzo, microclínio e muscovita, estas últimas com hábitos alongados (Figura 16a e c). A matriz é levemente orientada e os contatos são ondulados e às vezes retilíneos. O carbonato ocorre na matriz que perfaz 20% dos minerais modais da rocha. Ocorrem estilólitos com material oxidado e turvo com sericita e também sulfetos, como bornita (Figura 16b), mas também calcopirita arsenopirita, como disseminados finos na matriz e na borda de cristais.

Old Red Sandstone (ORS)

São descritos aqui os arenitos que pertencem ao topo da unidade *Old red sandstone*, visto que a ainda há a presença da matriz carbonática microcristalina (10%). A composição do arcabouço é principalmente quartzo e menor parte muscovita e feldspato alcalino (Figura 16d). São grãos finos e angulosos com leve orientação, ocorrem também porções com grãos de contatos serrilhados (Figura 16e) onde não aparece a matriz carbonática. São descritos alguns veios com calcita, feldspato alcalino e quartzo nas bordas (Figura 16d), que possuem bornita muito fina disseminada. Ademais, ocorrem minerais oxidados com coloração avermelhada.

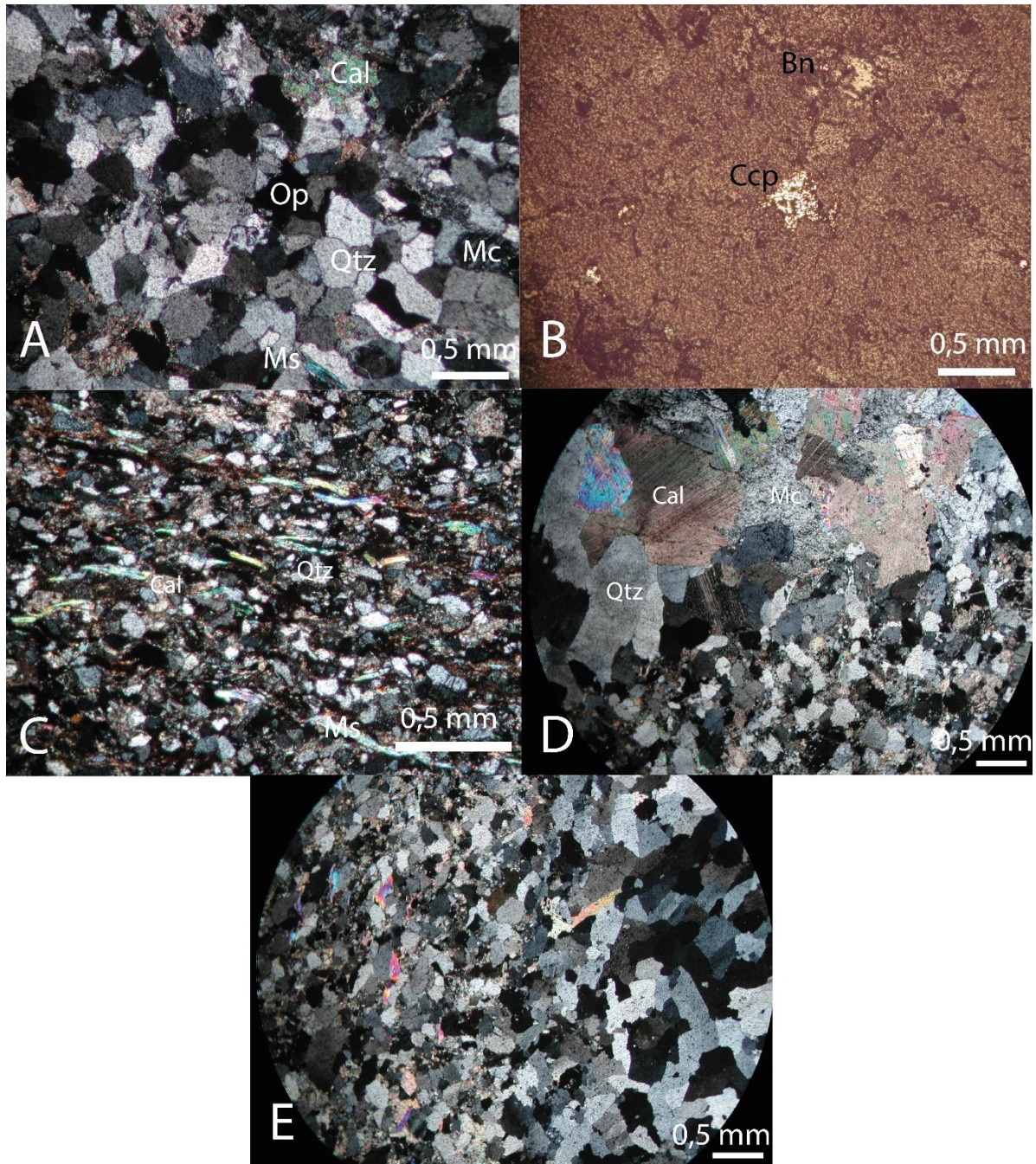


Figura 16: A, B e C: Fotomicrografias da Unidade Lower Transition Beds, sob luz transmitida em A e C, arcabouço contendo muscovita ripiforme e microclínio e com cristais alongados (orientados) em C. **B:** Sob luz refletida, cristais disseminados de Bornita e Calcopirita. **D e E:** Fotografia da Unidade Old Red Sandstone, com veio de calcita, quartzo e microclínio em D. **E:** Contato do calcarenito e arenito com muscovitas ripiformes.

Assim, conforme as descrições e as profundidades para o furo M73-03 e 11 de Fitzell (1973) e Wilbur (1973a), foram montadas as seguintes colunas estratigráficas na Figura 17, qual pode-se observar os intervalos mineralizados e de ocorrência das principais fases sulfetadas.

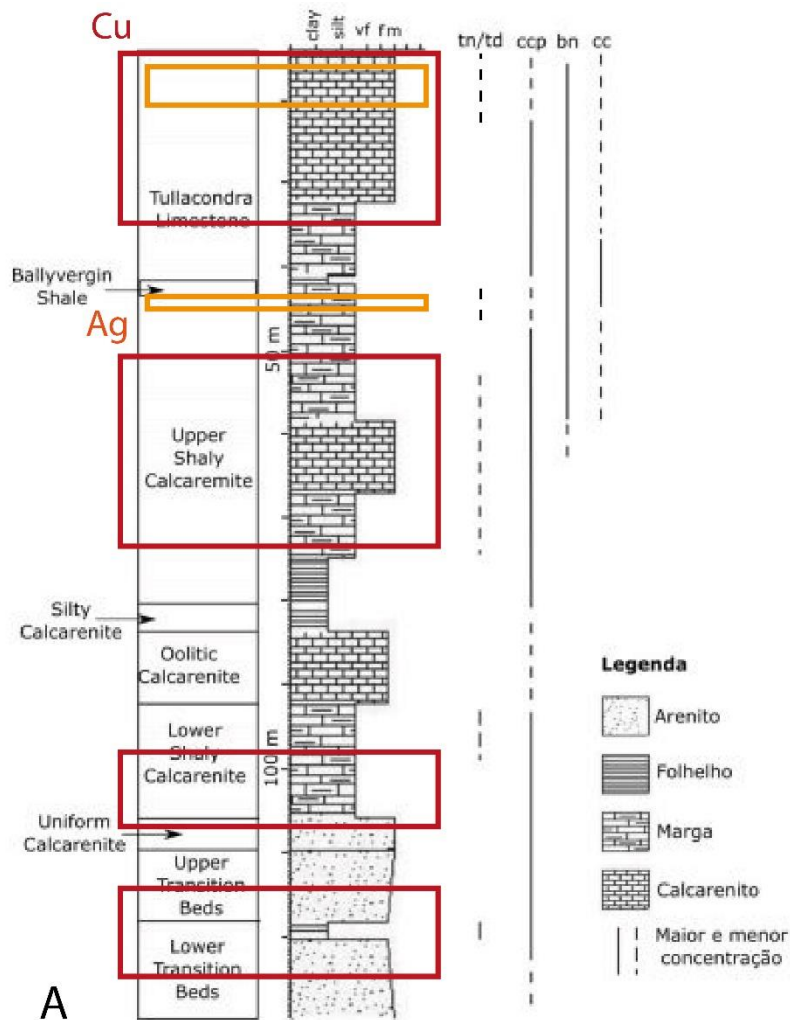
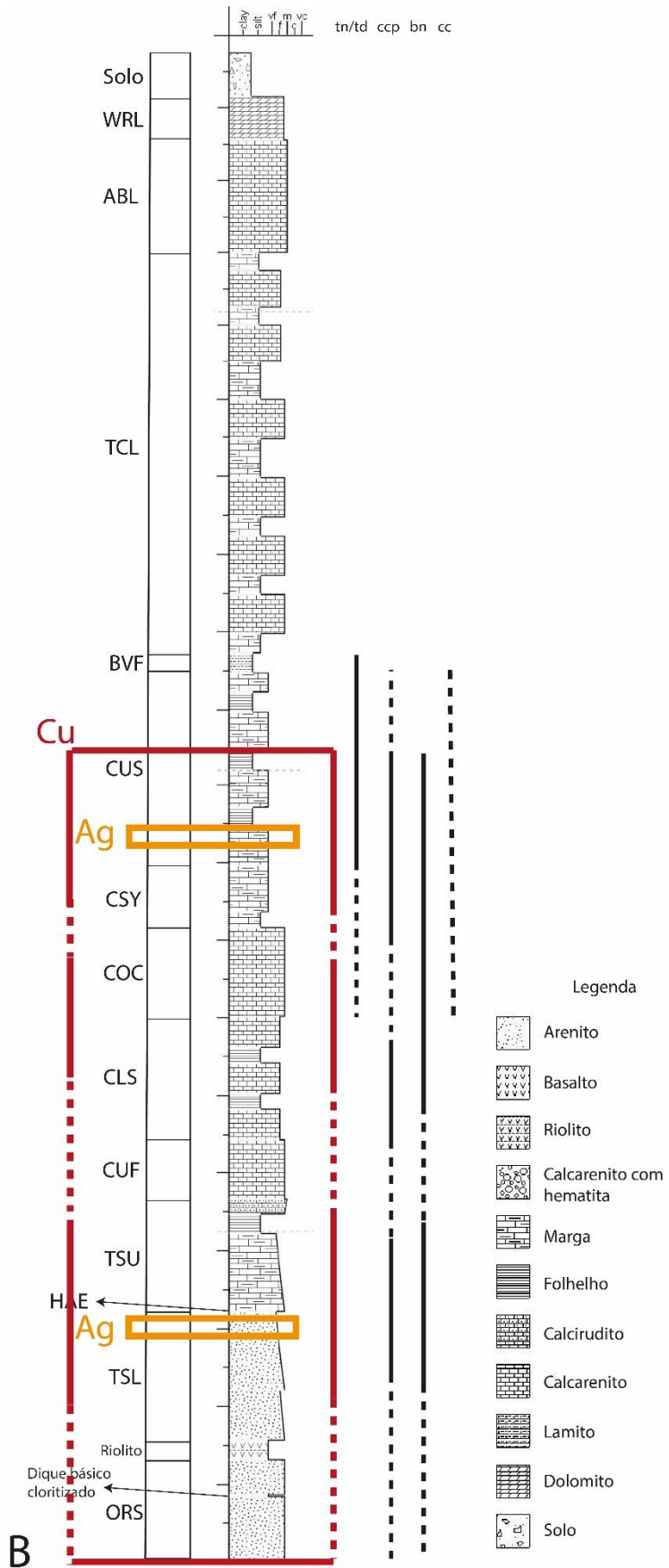


Figura 17: Perfil estratigráfico para os furos **M73-03 (A)** e **M73-11 (B)** na próxima página, contendo além das unidades litoestratigráficas descritas nos respectivos relatórios de sondagem com base nas profundidades dadas por Fitzell (1973) e Wilbur (1973a; anexo 1), a delimitação das principais fases sulfetadas descritas nas lâminas. Os quadros em vermelho indicam o intervalo com a mineralização verticalizada em Cu. Os quadros em laranja mostram os intervalos onde a mineralização stratabound em Ag ocorre. Figura A adaptada de Silva (2017). **Figura B** produzida pela autora com escala 1:20. WLR:Klimaclenine Limestone, ABL: Waulsortian Formation, TCL: Tullacondra Limestone, BVF: Ballyvergin Shale, CSY: Silty Calcarenite, COC: Oolitic Calcarenite, CLS: Lower Shaly Calcarenite, CUF: Uniform Calcarenite, TSU: Upper Transition Beds, TSL: Lower Transition Beds e ORS: Old Red Sandstone.



4.2 Geoquímica de Rocha-Total

Através dos dados obtidos pela análise de química de rocha-total para os furos M73-03 e 11 foram selecionados alguns elementos importantes para o melhor entendimento do comportamento dos elementos químicos no perfil do depósito.

Entre os elementos selecionados para o furo M73-03 foram o SiO₂, CaO, MgO, FeOT, K₂O, Cu, Sb, Ag, Co, Zn, Pb e Ni, com os seguintes gráficos entre os elementos citados, como apresentado no quadro com os gráficos 1. O Gráfico 1a mostra correlação positiva entre SiO₂ e K₂O nas unidades BVF, CUS, CLS, TSU e TSL, que sugere predomínio de silicatos ricos em potássio, como feldspatos e muscovitas, e argilominerais nas porções mais silicosas e estilolíticas, em conformidade com os dados petrográficos.

Conforme o esperado, FeOT e o CaO tem correlação negativa (Gráfico 1b), embora haja certa proporcionalidade entre tais óxidos na unidade COC, onde a ocorrência de carbonato de Fe comprovada através de teste com alizarina, pode explicar melhor tal exceção ao contexto. Outros intervalos com maior concentração em Fe, como o topo da unidade CUS, a base da CLS e o topo da TSL corresponde também aos limites de redução entre as unidades, cujo o quimismo possa facilitar a precipitação de minerais com ferro, como na unidade *Hematite Maker*, onde há o registro por (Fitzell, 1973a), de grãos de hematitas em calcarenitos finos. Cujo o processo para precipitação de minérios com metais associados às salmouras redutoras, semelhante a gênese de depósitos tipo SEDEX, parece também ter alguma relação com a gênese dos depósitos de Mallow, quando a percolação de fluidos atinge camadas com potenciais diferentes de oxirredução promovendo a precipitação de fases mineralizadas.

O CaO também possui alguma correlação com o MgO (Gráfico 1c), mas somente na unidade COC, que como observado na Figura 18a, compoem o cimento micrítico da rocha. Diferentemente da amostra M-73-203 compreendida na unidade CUS, onde a dolomita é esparítica com grãos euédricos e compoem uma segunda fase de cimentação, provavelmente associada aos processos de dolomitização que ocorreram próximos a Mallow (Figura 18b). Portanto espera-se, através da interpretação dos dados químicos que exista apenas correlação positiva entre CaO e

MgO em rochas onde há ocorrência de dolomita, podendo este servir de indicador para a ocorrência de dolomitização.

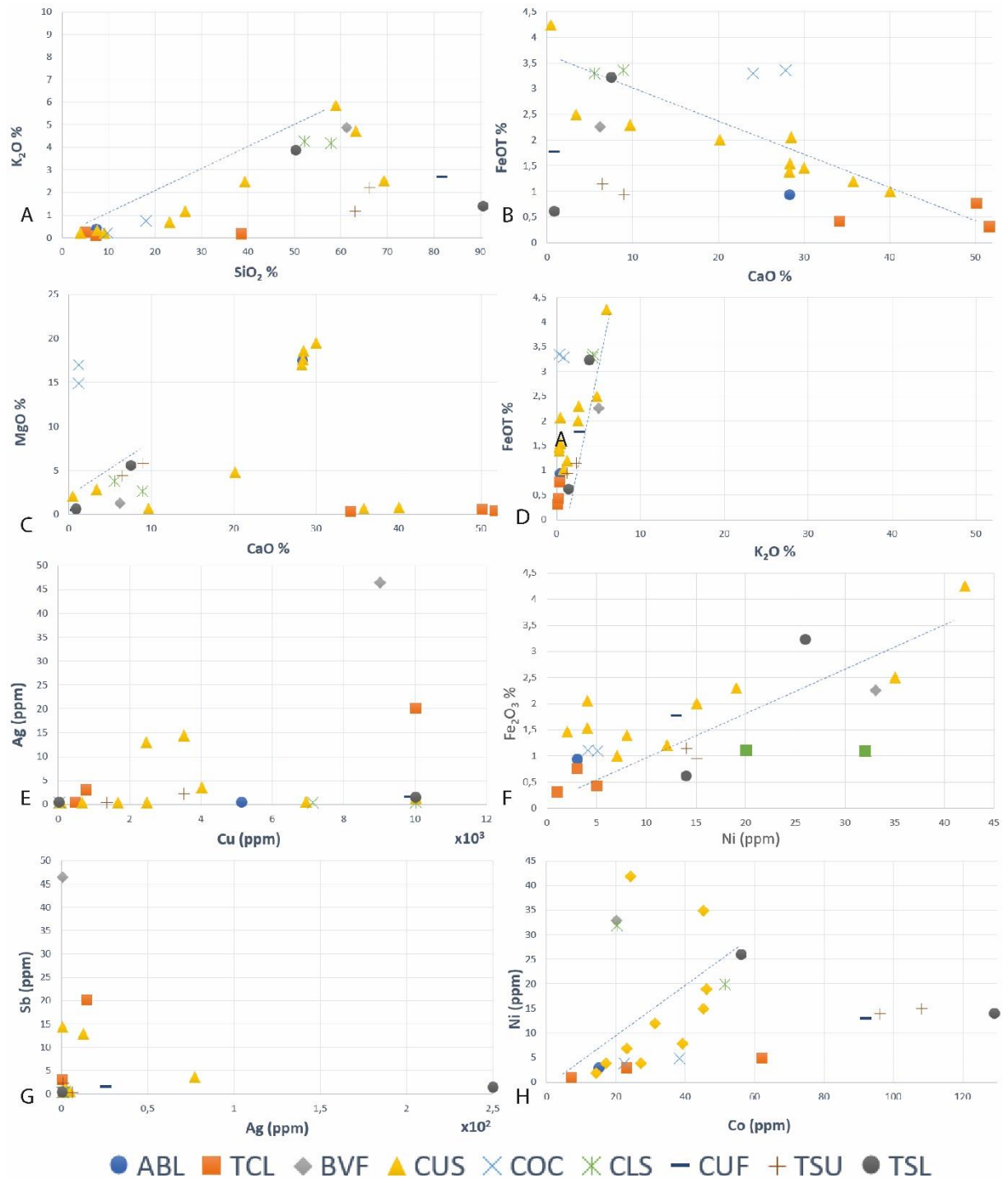


Gráfico 1: Gráficos para os principais elementos e metais que formam os minerais de minério no furo M73-03. Na legenda, **ABL:** Klimaenine Formation, **TCL:** *Tullacondra* Limestone, **BVF:** Ballyvergin Shale, **CUS:** Upper Shaly Calcarenite, **COC:** Oolitic Calcarenite, **CLS:** Lower Shaly Calcarenite, **CUF:** Uniform Calcarenite, **TSU:** Upper Transition Beds, **TSL:** Lower Transition Beds e **ORS:** Old Red Sandstone.

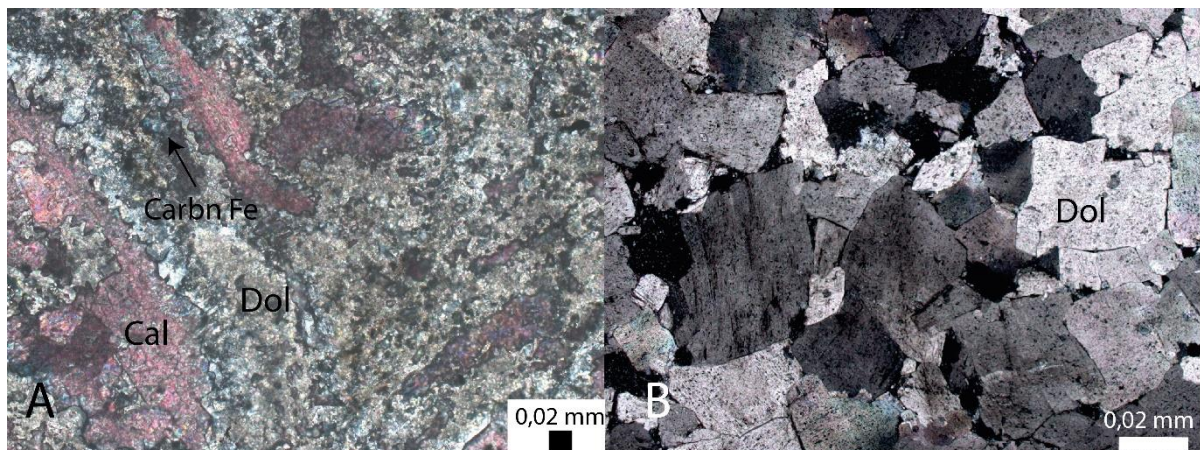


Figura 18: Fotografias das lâminas **A:** M-73-162 (20x) e **B:** M-73-203 (5x) com nicóis cruzados, após o teste com alizarina para identificação de carbonatos. Em azul são carbonatos com Fe, em vermelho calcita e sem coloração, dolomita (Fotos cedidas por Andressa Araújo Silva).

O Gráfico 1d mostra também correlação positiva entre FeOT e K_2O e podem estar associados a ocorrência da clorita no BVF e também nos estilólitos, que ocorrem nas unidades CUS, CLS, COC e TSL e contém muitas vezes sulfetos alongados conforme sua estrutura.

Os principais elementos associados à mineralização em *Tullacondra* são o Cu e Ag. No furo M73-03, a concentração de Ag não é tão alta, no entanto se há correlação positiva entre Cu e Ag, ele está nas unidades do topo; TCL, BVF e CUS (Gráfico 1e; Gráfico 2 para Cu e Ag).

Essa relação entre Cu e Ag é fortemente observada principalmente nas unidades BVF e no topo da CUS. Ag aparece na estrutura da tetraedrita-tennantita, como nos intervalos 39 e 154 (referentes às profundidades das rochas amostradas). O Gráfico 2 mostra que o elemento Zn tem comportamento pouco variável com apenas um pico de concentração, que é o mesmo para os elementos Cu, Sb, As, Cd, Co e Ni. Já o Gráfico 2 para o Pb, apresenta pouca variação e não se verificou um bom parâmetro para correlação com outros elementos. Conforme o gráfico 1f e 1h, os elementos associados (Co e Ni) são proporcionais ao Fe_2O_3 , e comparando com gráfico 2, o Co tem padrão semelhante ao Cu para as unidades CUF, TSU e TSL. Enquanto o Ni não mostra forte relação de correlação com o Cu.

Assim, prováveis corpos mineralizados em Cu podem estar nos seguintes intervalos, 27-39, 119-143, 318-364 e 393, que igualmente correspondem as unidades do topo como *Klimaclenine Formation* e TCL, CUS, no contato da CLS com CUF e TSU e exatamente no contato entre TSU com a TSL. E em Ag, nos seguintes intervalos 39 (TCL) e 119-132 (contato entre BVF e CUS) ocorrendo em associação com Cu.

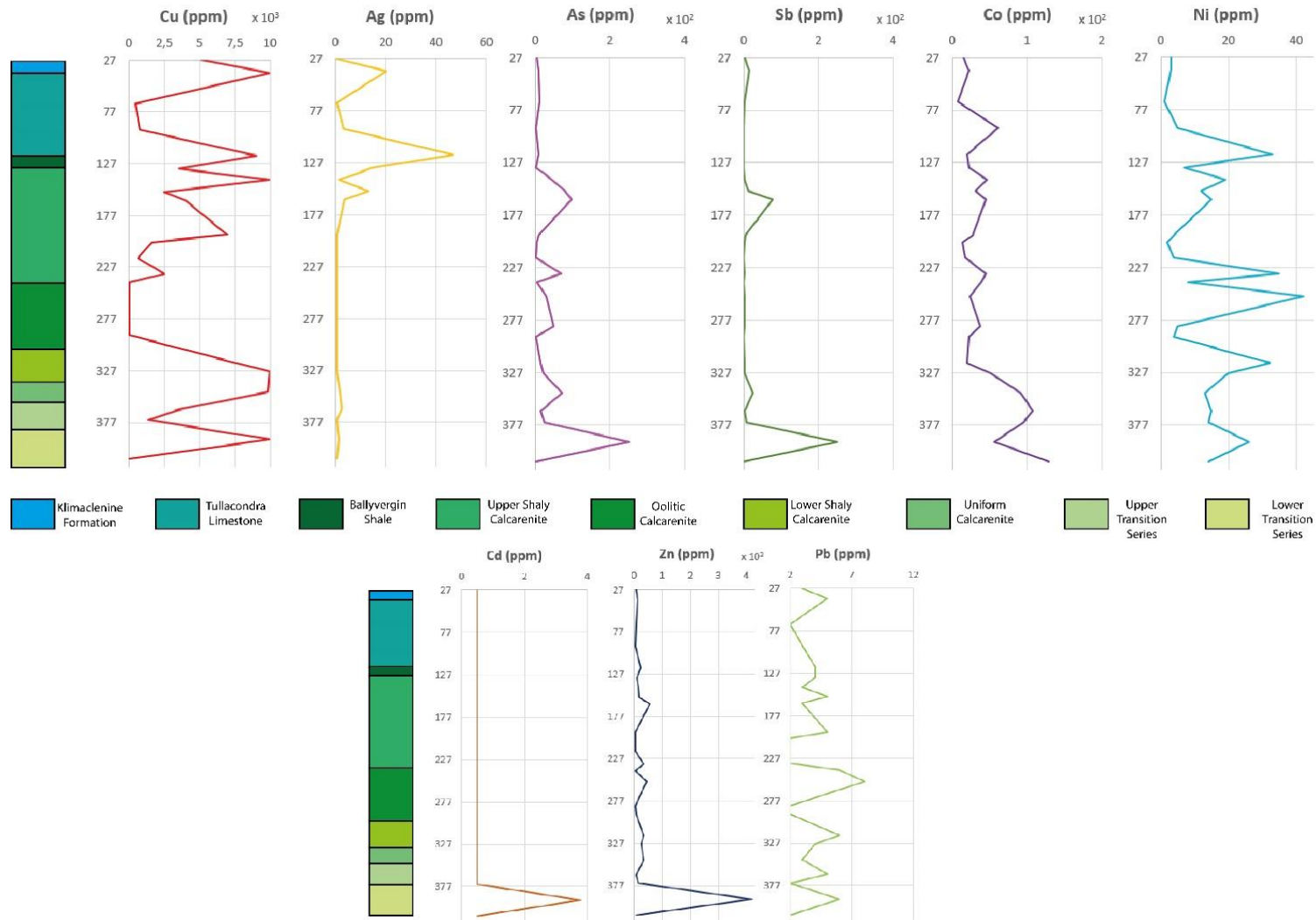


Gráfico 2: Concentração em ppm de metais formadores de minérios no depósito de *Tullacondra* versus profundidade de cada amostra analisada para o furo M73-03. O início do gráfico corresponde à profundidade da primeira rocha amostrada.

Para análise geoquímica do furo M73-11 foram selecionados os elementos SiO₂, CaO, MgO, K₂O, FeOT, Cu, Zn, Pb, Ag, Ni, Co e As. Além das mesmas relações gráficas realizadas para o furo M73-03, a fim de comparar tais dados. Como observado nos quadros com os gráficos 3 e 4. Igualmente para o gráfico do furo M73-03 entre SiO₂ e K₂O apresenta correlação positiva nas unidades mais arenosas como o ORS e aquelas cujo o conteúdo mineral abrange muscovitas ripiformes e feldspatos de origem hidrotermal (Gráfico 3a).



Gráfico 3: Gráficos para os principais elementos e metais que formam os minerais de minério no furo M73-11. Na legenda, **CUS:** Upper Shaly Calcarenite, **COC:** Oolitic Calcarenite, **CUF:** Uniform Calcarenite, **TSU:** Upper Transition Beds, **TSL:** Lower Transition Beds e **ORS:** Old Red Sandstone.

No entanto, as grandes concentrações de K_2O nas unidades CUS e TSL, podem ser explicadas pela grande ocorrência de estilólitos contendo minerais micáceos em sua composição. Diferentemente da análise anterior para CaO e MgO , segundo o Gráfico 3b para o furo M73-11 a ocorrência de possivelmente, dolomita se concentraria nas unidades CUS e TSU, embora as concentrações Mg ainda sejam baixas, indicando que a dolomitização não foi fortemente impressa nas rochas do furo M73-11.

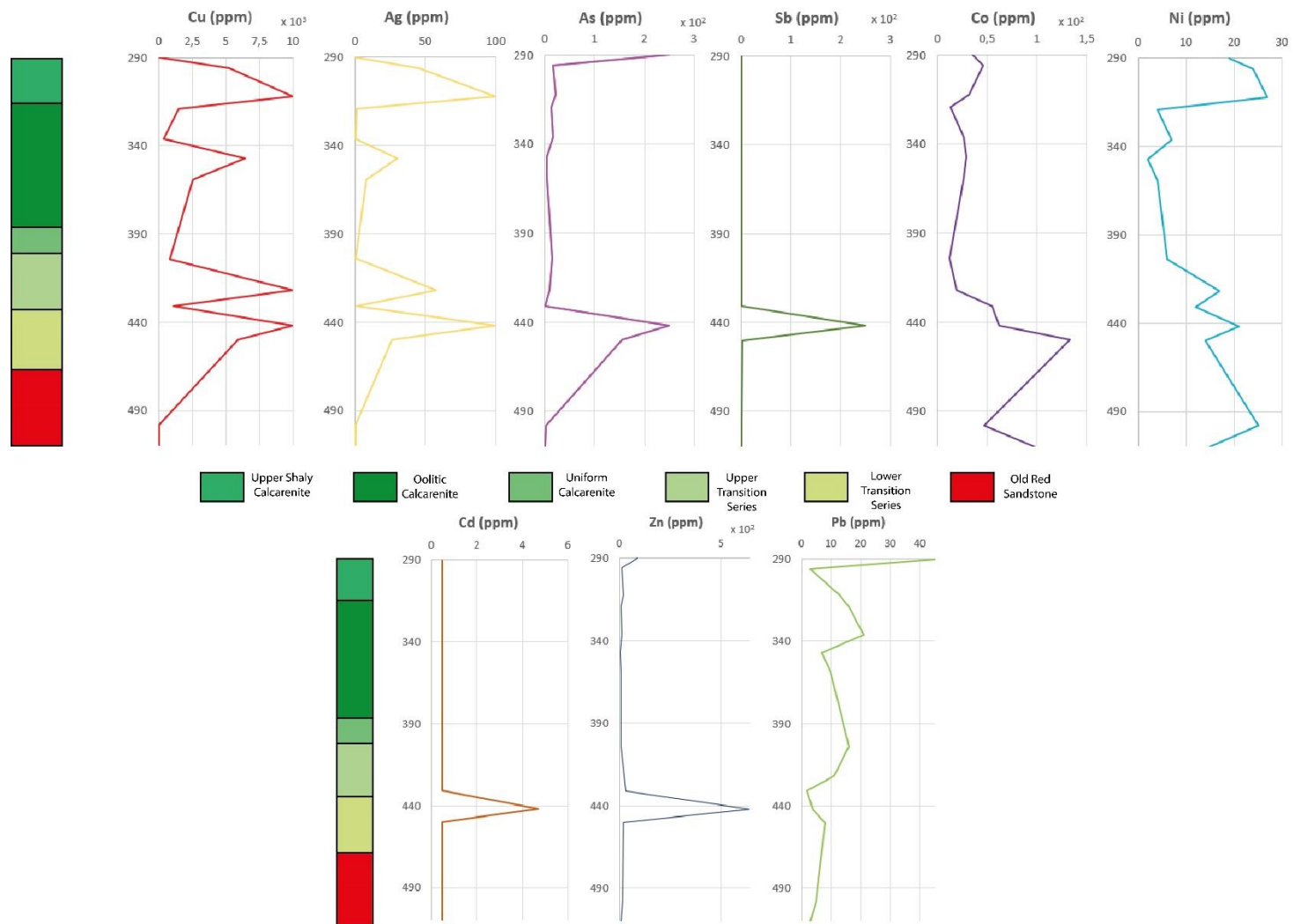


Gráfico 4: Concentração em ppm de metais no depósito de *Tullacondra* versus profundidade de cada amostra analisada para o furo M73-11. O início do gráfico corresponde à profundidade da primeira rocha amostrada.

Novamente o Ni e FeOT são correlações positivas (Gráfico 3c) e o Zn vs. Cu (Gráfico 3d), negativas. O Fe tem um pico na amostra 431, que coincide exatamente com a unidade *Hematite Marker*, que contém a superfície com grãos arredondados de hematita em calcarenito. O Pb novamente tem pouca variação e não gera boa visualização para o comportamento geoquímico entre os elementos selecionados.

Já Ag com Cu tem correlação positiva (Gráfico 3e, 4a e 4b). Os corpos mineralizados que contém Cu e Ag podem estar contidos nas unidades CUS, TSU e TSL. Segundo descrições de Wilbur (1973a), existem algumas manchas de prata no intervalo 347, que é confirmado nos químicos com 30 ppm de Ag. Conforme o Gráfico 3f, Ag está fortemente relacionada ao As, ou seja, Ag está contida tanto na tennantita quanto na arsenopirita, exatamente em alguns intervalos das unidades CUS e TSL.

Os intervalos que contém a mineralização em Cu e Ag coincidem com os limites de oxirredução entre as unidades (Figura 10), e conforme já citado acima, pode estar relacionado ao processo de precipitação das fases mineralizadas. Ademais, a amostra 442 do furo M73-11 apresenta picos de correlação positiva entre os elementos Cu, Ni, Co, Cd e Ag, conforme é observado no gráfico 4. Novamente o Zn tem um pico, que está contido na unidade TSL como no furo M73-03, que pode conter galena. Conforme a Figura 19, que corresponde ao intervalo CLS do furo M73-19 (anexo 1), a paragênese do depósito consta de maneira bastante aparente. O veio de calcita contém vários sulfetos e que por suas relações de superposição, indicam a passagem de mais de uma fase de fluidos mineralizadores.

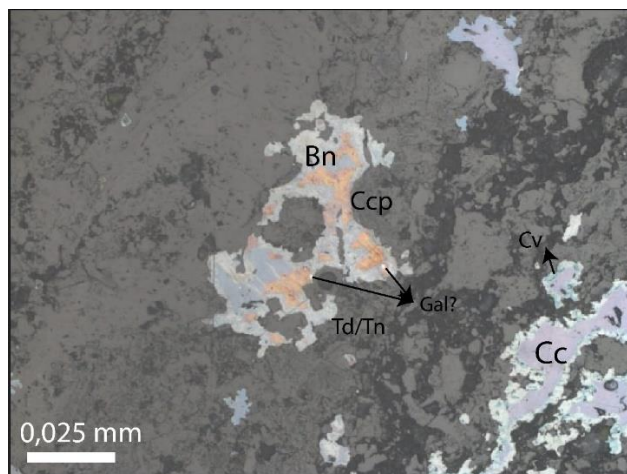


Figura 19: Fotografia da amostra M-73-133 no furo M73-19 pertencente a unidade CLS, onde é possível reconhecer as paragéneses dos minerais de minério. Onde no centro ocorrem cristais acinzentados, entre eles, arsenopirita, tetraedrita/tennantita e galena(?), envolvidas por bornita e calcopirita, que por fim são envolvidas por bornita e calcocita. (Foto cedida por Andressa Araújo Silva).

Assim a evolução da sequência paragenética dos minérios da base do depósito para o topo, segue a proposta já descrita para depósito de *Tullacondra*, com tennantita/tetraedrita/freibergita-argentotennantita/arsenopirita → calcopirita/bornita → bornita/calcocita. Na Figura 20 além das fases minerais observadas tanto no furo M73-03 quanto M73-11, foi incluída a galena, que mesmo não tendo sido descrita nas lâminas dos furos anteriores, foi encontrada no furo M73-19 e sua ocorrência evidenciada pelos dados químicos.

Por fim, a última fase apresentada na Figura 20 é de alteração supergênica, com hematitização verificado pela precipitação de níveis com hematita, derivada da dissolução de Fe do ORS (Everett & Ellam, 2003). A silicificação também foi observada, a substituição de carbonatos das unidades CUS e COC, com a calcedônia e quartzo euédrico com feições de dissolução (Silva, 2017), além do desenvolvimento de muscovitas ripiformes e crescimento de feldspato alcalino hidrotermal entre grãos nas rochas clásticas em conformidade com Wilkinson (2014).

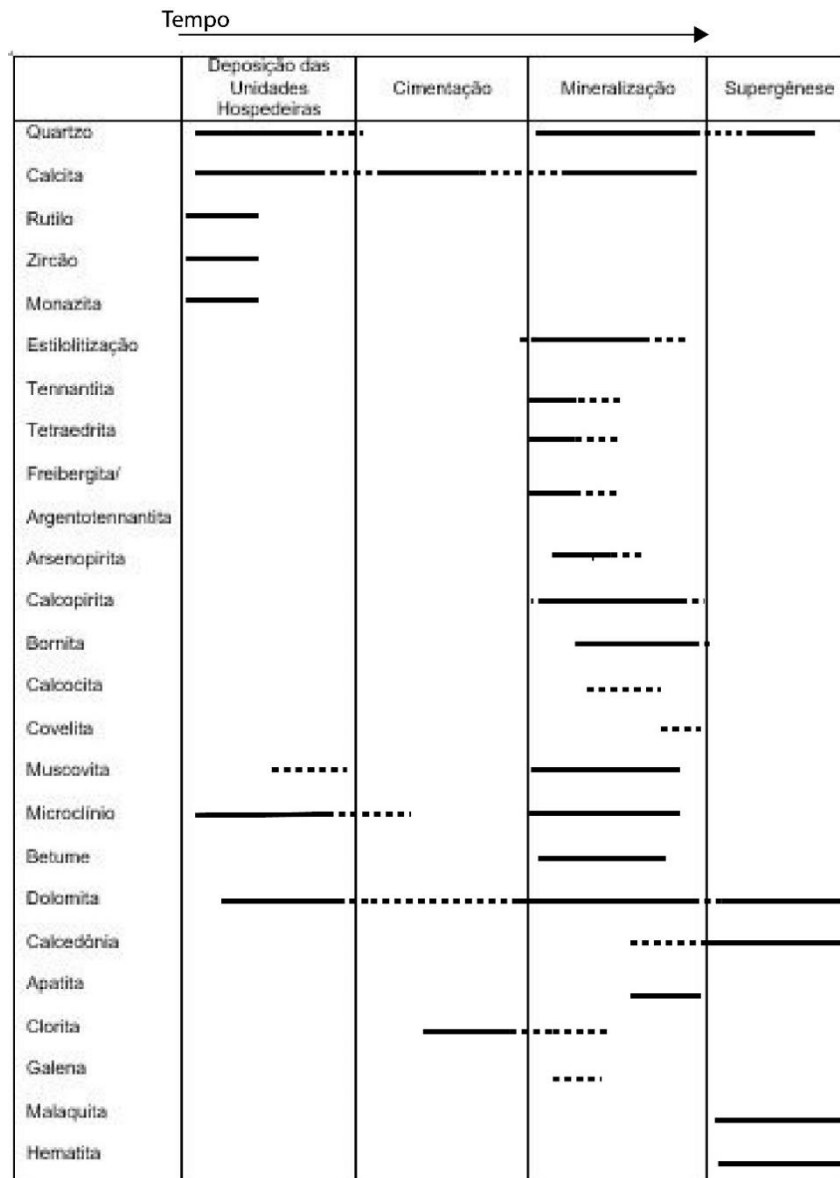


Figura 20: Quadro mostrando a evolução temporal das sequências paragéticas do depósito de *Tullacondra*. (Modificado de Silva, 2017).

4.3 Geometria do Corpo de Minério

Segundo Johnston (1999), a mineralização em *Tullacondra* assemelha-se com outros depósitos ao sul da Província de Limerick, como em Aherlow, em que a mineralização está contida tanto no eixo quanto em estruturas cataclásticas paralelos ao plano axial de dobras hercinianas com direção leste e mergulhos suaves para sul e exibem componentes transpressionais destrais. Já em Ballyvergin, a mineralização está contida nestas mesmas estrutural com *trend* para norte mas subparalelas as zonas de cisalhamento sinistrais. Já em Gortdrum, o controle estrutural está

relacionado tanto a estrutura dextral em flor, quanto falhas *en echelon* com direção NW em uma estrutura com *trend* igualmente para norte (Figura 7).

Em detalhe, a geometria do corpo de mineralizado em *Tullacondra* foi descrito por Wilbur & Carter, (1976) como uma zona vertical contendo principalmente Cu, cortando o acamamento das rochas hospedeiras do *Lower Limestone Shale* próximas do flanco norte de uma anticlinal. No entanto ocorre uma zona contínua contendo a mineralização em Ag, principalmente no contato com o *Lower Limestone Shale* com ORS, com espessura de até 10 m e geometria *Tullacondra* concordante ao acamamento contida nas rochas hospedeiras. Conforme ainda os autores citados, a geometria da mineralização tem forte controle estrutural, com truncamento da dobra (com eixo de direção ENE) e da mineralização, por falhas com orientação N-S. A mineralização também se encontra em estruturas discordantes como veios e vênulas substituindo outros minerais (James, 2013).

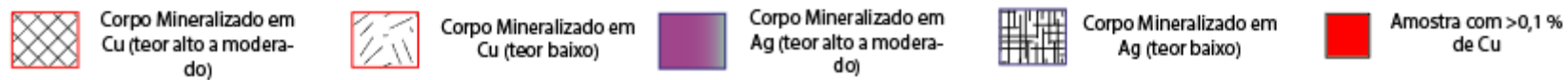
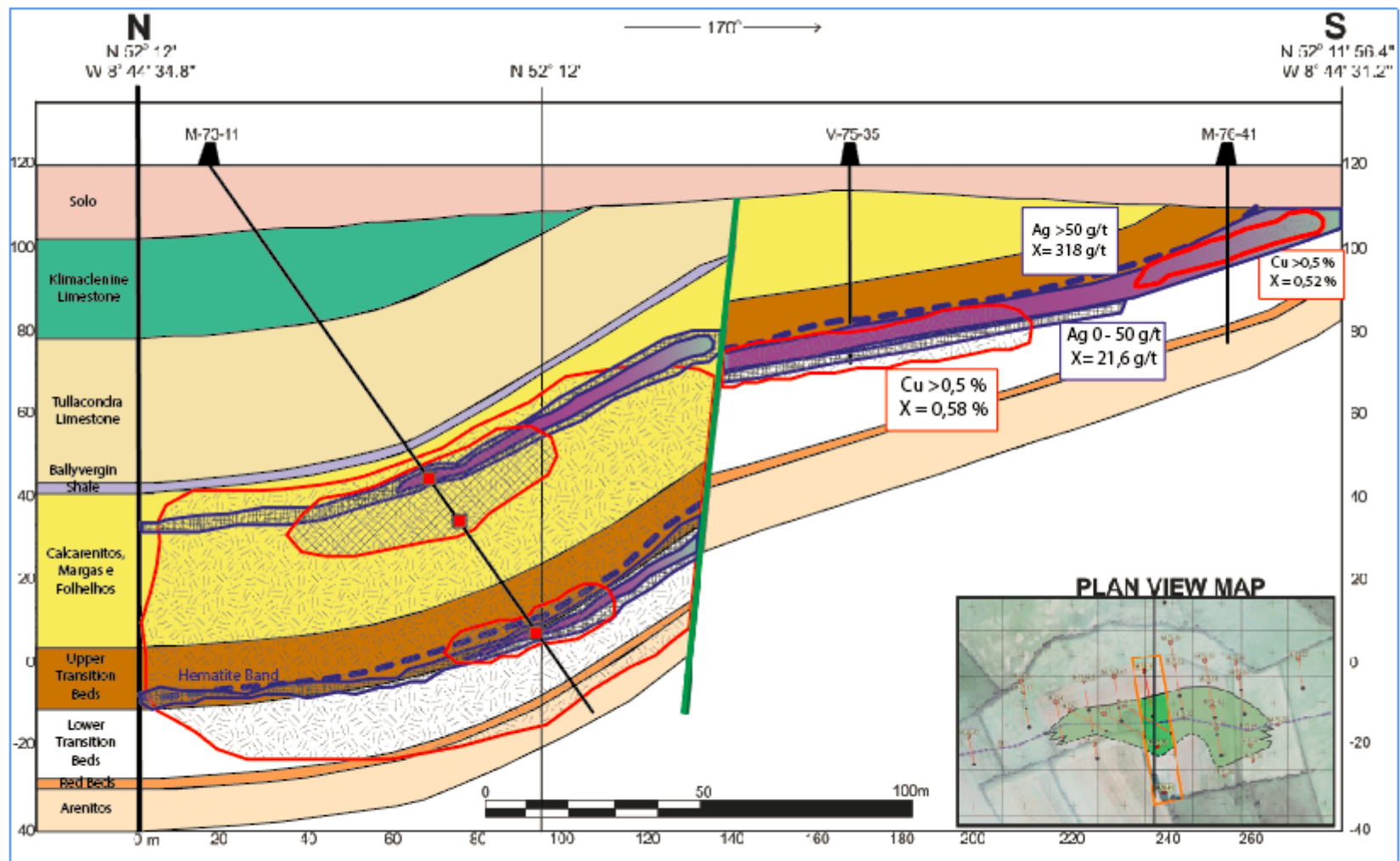
Segundo Slowey (2010), em Mallow ocorrem outros elementos que favorecem/controlam a localização e possivelmente a geometria dos corpos mineralizados como citado acima. São intervalos que marcam limites locais de variação do potencial de oxirredução entre as rochas hospedeiras e definem os principais alvos de ocorrência da mineralização em Cu e Ag e exploração.

Os dados apresentados no capítulo anterior, indicam que a mineralização em Cu se estende verticalmente nas unidades do topo (ABL e TCL), CUS, TSU e TSL e variam nas unidades entre os limites de oxirredução (CSY, COC, CLS, CUF e topo da TSU). Já Ag tem grandes concentrações bastante localizadas como em intervalos contínuos das unidades TCL, BVF, CUS e TSL, que como o esperado, não apresenta a mesma extensão vertical como Cu, pois as fases mineralizadas em Ag, conforme a sequência paragenética para o depósito, precipitaram antes dos minerais contendo Cu, formando a sequência de nucleação entre os sulfetos, em concordância com a Figura 19, explicada pelas relações de sobreposição entre os sulfetos.

Embora os dados de apenas dois furos de sondagem seja insuficiente para a delimitação de um depósito inteiro, busca-se através destes dados sugerir um modelo para o formato e a extensão do corpo de minério em *Tullacondra*, utilizando a seção geológica do furo M73-11, cuja as maiores concentrações de Cu (>10000 ppm ou

>0,1%) aparecem localizadas em pontos vermelhos no furo, bem como as altas concentrações em Ag encontradas (100 ppm) em corpos de formatos sub-horizontais contínuos contidas em alguns horizontes sedimentares. Tal modelo para a geometria dos corpos mineralizados em Cu e Ag encontra-se abaixo na Figura 21.

Figura 21: Seção geológica para o furo M73-11 com os principais intervalos mineralizados e suas geometrias baseadas nos dados petrográficos e químicos (Modificado de Rathdowney Resources, 2007).



5. DISCUSSÃO

Através da correlação de resultados obtidos na petrográfica e químicos propõem-se a confirmação da sequência paragenética para o depósito de *Tullacondra*, evolução das fases mineralizantes com base em dados químicos e geometria dos corpos mineralizados sustentada pela bibliografia.

5.1 Deposição e Diagênese

A deposição de arenitos e conglomerados do ORS finos no início do Estágio *Courceyan* foi seguida da deposição das rochas carbonáticas e calcio-silicáticas finas do *Lower Limestone Shale* (Hitzman & Large, 1986). Logo, minerais acessórios como zircão, rutilo, monazita além do quartzo principalmente nos arenitos do ORS tem origem detrítica provindas das rochas do embasamento como o granito *Lenister* localizado no sudoeste da Irlanda (O'Connor *et al.*, 1999).

Conforme os dados químicos para o MgO no furo M73-03 e testes com alizarina, em que a presença de dolomita fina (0,01-0,3 mm) cristalizada com cimento foi comprovada, conforme Lees & Miller (1995). Em que a cimentação foi gerada em poucos metros do assoalho oceânico. Entretanto, outras fases de dolomitização no *Waulsortion Limestone* são descritas por Hitzman *et al.*, (1998) e Gregg *et al.*, (2001), entre elas, fases diagenéticas tardias que se estendem por 7000 km² a 170 km ao nordeste do *front* da Orogenia Herciniana (Hitzman *et al.*, 1998) (Figura 22).

A dolomita fina é substituída por dolomita de granulação grossa (>0,5 mm), que preenche poros com cimento em dolomita em cela, que pode estar associada a mineralização em Zn-Pb (Gregg *et al.*, 2001). O caráter regional da dolomitização é descrito por Hitzman *et al.* (1998), varia lateralmente e o fluxo tem sentido para norte, causado pelo soerguimento da margem sul da Irlanda gerado pela Orogenia Herciniana. Assim, a dolomitização é menos expressiva no sul, como observado já anteriormente.

O contexto estrutural de uma região é bastante significativo para o controle da percolação dos fluidos e também durante a diagênese (Fossen & Rotevatn, 2016). Nos sistemas de falhas de transferência tanto a migração de fluidos hidrotermais quanto da cimentação são focalizados ao longo de falhas e fraturas (Eichhubl *et al.*, 2009; Sharp *et al.*, 2010).

Posteriormente à deposição das rochas hospedeiras, a compactação dos sedimentos em profundidade de aproximadamente 800 m geraram estruturas diagenéticas, os estilólitos sub-paralelos ao acamamento (Lind, 1993; Nicolaidis & Wallace, 1997 *apud* Silva, 2017). Tais estruturas foram descritas em vários intervalos litoestratigráficos do depósito de *Tullacondra*, assim como a relação com os elementos como SiO₂, K₂O e FeOT associados com minerais desta fase. Entretanto, sua estruturação vertical indica que esses estilólitos foram gerados em um regime predominantemente extensional.

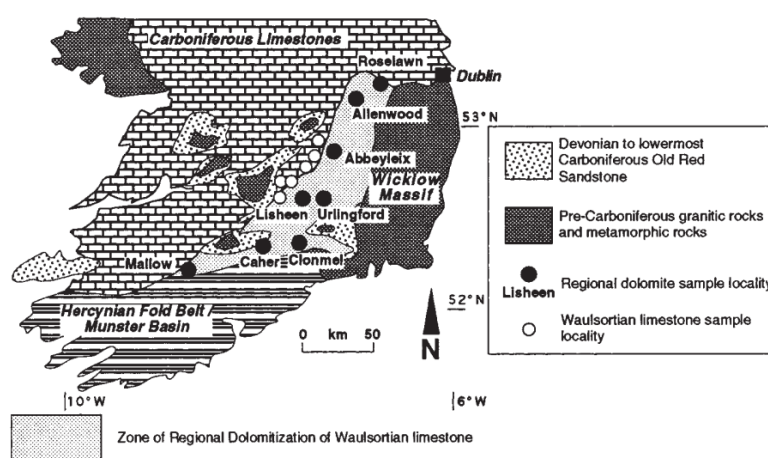


Figura 22: Mapa geral do Sul da Irlanda com a distribuição da dolomitização no Waulsortion Limestone até a borda norte do front do Cinturão Hercínico e até a borda do Maciço de Wicklow (Hitzman *et al.*, 1998).

5.2 Evolução e Geometria da Mineralização

A mineralização dos depósitos *Irish* em Zn-Pb hospedadas no *Waulsortion Limestone* ao sul da Irlanda, quanto no Grupo Navan ao norte, são em sua maioria depósitos com caráter epigenético. No entanto depósitos com maior afinidade ao modelo genético dos depósitos tipo SEDEX, Silvermines e Lisheen mostram a idade de 346 ± 3.0 Ma (Mississipiano Inferior) para mineralização através de idades Re-Os (Hnatyshin, 2015), com caráter tardi-diagenético que se sobrepõem ao intervalo de deposição do *Waulsortion Limestone* (353–347 Ma; Waters *et al.*, 2011).

Essas idades se sobrepõem também as idades das rochas vulcânicas do *Chadian-Asbian* (Strogen, 1995), contribuindo com o modelo associado ao evento vulcânico com geração de sills e diques, como fonte de calor (altas temperaturas, 70-

280°C obtidas por Wilkinson (2010) para os fluidos mineralizadores) e fonte de elementos, importantes para depósitos como o de *Tullacondra*.

A junção do modelo associado ao vulcanismo (Wilkinson & Hitzman, 2014) com as estruturas pré-existentes formadas no embasamento do Paleozóico Inferior e posteriormente reativadas na Orogenia Herciniana, exerceram grande controle para a percolação dos fluidos mineralizantes (Figura 23). Estruturas já citadas, como as *relay ramps*, tem complexidade maior que falhas isoladas, podendo gerar um grande número de outras falhas e fraturas com diversas direções (Fossen & Rotevatn, 2016), de expressivo significado econômico, pela grande interação entre fluido-rocha.

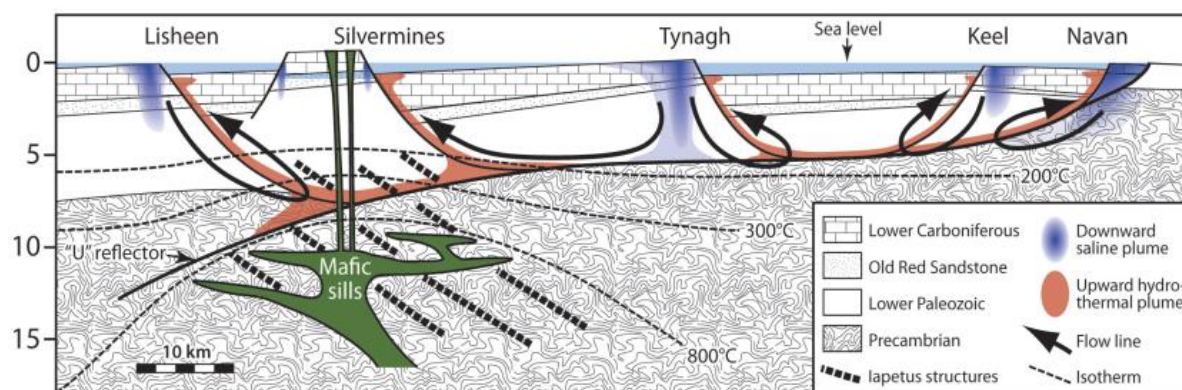


Figura 23: Modelo genético para os depósitos tipo Irish baseado em dados sísmicos, onde as rampas de transferência servem de conduto para a percolação e mistura de fluidos. No sul e sudeste, ocorrem as maiores temperaturas para os fluidos mineralizados devido a associação dos fluidos com o vulcanismo que atingiu a área durante o Chadian até o Asbian (Wilkinson & Hitzman, 2014).

Tais dados corroboram com as texturas de minério descritas para o furo M73-03 e 11, em que a dispersão dos corpos mineralizados, é tanto lateral quanto vertical. Verificado pela ocorrência de sulfetos, principalmente a calcopirita e bornita como agregados disseminados segundo o acamamento e também em vênulas maciças e veios associados a dolomita/calcita discordantes. Assim tais estruturas geológicas são facilitadores para condução de fluidos tanto na vertical, quanto lateral.

A distribuição dos principais metais nos depósitos tipo Irish pode ser verificada na Figura 24 para os mapas de modelagem 3D de (Torremans *et al.*, 2018) para o melhor entendimento bem as estruturas que controlam o arranjo dos depósitos. A similaridade do contexto estrutural nos depósitos de Zn-Pb do norte da Irlanda, como Navan e Lisheen, que igualmente a Mallow possuem falhas com direções EW-ENE,

favorece modelo semelhante para distribuição dos elementos em *Tullacondra*. As baixas concentrações para Cu e Ag encontradas ao norte da Irlanda, podem ser explicadas pelo zoneamento dos elementos em que as razões Zn/Cu, Zn/Pb e Fe/Zn aumentam da base para o topo na estratigrafia e lateralmente, aumentando as razões Zn/Pb e Zn/(Zn+Pb+Fe) para norte-nordeste e a partir das falhas que possuem segmentos que serviram de condutos alimentadores para fluidos hidrotermais.

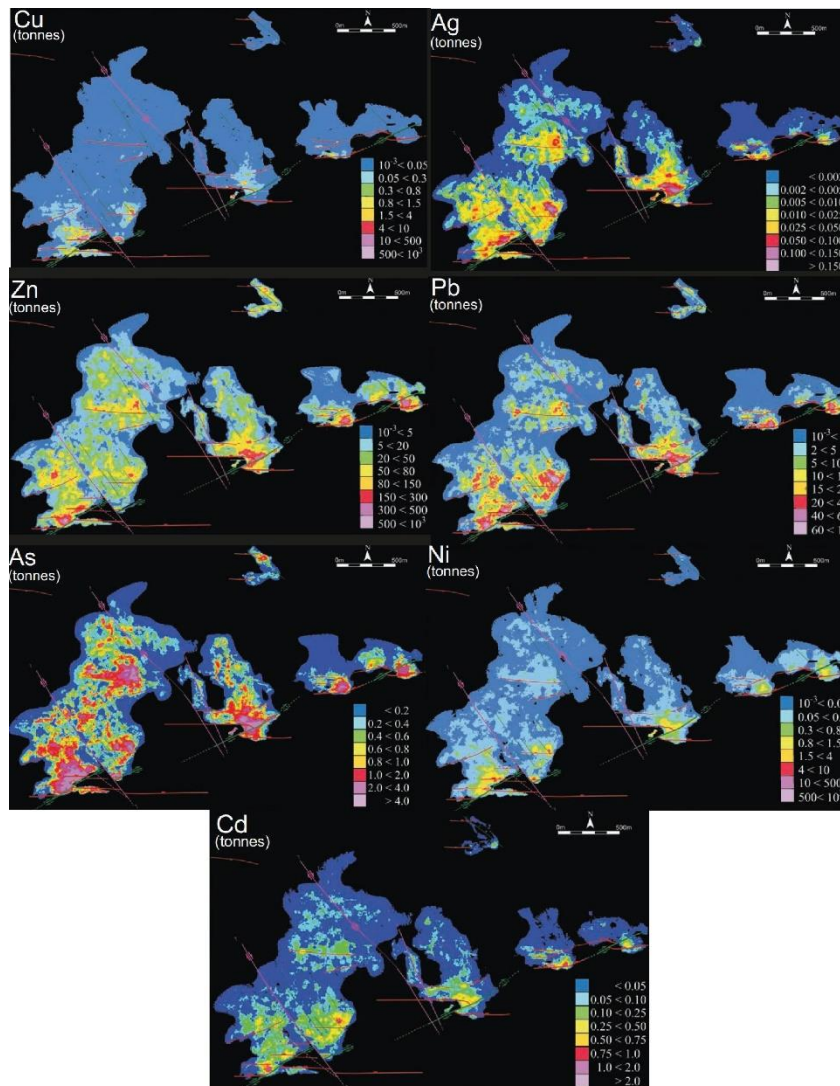


Figura 24: Mapas para a distribuição dos elementos Cu, Ag, Zn, Pb, As, Ni e Cd no depósito de Lischeen, bem como as principais estruturas regionais catalogadas (adaptado de Torremans *et al.*, 2018).

Como confirmado pela Figura 24 e os demais gráficos para os furos M73-03 e 11, os elementos Cu, Ag, As, Co e Ni tem principalmente correlação negativa com Zn e em parte ao Pb, confirmando o forte controle estrutural para a distribuição dos

elementos conforme o comportamento químico destes. Cu, Ag, As, Co e Ni mostram maiores concentrações próximo aos condutos alimentadores, que conforme Torremans *et al.*(2018), a evolução estrutural para a distribuição dos metais, foi primeiramente controlada por falhas normais e que posteriormente evoluíram para falhas de rejeito oblíquo dextral e de rejeito direcional. Alguns locais afastados dos centros de alimentação são interpretados como trapas estruturais e ocorrem mineralizações com altos teores de Zn, Pb, Ni, Cu, Co, Cd, Ag e As, contidas principalmente na base do *Waulsortion Limestone*.

As razões entre os elementos Cu, Ag, As, Co, Ni e Cd tem correlações positivas, como constatado na semelhança entre os gráficos para os elementos citados. O Cu aparece na calcopirita, bornita, calcocita, covelita, malaquita e tennantita. Já a prata, ocorre tanto como solução sólida entre a tennantita-tetraedrita e galena e o As na tennantita e arsenopirita, como também verificado na petrografia dos elementos estudados e Ba como barita e Ba-feldspato (Wilkinson *et al.*, 2005).

A sobreposição de paragêneses de minérios, como observada em lâmina e nos dados químicos, intensifica a proposta de variados pulsos de fluidos mineralizados e o forte controle estrutural, tanto na focalização dos fluidos quanto na distribuição dos minérios, através de diversas falhas e fraturas, que segundo Torremans *et al.* (2018), favoreceram um sistema interconectado que conduziu os fluidos mineralizados até trapas químicas/estruturais e coordenou a distribuição dos elementos nos depósitos *Irish* como Silvermines e Lisheen.

Assim por meio dos dados petrográficos, químicos e estrutural analisados, sugere-se que o modelo genético *Irish* é apropriado para a história genética do depósito de Cu-Ag em Mallow, visto que possui características que contemplam a classificação da maioria dos depósitos *Irish* conforme Wilkinson (2003; 2014) e Torresman *et al.* (2018), entre elas compilado na Tabela:

Tabela 4: Tabela resumo das principais características comuns aos depósitos tipo Irish.

Ambiente Tectônico	Bacias extensionais, bordas de bacias com desenvolvimento de plataforma carbonática;

Rocha hospedeira	Sucessão de carbonatos não argilosos com rochas siliciclásticas; Associação com atividade vulcânica: relação temporal e espacial com a atividade vulcânica da Província de Limerick
Sobreposição tectônica e metamórfica	Cisalhamento pós-mineralização e metamorfismo de baixo grau (fácies xisto-verde).
Estrutural	Falhas sinsedimentares com fraturas e brechas associadas
Controle morfológico da mineralização	Corpos estratiformes, mas restritamente <i>Tullacondra</i> em horizontes sedimentares, brechas sedimentares e hidrotermais. E localmente, próximos aos condutos alimentadores
Minérios e ganga	Próximo aos condutos alimentadores ocorrem calcopirita, bornita, Cu-esfalerita, tennantita-tetraedrita, galena, arsenopirita, pirita e a ganga, com calcita, dolomita, quartzo (calcedônia) e barita
Textura de minério	Sulfetos maciços, disseminados, de substituição e em veios
Metais indicadores	Cu, Ag, Cd, As, Co e Ni
Assinatura isotópica de S	Negativa, sulfato de origem marinha reduzido
Fluido mineralizado	Com temperaturas baixas a moderadas (70-280°), em grande parte água do mar
Tempo da mineralização	Tardi-diagenética a epigenética, logo após a diagênese ou após a litificação das rochas hospedeiras

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Segundo os dados petrográficos e análise geoquímica discutidos acima, conclui-se que o depósito de *Tullacondra* em Mallow na Irlanda:

- A ocorrência do depósito de *Tullacondra* em rochas carbonáticas e calcio-silicáticas finas, além de alguns folhelhos da Formação Lower Limestone Shale indica que houve percolação de fluidos de temperatura moderada (até 280°C) ricos em metais base como Cu e Ag. Essa interpretação é corroborada pela presença de muscovita e calcedônia associada a superfícies planares como veios e estilólitos, gerados pela percolação de fluidos mineralizantes através de diversas estruturas formadas por falhas de transferência.
- A orientação dos estilólitos, sub paralela ao acamamento, e a presença de sulfetos alongados associados às estruturas estilolíticas indicam que o processo de estilolitização é tardi-diagenético a epigenético. O aparecimento

dos estilólitos ainda implica que estes foram gerados em regime majoritariamente extensional.

- A ocorrência da dolomita apenas no furo M73-03, constatada através da aliazarina e dos gráficos entre CaO e MgO, comprovam que o processo de dolomitização ocorreu em algumas partes do depósito, pois o estoque químico, relação Fe-Mg só ocorreu em certo momento da bacia, possibilitando a formação de dolomita.
- A sequência paragenética tennantita/tetraedrita/freibergita-argentotennantita/arsenopirita → calcopirita/bornita → bornita/calcocita sugere que as fases que contém Ag estão associadas aos primeiros pulsos de fluidos mineralizadores, sendo sobrepostas por fases contendo mais Cu.
- A distribuição dos minerais de minério está associado ao comportamento geoquímico dos elementos Cu, Ag, Co, As, Ni e Cd, que tem correlação positiva nos perfis e gráficos conforme a análise dos dados químicos de cada unidade de rocha amostrada para os furos de sondagem M73-03 e 11.
- Ao norte é verificado que as razões para Zn e Pb são maiores e também aumenta verticalmente, o contrário ocorre próximo aos condutos onde, por exemplo o Cu, se concentra ao máximo. Propõem-se que tal correlação seja também aplicável ao depósito de *Tullacondra*, ao sul, pois é observado que a estruturação EW-ENE das falhas que controlam *Tullacondra* são sub paralelas às controladoras dos principais depósitos de Zn-Pb da província, como Navan e Lisheen.
- A distribuição dos elementos Cu, Ag, Co, As, Ni e Cd, conforme observado em depósito ao norte da Irlanda e a correlação entre eles segundo os dados químicos desta pesquisa, e as diversas estruturas EW-ENE observados em *Tullacondra* propõem que o contexto estrutural para a formação do depósito seja compatível com o modelo estrutural de rampas de transferência no desenvolvimento de depósitos econômicos, pois estes permitem intensa percolação, por diversas estruturas, e mistura dos fluidos hidrotermais, bem como na formação de trapas estruturais.
- Conclui-se que os corpos mineralizados em Cu são verticalizados e se estendem ao longo do perfil estratigráfico. São sulfetos de Cu disseminados, mas também associados aos estilólitos sub-paralelos e além dos veios e

vênulas discordantes ao acamamento. Já os corpos mineralizados em Ag tem extensão limitada e aparecem principalmente junto à veios de calcita discordantes ao acamamento.

- Os teores de Cu são variáveis em algumas unidades, no entanto é constatado que a variação do potencial de oxirredução entre camadas favorece a precipitação dos minérios. Os maiores teores, tanto para o Cu quanto para a Ag, coincidem com os limites de oxirredução já conhecidos. Os principais intervalos mineralizados em Cu são ABL, TCL, CUS, TSU e TSL e para Ag nas unidades TCL, BVF, CUS e TSL (logo abaixo da *Hematite Marker*), associados nas unidades TCL, CUS e TSL.
- Os dados coletados neste trabalho são insuficientes para determinar se o depósito de *Tullacondra* se encaixa no sistema mineralizante do *Irish Midlands*. No entanto, o contexto estrutural semelhante aos principais depósitos de Zn-Pb do norte da Irlanda, bem como semelhanças entre o comportamento químico de alguns elementos, além da mineralogia esperada, associação da mineralização, ainda que de forma limitada à dolomitização e da posição estratigráfica são compatíveis com depósitos tipo *Irish*. Logo, interpreta-se nesta monografia que o depósito de *Tullacondra* pode ser englobado ao modelo de depósitos de Zn-Pb tipo *Irish* com proximidade às fontes de fluidos mineralizados.

Recomenda-se em trabalhos futuros a investigação através de isótopos estáveis como oxigênio e carbono para as diversas fases de minerais carbonáticos, para o melhor entendimento da relação entres essas fases com a mineralização e das similaridades com as características isotópicas dos demais depósitos estratigraficamente associados.

REFERÊNCIAS

Andrew, J.C. 1987. *The geological setting and style of mineralization at Ballyvergin, County Clare*. In: Andrew C. J., Crowe R. W. A., Finlay S., Pennell W. M., Pyne J. F. (Eds) *Geology and genesis of mineral deposits in Ireland*. Irish Association for Economic Geology, p. 475-480.

Andrew C.J. 1992. *The relationship between mineralization and basin development chronology in the Irish Central Midlands*. In: Black A., Earls G.V., O'Connor P., Pyne J.F. (eds). *The Irish minerals industry - a review of the decade*, Galway 1990. Irish Association for Economic Geology, p. 143-170.

Chace 1956. Abbreviations in field and mine geological mapping, *Economic Geology*, 51: 712-723.

Cordeiro, P., Oliveira, C., N. P.L., Romagna, G., Santos, R. 2018. The carbonate-hosted MVT Morro Agudo Zn-Pb deposit, central Brazil. *Ore Geology Reviews*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/326786374_The_carbonate-hosted_MVT_Morro_Agudo_Zn-Pb_deposit_central_Brazil. Acessado em novembro de 2018.

Eichhubl, P., Davatzes, N.C., Becker, S.P., 2009. Structural and diagenetic control of fluid migration and cementation along the Moab fault, Utah. *Am. AAPG Bull.* **93**:653–681.

Exploration and Mining Division. 2005. Department of Communications, Marine and Natural Resources, Ireland. *Zinc and Lead in Ireland Report*. p.6.

Everett, C.E., Rye, D.M. and Ellam, R.M. (2003) Source or Sink? An assessment of Role of the Old Red Sandstone in the Genesis of the Irish Zn-Pb Deposits. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, **98**(1): 31-50.

Fitzell M. 1973. Mallow: COBH Exploration Ltd. Relatório de Perfuração – Furo M73-03. p. 8.

Folk, R.L. 1962. *Spectral subdivision of limestone types*. In: *Classification of Carbonate Rocks* (Ed. by W. E. Ham). Mem. Am. Ass. Petrol. Geol. Telsa, v. 1,62-84.

Fossen, H. (2012) *Geologia estrutural*. Tradução: Andrade, F. R. D. de. São Paulo, Oficina de Textos. p.583.

Fossen, H., and Rotevatn, A. 2016. Fault linkage and relay structures in extensional settings-a review. *Earth-Science Reviews*, **154**: 14–28.

Gregg J.M., Shelton K.L., Johnson A.W. et al. 2001. Dolomitization of the Waulsortian limestone (Lower Carboniferous) Irish Midlands. *Sedimentology*, **48**:745–766.

Hitzman M.W., Large D. 1986. *A review and classification of the Irish carbonate hosted base metal deposits*. In: Andrew C.J., Crowe R.W.A., Finlay S., Pennell W.M., Pyne J.F. (eds) *Geology and genesis of mineral deposits in Ireland*. Irish Association for Economic Geology, p. 217-238.

Hitzman, M.W., Allan, J.R., and Beaty, D.W. 1998. Regional dolomitization of the Waulsortian limestone in southeastern Ireland: Evidence of largescale fluid flow driven by the Hercynian orogeny. *Geology*, **26**: 547–550.

Hitzman, M.W., 1999, Extensional faults that localize Irish syndiagenetic Zn-Pb deposits and their reactivation during Variscan compression: *Geological Society, London, Special Publications*, **155**: 233–245

Hjeltström, A. 2015. Copper minerals under the microscope. Department of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden. p. 34.

Hnatyshin, D., A. Creaser, R., Wilkinson, J., Gleeson, S. 2015. Re-Os dating of pyrite confirms an early diagenetic onset and extended duration of mineralization in the Irish Zn-Pb ore field. *Geology*. **43**: 5.

James J. 2010. Technical report on the Mallow base metal Exploration Project, county Cork, Ireland. PGeo EurGeol. Relatório Técnico No. 04/10. p.78.

James J. 2013. Mallow Base Metal Explotation Project Counties e Limericck South Irish Midlands Zn-Pb Orefield: Part I. Dublin: Mayfly Resources. Relatório Técnico. p. 379.

Johnston, J.D., Coller, D., Millar, G., and Critchley, M.F., 1996, Basement structural controls on Carboniferous-hosted base metal mineral deposits in Ireland. *Geological Society, London, Special Publication*, **107**: 1–21.

Johnston, J.D. 1999. Regional fluid flow and the genesis of Irish Carboniferous base metal deposits. *Mineralium Deposita*, **34**: 571–598.

Lees, A. and Miller, J. 1995. *Waulsortian banks*. In: *Carbonate Mud-Mounds: Their Origin and Evolution* (Eds) C.L.V. Monty, D.W.J. Bosence, P.H. Bridges and B.R. Pratt. Int. Assoc. Sedimentol. Spec. Publ., **23**: 191–271.

- Lind I.L. 1993. Stylolites in chalk from leg 130, Ontong Java Plateau. Proceedings of the Ocean Drilling Program. *Scientific Results*, **130**:445–451.
- Nicolaides S., Wallace M.W. 1997. *Pressure-dissolution and cementation in an OligoMiocene non-tropical limestone (Clifton Formation), Otway Basin, Australia*. In: James N.P., Clarke J.A.D. (eds) *Cool-water carbonates*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, p. 249–26.
- O'Connor P. J., Aftalion M., Kennan, P. S. 1989. Isotopic U–Pb ages of zircon and monazite from the Leinster Granite, southeast Ireland. *Geological Magazine*, **126**: 725–8.
- Peacock, D. & Sanderson, D. 1994. Geometry and Development of Relay Ramps in Normal Fault Systems. *Aapg Bulletin - AAPG BULL*, **78**: 147-165.
- Philcox M.E. 1984. Lower Carboniferous lithostratigraphy of the Irish Midlands. Spec Publ, Irish Association for Economic Geology, p. 89.
- Phillips W.E.A., Sevastopulo G.D.S. 1986. *The stratigraphic and structural setting of Irish mineral deposits*. In: Andrew CJ, Crowe RWA, Finlay S, Pennell WM, Pyne JF (eds) *Geology and genesis of mineral deposits in Ireland*. Irish Association for Economic Geology, p .1-30.
- Pracejus B. 2008. *The Ore Minerals Under the Microscope*. Elsevier, p. 875.
- Rathdowney Resources. 2007. Mallow Project Information Sheet, compiled by Rathdowney from Open File reports.
- Ripley E.M., Merino M., Moore C., Orteleva P. 1985. Mineral zoning in sediment hosted copper deposits, In: Wolf K.H. (ed) *Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits*, Elsevier, Amsterdam. v.13, p. 237±260.
- Sharp, I., Gillespie, P., Morsalnezhad, D., Taberner, C., Karpuz, R., Verge, S.,J., Horbury, A., Pickard, N., Garland, J., Hunt, D., 2010. Stratigraphic architecture and fracture controlled dolomitization of the Cretaceous Khami and Bangestan groups: an outcrop case study, Zagros Mountains, Iran. *Geol. Soc. Spec. Publ.* **329**: 343–396.

- Silva, A.A. 2017. *Petrografia de depósito de Cu-Ag hospedado em carbonatos de Tullacondra, Mallow, Irlanda*. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, 43 pp.
- Steed G.M. 1986. *The geology of the Gortdrum Cu-Ag-Hg orebody*. In: Andrew C.J., Crowe R.W.A., Finlay S., Pennell W.M., Pyne J.F. (Eds) *Geology and genesis of mineral deposits in Ireland*. Irish Association for Economic Geology, p. 481-500.
- Slowey, E. 2010. Technical Report on the Mallow base metal exploration project, county Cork, Ireland. Kildare, Cork Irlanda, por Rathdowney Resources Limited.
- Strogen, P. 1988. The Carboniferous lithostratigraphy of southeast County Limerick, Ireland, and the origin of the Shannon Trough. *Geological Journal*, **23**(2), 121-137.
- Torremans, K., Kyne, R., Doyle, R., Güven, J. F., & Walsh, J. J. 2018. Controls on Metal Distributions at the Lisheen and Silvermines Deposits: Insights into Fluid Flow Pathways in *Irish Zn-Pb Deposits*. *Economic Geology*, **113**(7), 1455-1477.
- Waters, C.N., et al., 2011, A revised correlation of Carboniferous rocks in the British Isles. *Geological Society of London Special Report* **26**:188.
- Whitney D.L., Evans B.W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *The American Mineralogist*, 95:185–187.
- Wilbur D. G. 1973a. Mallow: Drill holes 11 - Relatório de Perfuração. p. 15.
- Wilbur D. G. 1973b. Mallow: Drill holes 19 - Relatório de Perfuração. p. 11.
- Wilbur D. G., Carter J. S. 1986. *Cu-Ag mineralization at Tullacondra, Mallow, Co. Cork*. In: Andrew C. J., Crowe R. W. A., Finlay S., Pennell W. M., Pyne J. F. (Eds) *Geology and genesis of mineral deposits in Ireland*. Irish Association for Economic Geology, p. 501-508.
- Wilkinson, J. J. 2003. On diagenesis, dolomitisation and mineralisation in the Irish Zn-Pb orefield. *Mineralium Deposita*, **38**(8), 968-983.
- Wilkinson, J.J., Everett, C.E., Boyce, A.J., Gleeson, S.A., and Rye, D.M., 2005, Intracratonic crustal seawater circulation and the genesis of sub-seafloor Zn-Pb mineralization in the Irish orefield. *Geology*, **33**: 805-808.

Wilkinson, J.J. 2010. A review of fluid inclusion constraints on mineralization in the Irish ore field and implications for the genesis of sediment-hosted Zn-Pb deposits. *Economic Geology*, **105**: 417–442.

Wilkinson, J. J., Hitzman, M. W. 2014. The Irish Zn-Pb orefield: the view from 2015. Current perspectives in zinc deposits. Irish Association of Economic Geology, Dublin, 59-73.

ANEXO I: Tabela resumo das profundidades e intervalos das unidade litoestratigráficas dos perfis de sondagem M73-03, 11 e 19

NÚMERO DE AMOSTRAS	FURO 3	Und. Litoestratigráfica	Profundidade (m)	FURO 11	Und. Litoestratigráfica	Profundidade (m)	Intervalo (pés)	Intervalo (m)	FURO 19	Profundidade (m)	Intervalo (pés)	Intervalo (m)
1	27	KLIMACLENINE FORMATION	8,23	290	UPPER SHALY CALCARENITE	88,39	272-334,5	82,90 - 101,96	47	14,33	0-50	0 - 15,24
2	39	TULLACONDRRA LIMESTONE	11,89	296	UPPER SHALY CALCARENITE	90,22	272-334,5	82,90 - 101,97	54	16,46	50-57	15,24 - 17,37
3	69	TULLACONDRRA LIMESTONE	21,03	310	UPPER SHALY CALCARENITE	94,49	272-334,5	82,90 - 101,96	65	19,81	64,5-65,5	19,66 - 19,96
4	94	TULLACONDRRA LIMESTONE	28,65	312	UPPER SHALY CALCARENITE	95,10	272-334,5	82,90 - 101,97	72	21,95	72-74	21,94 - 22,55
5	119	BALLYVERGIN SHALE/ UPPER SH	36,27	319	OOLITIC CALCARENITE	97,23	272-334,5	82,90 - 101,96	78	23,77		
6	132	UPPER SHALY CALCARENITE	40,23	336	OOLITIC CALCARENITE	102,41	334,5-357	101,96 - 108,81	87	26,52	85-87	25,91 - 26,52
7	143	UPPER SHALY CALCARENITE	43,59	347	OOLITIC CALCARENITE	105,77	334,5-357	101,96 - 108,81	95	28,96	94-95	28,65 - 28,96
8	154	UPPER SHALY CALCARENITE	46,94	359	OOLITIC CALCARENITE	109,42	357-389	108,81 - 118,57	102	31,09	101,5-112	30,94 - 34,14
9	162	UPPER SHALY CALCARENITE	49,38	389	LOWER SHALY CALCARENITE	118,57	357-389	108,81 - 118,57	110	33,53	101,5-112	30,94 - 34,14
10	196	UPPER SHALY CALCARENITE	59,74	404	UNIFORM CALCARENITE	123,14	389-404	118,57 - 123,14	117	35,66	116-119,5	35,36 - 36,42
11	203	UPPER SHALY CALCARENITE	61,87	422	UPPER TRANSITION SERIES	128,63	414-439	126,19 - 133,81	123	37,49	129-132	39,32 - 40,23
12	218	UPPER SHALY CALCARENITE	66,45	431	UPPER TRANSITION SERIES	131,37	414-439	126,19 - 133,81	131	39,93	129-132	39,32 - 40,23
13	233	UPPER SHALY CALCARENITE	71,02	442	LOWER TRANSITION BEDS	134,72	439-443	133,81 - 135,03	133	40,54	132-141	40,23 - 42,98
14	241	UPPER SHALY CALCARENITE	73,46	450	LOWER TRANSITION BEDS	137,16	443-458,5	135,03 - 139,75	137	41,76	132-141	40,23 - 42,98
15	254	UPPER SHALY CALCARENITE	77,42	498	OLD RED SANDSTONE	151,79	494,5-501,5	150,72 - 152,86	142	43,28	141-143,5	42,98 - 43,74
16	283	OOLITIC CALCARENITE	86,26	510	OLD RED SANDSTONE	155,45	501,5-511,5	152,86 - 155,90	150	45,72	143,5-152	43,74 - 46,33
17	293	OOLITIC CALCARENITE	89,31						157	47,85	152-174	46,33 - 53,03
18	318	LOWER SHALY CALCARENITE	96,93						165	50,29	152-174	46,33 - 53,03
19	328	LOWER SHALY CALCARENITE	99,97						172	52,43	152-174	46,33 - 53,03
20	347	UNIFORM CALCARENITE	105,77						179	54,56	174-183,5	53,03 - 55,93
21	364	UPPER TRANSITION SERIES	110,95						187	57,00	183,5-187,5	55,93 - 57,15
22	374	UPPER TRANSITION SERIES	114,00						195	59,44	193,5-198,5	58,98 - 60,5
23	393	LOWER TRANSITION SERIES	119,79						204	62,18	204-205	62,18 - 62,48
24	412	LOWER TRANSITION SERIES	125,58						211	64,31	210,5-228	64,16 - 69,49
25									220	67,06	210,5-228	64,16 - 69,49
26									226	68,88	210,5-228	64,16 - 69,49
27									234	71,32	233,5-251	71,17 - 76,50
28									249	75,90	233,5-251	71,17 - 76,50
29									257	78,33	251-288,5	76,50 - 87,93
30									264	80,47	251-288,5	76,50 - 87,93
31									271	82,60	251-288,5	76,50 - 87,93
32									279	85,04	251-288,5	76,50 - 87,93
33									289	88,09	288,5-292	87,93 - 89,00
34									296	90,22	292-302	89,00 - 92,05
35									302	92,05	302-303	92,05 - 92,35
36									309	94,18	308-313	93,88 - 95,40

Amostra	Cu	SiO2	Al2O3F ₂ O3	CaO	H ₂ O	H ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SrO	B ₂ O ₃	LOI	Total	C	S	B _a	Ca	Cr	Cr	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Ga	Hf	H _a	La	Lu	Hb	Hd	
Descrição	ppm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
M73-11-290	15	27,2	6,58	2,35	31,5	1,43	0,21	1,95	0,01	0,27	0,06	0,22	0,05	0,05	26,1	97,98	7,33	0,49	410	32,8	50	5,68	2,83	1,56	0,71	9,9	3,36	<5	2,1	0,53	17	0,19	6,5	16,8
M73-11-296	5250	60,9	8,17	1,28	12,15	0,9	0,5	2,37	0,01	0,34	0,04	0,04	0,03	0,04	11,75	98,52	3,13	0,32	353	37,1	50	9,47	2,27	1,39	0,48	12	2,52	<5	2,7	0,44	18,9	0,2	9,9	15,5
M73-11-312	>10000	35,1	8,67	2,43	22,9	1,43	0,22	2,64	0,01	0,38	0,09	0,11	0,04	0,05	18,95	93,02	5,61	1,13	480	39,6	50	8,72	2,74	1,75	0,65	13,1	3,23	<5	3	0,59	21,1	0,23	9,1	18,1
M73-11-319	1520	5,79	0,89	1,12	51	0,65	0,05	0,28	<0,01	0,05	0,11	0,04	0,06	0,02	37,6	97,66	11,3	0,33	145,5	17,9	20	0,62	1,41	0,76	0,37	1,3	1,73	<5	0,8	0,26	8,1	0,07	1,3	7,7
M73-11-336	375	17,45	3,07	1,59	41,2	1,1	0,07	0,91	<0,01	0,13	0,13	0,14	0,05	0,03	33	98,87	9,4	0,09	318	36,2	20	4,35	3,49	2,13	0,78	5,1	4,06	<5	1,2	0,72	24,5	0,24	3,4	20
M73-11-347	6420	7,59	0,97	1	50,2	0,61	0,01	0,33	<0,01	0,05	0,12	0,08	0,04	0,02	38,9	99,92	10,9	0,28	191	29,2	20	0,92	3,45	1,89	0,76	1,7	3,52	<5	0,4	0,67	14,8	0,19	1,3	15,1
M73-11-359	2540	5,27	0,8	1,12	50,7	0,82	0,01	0,29	<0,01	0,03	0,17	0,05	0,05	0,01	40	99,32	11,4	0,13	100	26,9	10	0,73	2,75	1,47	0,62	1,7	3,18	<5	0,8	0,62	14,5	0,16	1,6	13,7
M73-11-404	843	7,33	0,86	1,48	49,1	1,05	0,03	0,3	<0,01	0,05	0,31	0,11	0,05	0,02	37,8	98,49	11,1	0,13	148	35,8	10	0,79	4,15	2,39	1,09	1,7	5,02	<5	1,2	0,8	18,7	0,21	1,2	19,5
M73-11-422	>10000	32	7,62	2,7	26,3	1,63	0,09	2,58	0,01	0,39	0,19	0,1	0,05	0,06	22,9	96,62	6,47	0,6	540	62	50	9,28	4,88	2,85	1,33	12	5,84	<5	4	1	29	0,32	7,5	28,8
M73-11-431	1070	29,7	1,4	6,17	31,5	1,67	0,01	0,1	<0,01	0,08	0,57	0,34	0,04	0,01	27	98,59	7,8	0,11	67,4	53,4	20	0,18	5,69	3,3	1,44	3,2	6,11	<5	3,4	1,15	22,3	0,45	2,9	24,5
M73-11-442	>10000	71	10,4	1,49	4,71	0,63	0,05	3,42	0,01	0,51	0,06	0,07	0,01	0,06	5,64	98,06	1,34	0,89	503	60,5	50	10,7	2,68	1,48	1,93	15,9	3,29	<5	6,4	0,53	33,3	0,2	11,2	24
M73-11-450	5910	86,4	6,06	0,39	0,97	0,14	0,86	2,56	<0,01	0,17	0,01	0,02	0,01	0,11	1,58	99,28	0,29	0,28	1030	20,9	20	1,83	0,95	0,67	0,3	7,1	1,13	<5	2,9	0,19	9,6	0,08	3,7	9,4
M73-11-498	13	52,6	9,46	3,8	6,28	1,21	0,48	3,51	0,01	0,55	0,13	0,05	0,21	9,19	8,45	95,93	1,8	2,18	>10000	61,5	60	6,23	4,55	2,53	<0,03	15,9	5,07	<5	6,7	0,9	29,6	0,33	10,3	28,5
M73-11-510	6	65,6	3,55	1,84	8,19	1,31	0,04	1,48	<0,01	0,14	0,16	0,04	0,11	6,44	9,1	98	2,36	1,46	>10000	39,8	20	1,61	4,82	2,63	<0,03	6,6	5,43	<5	2,7	1,01	20	0,27	2,9	23,2
Amostra	Pr	Rb	Sr	Sr	Sr	Ta	Tb	Tb	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zr	Ar	Bi	Hg	La	Re	Sb	Se	Te	Tl	Ag	Cd	Cu	Cu	Li	Mn	Ni	Pb	Sc	Zn
Descrição	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
M73-11-290	4,19	79,3	3,58	2	437	0,6	0,47	4,8	0,24	1,44	45	137	14,6	1,46	65	>250	0,12	0,246	0,025	<0,001	1,07	0,6	0,03	0,05	<0,5	<0,5	35	15	40	1	19	45	6	89
M73-11-296	4,31	92,8	2,95	2	233	0,8	0,39	5,98	0,26	1,43	66	265	11,7	1,43	100	17,2	1,68	2,42	0,015	0,016	0,13	1	0,05	0,08	45	<0,5	46	5250	20	20	24	3	7	12
M73-11-312	4,72	104	3,31	2	356	0,7	0,49	6,41	0,24	1,42	59	151	14,8	1,77	99	22,4	0,26	0,077	0,023	0,003	0,07	1	0,09	0,05	>100	<0,5	32	>10000	30	7	27	13	8	20
M73-11-319	1,93	9,8	1,65	<1	486	0,2	0,26	1,39	0,12	1,72	13	39	8,5	0,81	29	12,9	0,06	0,229	<0,005	<0,001	0,47	0,8	0,01	0,02	0,9	<0,5	13	1520	10	2	4	16	1	8
M73-11-336	4,8	37,7	3,78	<1	503	0,2	0,63	2,56	0,31	0,85	27	131	23,7	1,89	42	16,2	0,06	0,106	0,013	0,001	0,16	0,9	0,04	0,04	<0,5	<0,5	26	375	20	2	7	21	3	15
M73-11-347	3,71	12	3,33	<1	431	0,1	0,56	2,49	0,23	0,79	23	140	18,3	1,58	19	3,7	2,44	0,269	0,006	0,009	0,06	0,9	0,01	0,03	30	<0,5	29	6420	10	12	2	7	2	6
M73-11-359	3,2	10,2	2,62	1	439	0,1	0,48	1,63	0,22	0,55	11	135	16,3	1,45	26	4,3	0,69	0,079	0,01	<0,001	0,24	1	0,01	<0,02	8	<0,5	26	2540	10	3	4	10	1	8
M73-11-404	4,43	10,4	3,95	<1	448	0,1	0,68	2,41	0,29	0,62	17	46	23,1	1,86	41	15,1	0,01	0,179	0,006	<0,001	0,1	1,1	0,02	<0,02	0,6	<0,5	12	843	10	3	6	16	1	10
M73-11-422	7,14	10,3	5,85	1	460	0,5	0,88	6,9	0,39	1,73	62	123	25,3	2,45	142	10,3	1,74	0,095	0,033	0,011	0,23	0,2	0,03	0,09	57,6	<0,5	19	>10000	20	8	17	11	8	26
M73-11-431	5,7	2,6	5,48	<1	357	0,2	0,99	3,31	0,42	0,72	83	386	30,5	3,12	146	0,5	0,45	0,061	0,032	0,004	0,07	<0,2	0,14	0,04	1	<0,5	55	1070	20	1	12	2	2	33
M73-11-442	6,57	123	3,92	1	123,5	0,9	0,46	7,93	0,24	2,03	65	577	13,6	1,76	234	>250	5,11	2,17	0,019	0,005	>250	<0,2	<0,01	0,1	>100	4,7	62	>10000	10	2	21	4	7	640
M73-11-450	2,38	61,2	1,68	<1	58,2	0,5	0,16	2,83	0,1	1,22	16	115	4,6	0,73	103	155,5	7,66	0,29	<0,005	<0,001	3,25	0,4	<0,01	0,03	26	<0,5	133	5910	10	2	14	8	2	21
M73-11-498	7,16	107,5	5,65	1	1715	0,9	0,81	7,08	0,37	1,63	62	306	25	2,43	266	1,6	0,03	0,016	0,026	0,002	0,37	<0,2	<0,01	0,1	<0,5	<0,5	47	13	10	1	25	5	7	18
M73-11-510	5,41	35,7	4,98	<1	1015	0,5	0,87	1,87	0,34	0,48	21	745	28,9	1,82	110	0,7	<0,01	0,029	0,026	<0,001	<0,05	0,5	<0,01	0,02	<0,5	<0,5	98	6	10	1	15	3	2	9