

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS PARA A
MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SOLO EM
BACIA FLUVIAL DE PEQUENO PORTE
UTILIZANDO TÉCNICAS NUCLEARES (^7Be)**

Alexander Dario Esquivel López

2017

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR - CDTN
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS PARA A MODELAGEM DO TRANSPORTE DE
SOLO EM BACIA FLUVIAL DE PEQUENO PORTE UTILIZANDO TÉCNICAS
NUCLEARES (^7Be)

Alexander Dario Esquivel López

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Minerais e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Rubens Martins Moreira

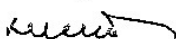
Coorientador: Prof. Dr. Roberto Pellacani Guedes Monteiro

Belo Horizonte

2017

A presente tese de doutorado, intitulada “**Determinação de parâmetros para a modelagem do transporte de solo em bacia fluvial de pequeno porte utilizando técnicas nucleares (^{7}Be)**”, de autoria de **Alexander Dario Esquivel López**, foi defendida e aprovada em 23 de junho de 2017 pela Banca Examinadora abaixo assinada.

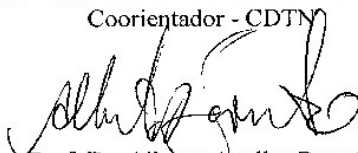
Belo Horizonte, 23 de junho de 2017.



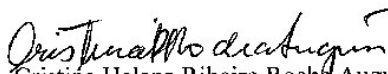
Prof. Dr. Rubens Martins Moreira
CDTN – Orientador



Dr. Roberto Pellacani Guedes Monteiro
Coorientador - CDTN



Prof. Dr. Alberto Avellar Barreto
CDTN



Profa. Dra. Cristina Helena Ribciro Rocha Augustin
UFMG



Dra. Jimena Juri Ayub
Universidad Nacional de San Luis

Esta tese é dedicada aos meus filhos (Alejandro Isaias e Alexander Dario) e a minha esposa (Luris Yaribel), razão do meu viver e de toda minha luta.

“O aspecto mais triste da vida de hoje é que a ciência ganha em conhecimento mais rapidamente que a sociedade em sabedoria.”

Isaac Asimov

AGRADECIMENTOS

À minha família por todo amor e dedicação, especialmente os meus pais: Edilma López Agudo e Dario Esquivel Vega.

Ao Prof. Dr. Rubens Martins Moreira (quase meu pai) pela orientação, suporte, ensinamentos, encorajamentos, confiança e amizade.

À Dra. Amenônia Maria Ferreira Pinto (quase minha mãe) pelo suporte, amizade confiança e incentivo.

Ao Prof. Dr. Roberto Pellacani Guedes Monteiro pela orientação, suporte, ensinamentos, encorajamentos, confiança e amizade.

À Prof. Dra. Jimena Juri Ayub e ao Prof. Dr. Diego Valladares pelo suporte, amizade confiança e incentivo.

À Doutoranda Raquel Pazzini Scarpelli e à Doutoranda Lígia Santana de Faria (minha irmã) pela ajuda sincera, pelo suporte nos momentos felizes como os difíceis, pela confiança e amizade.

Ao Doutorando Edson Fernandes Raso (meu irmão de Moçambique) pela ajuda sincera, pelos grandes momentos de brincadeira, pela confiança e amizade.

Ao Mestre Peter Marshall Fleming pela ajuda sincera, pelos grandes momentos de brincadeira (Foz de Iguaçu, o Mundial Brasil 2014, o Boliche do Shopping del Rey, Poços de Caldas), pela confiança e amizade.

À equipe de campo (Ariane, Eugênio, Nayron e Pozinho) e do laboratório (Geraldo e Ângela Amaral) do Berílio-7, um grande grupo de amizades, que ficaram sempre em meu coração pela ajuda, a vontade de trabalho e pelos grandes momentos de brincadeira.

Ao CDTN/CNEN pela oportunidade de formar parte de seus estudantes de Doutorado, pelas análises, laboratórios e infraestrutura.

À CNEN pela bolsa de estudos de Doutorado concedida.

A todos os amigos do CDTN com quem tive o prazer e o privilégio de conviver e compartilhar, ao longo de todos esses anos, principalmente à turma TODA do Prédio 3.

Ao dono da Fazenda Kamará, o Senhor Otavio A. Fonseca pela oportunidade de realizar minha pesquisa de Doutorado dentro de sua propriedade, ainda sem conhecer-me sempre me ofereceu sua ajuda sincera para o desenvolvimento deste trabalho.

Às bibliotecárias do CDTN, Virgínia e Nívia, pela ajuda inestimável, amizade, compreensão e estímulo.

A todos os amigos do Instituto de Matemática Aplicada de San Luis - IMASL com quem tive o prazer e o privilégio de conviver e compartilhar na Argentina, principalmente à turma do Grupo de Estudios Ambientales - GEA (Flavia Lohaiza, Juan Pablo de Rosas e Ricardo).

À Universidad Tecnológica de Panamá - UTP pela oportunidade de realizar meus estudos de Doutorado no CDTN, pela ajuda e compreensão.

RESUMO

O propósito da pesquisa consistiu no levantamento dos parâmetros para a modelagem do transporte de solo na bacia do córrego Mato Frio utilizando o desempenho do traçador radioativo natural Berílio-7. O projeto propõe desenvolver e introduzir metodologias de traçadores utilizando técnicas nucleares de impacto ambiental nulo no campo da hidrologia, com potencial de contribuir para fortalecer a gestão ambiental de uma microbacia. O modelo do ^7Be para estimar a redistribuição de solo tem o potencial de possibilitar o cálculo tanto das taxas de erosão como de deposição. O estudo busca fazer comparações entre as taxas de redistribuição de solo nas parcelas de trabalho e no local de referência selecionado. Foram coletadas aproximadamente 100 amostras de solo (10 a 50 mm de profundidade) e 15 amostras de água de chuva para estabelecer a concentração do radionuclídeo ^7Be por meio do análise de espectrometria gama nas mesmas. Sua precipitação úmida, assim estimada, é usada para a avaliação dos processos de erosão e de deposição que ocorrem durante eventos de chuva extremos em curtos períodos de tempo, mas para poder usar o ^7Be como traçador é necessário conhecer seu perfil de distribuição vertical de penetração, seu inventario total no Local de Referência (A_{ref} - Bq.m^{-2}) e sua profundidade mássica de relaxação (h_0 - kg.m^{-2}). Os resultados obtidos mostraram que o conteúdo total (inventario) mensal de ^7Be no solo do Local de Referência tem relação com os padrões assimétricos das precipitações, e que o dito conteúdo mensal apresenta valores mais baixos na época seca. Havendo medido a concentração do ^7Be nas chuvas, bem como a quantidade diária da precipitação foi possível obter o valor teórico esperado no solo e compará-lo com os dados das amostras de solo analisadas. A modelação do transporte de solo, mostrou que a parcela de trabalho estudada tem uma perda de solo representativa para um mês de chuva, o que torna essa área vulnerável a sofrer processos erosivos críticos no caso de perder sua cobertura vegetal.

Palavras-chave: ^7Be , Traçador Ambiental, Erosão de Solo, Espectrometria Gama, Deposição Úmida, Radioatividade Natural e Inventário de Radionuclídeos.

ABSTRACT

The purpose of the research was to survey the parameters for the soil transport modeling in the Mato Frio stream basin using the performance of the environmental radioactive tracer ^7Be . The project proposes to develop and introduce tracer methodologies using nuclear techniques of zero environmental impact in the field of hydrology, with a potential to enhance the environmental management of a microbasin. The use of a model based on ^7Be measurements in the soil is capable of estimating the redistribution of soil which can be used to calculate both erosion and deposition rates. The study compare soil redistribution rates in working plots and the selected reference site. Approximately 100 soil samples (10 to 50 mm deep) and 15 rainwater samples were collected to establish the concentration of ^7Be by gamma-spectrometry analysis. This fallout is used to evaluate the erosion and deposition processes that occur during extreme rainfall events in short periods of time, but in order to use the ^7Be as a tracer it is necessary to know its vertical distribution profile of resulting from its penetration, its total inventory on the Reference Site (A_{ref} - Bq.m^{-2}) and its mass relaxation depth (h_0 - kg.m^{-2}). The results indicated that the total monthly content (inventory) of ^7Be in the soil at the Reference Site is related to the asymmetric precipitation patterns, and that the said monthly content presents lower values during the dry season. Using the ^7Be concentration in the rainfall and the amount of daily of precipitation it is possible to obtain the expected theoretical ^7Be content in the soil and to compare it with the data of the analyzed soil samples. Modeling the soil transport with this tool indicates that the investigated area has an appreciable soil loss for one month of rainfall, which makes it vulnerable to critical erosion processes in case its vegetation cover is lost.

Keywords: ^7Be , Environmental Tracer, Soil Erosion, Gamma Spectrometry, Wet Deposition, Natural Radioactivity and Radionuclide Inventory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização e altimetria da Bacia do Córrego Mato Frio, Município de Itaúna, MG.	17
Figura 2 - Localização da área de estudo e dos pontos de amostragem na Bacia do Córrego Mato Frio, Município de Itaúna, MG.....	18
Figura 3 - Mapa de Declividade e Altimetria nas parcelas de trabalho.....	20
Figura 4 - Precipitação entre 2014 e 2016: Estação Fazenda Laranjeiras (02044041).....	23
Figura 5 – Precipitação na área de estudo no período de 2014 a 2015, Estação Fazenda Laranjeiras - MG.....	24
Figura 6 – Precipitação na área de estudo no período de 2015 a 2016, Estação Fazenda Laranjeiras - MG.....	25
Figura 7 - Características do Prato Raspador (Scraper Plate).	27
Figura 8 - Características do equipamento: Fine Soil Increment Collector (FSIC).	28
Figura 9 - Esquema da amostragem Sistemática não Estratificada.	32
Figura 10 - Configuração de um detector de germânio, Camberra modelo 5019.....	37
Figura 11 - Porta-amostra Béquer Marinelli.	38
Figura 12 - Curva de Eficiência HPGe RPG para Solo - Mato Frio - MG.....	40
Figura 13 - Curva de Eficiência HPGe RPG para Água - Mato Frio - MG.....	40
Figura 14 - Espectro gama da amostra de solo do Mato Frio - MG, registrado em março de 2015 (tempo de contagem de 180000 s).....	43
Figura 15 - Espectro gama da amostra de solo do Mato Frio - MG, registrado em setembro de 2016 (tempo de contagem de 347000 s).....	44
Figura 16 - Espectro gama de amostra de solo do Mato Frio - MG, registrado em 13/04/2015	45
Figura 17 - Espectro gama de amostra de solo do Mato Frio - MG, registrado em 03/06/2015)	45
Figura 18 - Série histórica mensal média da precipitação acumulada na área de estudada.	48
Figura 19 - Deposição de ^7Be e quantidade de chuva.....	51
Figura 20 - Medida do conteúdo de ^7Be no solo versus a deposição úmida de ^7Be (estimado no solo).....	52
Figura 21 - Distribuição vertical do ^7Be conteúdo no solo, no perfil do solo coletado na parcela P1 no mês de outubro de 2015.	53

Figura 22 - Deposição úmida de ^7Be e conteúdo de ^7Be no solo (parte superior) e entrada de ^7Be pelas chuvas (parte inferior).....	55
Figura 23 - Profundidade mássica de relaxação versus Atividade de Referência.	56
Figura 24 - Profundidade mássica de relaxação versus Atividade nos pontos de amostragem.	57
Figura 25 - Deposição úmida de ^7Be e conteúdo de ^7Be no solo (parte superior) e entrada de ^7Be pelas chuvas (parte inferior), no local La Cumbre. (Junho 2016).....	58
Figura 26 - Distribuição vertical do ^7Be no perfil do solo coletado no Sítio de Referência no mês de outubro de 2016.	60
Figura 27 - Deposição de ^7Be versus quantidade de chuva (outubro 2015 - outubro 2016)....	61
Figura 28 - Deposição úmida de ^7Be e conteúdo de ^7Be no solo (parte superior) e entrada de ^7Be pelas chuvas (parte inferior).....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variação da Declividade e Altimetria nas parcelas de trabalho.	19
Tabela 2 - Distribuição das coberturas vegetais naturais e plantadas e suas porcentagens nas sub-bacias 3 e 4 do córrego Mato Frio.....	22
Tabela 3 - Dados de contagem para a determinação da meia-vida do ^7Be	46
Tabela 4 - Atividade de Concentração (C) do ^7Be e Conteúdo (A) do ^7Be no primeiro centímetro do solo para cada parcela experimental.	49
Tabela 5 - Quantidade de precipitação e Concentração de ^7Be na água de chuva.	61
Tabela 6 - Conteúdo de ^7Be medido nas amostras de solo do Sítio de Referência versus o conteúdo de ^7Be calculado usando a equação (14) para determinar o inventário diário.	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

${}^7\text{Be}$	Isotopo natural radioativo Berilio-7
${}^{137}\text{Cs}$	Isotopo artificial radioativo Cesio-137
${}^{210}\text{Pb}$	Isotopo natural radioativo Chumbo-210
${}^{228}\text{Ac}$	Isotopo natural Actíneo-228
FRN	Fallout radionuclides
C	Carbono
Li	Lítio
N	Nitrogênio
He	Hélio
O	Oxigênio
B	Boro
p	Próton
n	Nêutron
$C(0)$	Concentração de atividade inicial de ${}^7\text{Be}$
$C(x)$	Concentração de ${}^7\text{Be}$ expressa em termos de densidade mássica de atividade
A_{ref}	Inventário de referência de ${}^7\text{Be}$
$A(x)$	Inventário abaixo da profundidade x
A_o	Atividade inicial
A_f	Atividade final
h_0	Profundidade mássica de relaxação
x	Profundidade mássica
R	Massa de solo erodida
R'	Massa de sedimento depositada
C_e	Concentração em atividade de ${}^7\text{Be}$ do sedimento erodido de um ponto
C_d	Concentração média em atividade de ${}^7\text{Be}$ do sedimento depositado
R^2	Coefficiente de correlação
Bq	Becquerel
$\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$	Becquerel por metro quadrado
$\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$	Becquerel por quilograma
$\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$	tonelada por hectarea

cps	Contagens por segundo
dps	Desintegrações por segundo
Ln	Logaritmo natural
km ²	Quilômetro quadrado
kg	Quilograma
m	Metro
mm	Milímetros
mL	Mililitro
%	Porcentagem
°C	Grau Celcius
s	Segundos
MeV	Mega elétron-volt
keV	Quilo elétron-volt
V	Volt
σ	Desvio padrão
N	Número de contagens líquidas do raio gama considerado
γ	Raio gama
m_a	Massa da amostra
t	Tempo de contagem
ε	Eficiência de contagem para a energia do raio gama
I_γ	Probabilidade absoluta de transição para o raio gama medido
I_d	Inventário diário
I_{da}	Inventário dia anterior
E_d	Entrada diária
λ	Constante de desintegração do ⁷ Be
$t_{1/2}$	Meia vida do isótopo considerado
AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
IAEA	International Atomic Energy Agency
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura.
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
LMR	Laboratório de Medidas Radiométricas

SEMAM	Serviço de Meio Ambiente
SERTA	Serviço de Técnicas Analíticas
FSIC	Fine Soil Increment Collector
IMASL	Instituto de Matemática Aplicada de San Luis
GEA	Grupo de Estudios Ambientales
UTP	Universidad Tecnológica de Panamá
CSPP ⁷ Be	Coletor de Solo de Baixa Profundidade
HPGe	Germânio hiper puro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivo da pesquisa	4
1.1.1. Objetivo Geral.....	4
1.1.2. Objetivos Específicos.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. Origem do Fallout de ^7Be	6
2.1.1. ^7Be na Atmosfera	7
2.1.2. ^7Be na Precipitação.....	8
2.2. Estimativas de redistribuição do solo usando o ^7Be	9
2.2.1. Modelo de distribuição do ^7Be no solo	10
2.2.2. Perdas de solo em um ponto de amostragem.....	11
2.2.3. Deposição de sedimento em um ponto de amostragem	12
2.2.4. Principais pressupostos da técnica do ^7Be	13
2.3. Vantagens e limitações do método do ^7Be	13
3. DESCRIÇÃO DO LOCAL DE TRABALHO.....	15
3.1. Localização.....	15
3.2. Geomorfologia.....	19
3.3. Pedologia	21
3.4. Uso da Terra e Cobertura Vegetal	21
3.5. Clima	22
3.6. Pluviometria.....	22
4. METODOLOGIA.....	26
4.1. Coleta da Amostra de Solo	26
4.1.1. Prato Raspador (Scraper Plate) da IAEA	27
4.1.2. Fine Soil Increment Collector (FSIC) da IAEA	28
4.1.3. Coletor de Solo de Baixa Profundidade (CSPP ^7Be).....	29
4.2. Coleta da Água de Chuva	29
4.2.1. Ingresso de ^7Be a partir da atmosfera (Mato Frio, Brasil).....	29
4.2.2. Ingresso de ^7Be a partir da atmosfera (San Luis, Argentina)	30

4.3. Plano de Amostragem, Área de Amostragem e Preparação das Amostras	31
4.3.1. Plano de Amostragem	31
4.3.2. Área de Amostragem.....	32
4.3.2.1. Seleção do local de estudo (Mato Frio, Brasil).....	32
4.3.2.2. Seleção do local de estudo e elaboração do esquema de amostragem (San Luis, Argentina).....	33
4.3.3. Preparação das Amostras.....	34
4.3.3.1. Preparação de amostras (Mato Frio, Brasil)	34
4.3.3.2. Procedimento de amostragem e preparação de amostras (San Luis, Argentina).....	35
4.4. Espectrometria Gama	36
4.4.1. Condições de contagem.....	38
4.4.2. Eficiência de detector gama.....	39
4.4.3. Limite de Detecção do Detector Gama	41
4.4.4. Incerteza dos Resultados	41
4.4.5. Interferência Analítica na Determinação do ^7Be	42
4.4.5.1. Avaliação da Interferência do ^{228}Ac	42
4.4.5.2. Determinação da Meia-Vida do ^7Be	44
4.4.6. Determinação da Atividade de ^7Be	46
4.4.7. Determinação do Inventário de ^7Be	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
5.1. Comportamento do radionuclídeo ^7Be nas parcelas de trabalho do Córrego Mato Frio... 48	
5.2. Comportamento do radionuclídeo ^7Be em La Cumbre, na Província de San Luís, Argentina.....	55
5.2.1. Aplicação do ^7Be ao modelo de erosão	55
5.3. Modelagem da redistribuição de solo usando o ^7Be no Córrego Mato Frio (2015-2016). 58	
5.3.1. Perfil de ^7Be no Solo	59
5.3.2. Ingresso desde atmosfera e Inventário mensal de ^7Be	60
5.3.3. Determinação das taxas de erosão e sedimentação.....	64
5.4. Fontes de erosão na Parcela de Trabalho	65
5.4.1. Principal mecanismo de erosão.....	65
5.4.2. Fontes secundárias de erosão.....	66

6. CONCLUSÃO.....	67
REFERÊNCIAS.....	70
APÊNDICE	76

1. INTRODUÇÃO

A degradação do solo afeta atualmente 1,9 bilhão de hectares de terras agrícolas em todo o mundo, e a tendência é a de aumentar rapidamente, a uma taxa de 5 a 7 milhões de hectares por ano. Esta degradação é causada em maior parte pelas inadequadas práticas de gestão de solos na agricultura e pecuária. Entre todos os processos de degradação do solo a erosão é o tipo mais comum, sendo responsável por 84% das áreas afetadas. Mais ou menos três quartos das áreas de terra afetada localizam-se em países em desenvolvimento (IAEA, 2014).

Neste contexto a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) através da Divisão de Técnicas Nucleares em Alimentos e Agricultura (Joint FAO/IAEA), desenvolveu as Diretrizes para avaliar a erosão e a eficácia das estratégias de conservação do solo, por meio de técnicas baseadas no uso de radionuclídeos de origem artificial (^{137}Cs) e natural (^{210}Pb e ^7Be), técnicas que estão sendo usadas em muitos dos países membros da AIEA.

Este trabalho procura determinar os parâmetros para a modelagem do transporte de solo em uma microbacia utilizando o traçador natural radioativo ^7Be . O mesmo justifica-se pois propõe introduzir metodologias de traçadores “amigáveis” na hidrologia, tendo em vista seu alcance social e contribuição à gestão ambiental. Estes procedimentos, no entanto, só recentemente foram propostos no Brasil onde até agora foram apenas pontualmente trabalhados, motivo pelo qual torna-se necessário comprovar sua validade e eficácia.

A pesquisa propõe o levantamento de parâmetros e a modelagem do transporte de solo na Bacia do Córrego Mato Frio - MG utilizando o desempenho do traçador natural radioativo Berílio-7 (^7Be), cujo objetivo é determinar as taxas de erosão dos solos na em uma bacia usando o radioisótopo ^7Be , discriminando as fontes de erosão, e realizando a modelagem matemática da erosão e do transporte de sedimentos.

O procedimento adotado para o desenvolvimento deste projeto foi elaborado levando-se em conta as seguinte etapas: revisão da literatura sobre os aspectos mais importantes da abordagem proposta, ou seja, a formação do ^7Be , seu ingresso no solo, características do modelo de redistribuição, sua análise no laboratório de espectrometria gama (possíveis interferências,

tempos de contagem, quantidade de amostra), seleção do tipo de amostragem em campo, preparação das amostras (solo e água de chuva) e caracterização da área de trabalho.

No Capítulo 2, é realizada uma descrição do fallout ^7Be desde sua origem, sua formação na atmosfera e as formas principais de ingresso no solo, da estimativa da redistribuição dos solos, características principais do modelo, cálculo das taxas de erosão e deposição, pressupostos para aplicar o modelo, das vantagens e limitações da técnica.

No Capítulo 3, é feita uma descrição geral da região, a microbacia do Córrego Mato Frio onde foi realizada a pesquisa, colocaram-se os pontos de maior interesse, como: localização, geomorfologia, pedologia, uso de solo e cobertura vegetal, clima e pluviometria, de uma maneira sucinta.

No Capítulo 4, é apresentada a metodologia de trabalho das diferentes etapas da pesquisa, os tipos de equipamentos que podem ser usados na coleta das amostras de solo e da água de chuva, o plano de amostragem, a técnica de análise de laboratório, incluindo: contagem, eficiência, limite de detecção, incerteza, interferência, avaliação dos resultados, determinação da atividade e do inventário do radioisótopo.

No Capítulo 5, são mostrados os resultados para as etapas estabelecidas neste trabalho: Comportamento do radionuclídeo ^7Be nas parcelas de trabalho do Córrego Mato Frio; Comportamento do radionuclídeo ^7Be em La Cumbre, na Província de San Luís, Argentina; e perfil de penetração do ^7Be , ingresso e inventário mensal, modelagem usando o ^7Be . É feita também a discussão destes, mostrando a relação com outras variáveis que tornam mais fácil sua análise e interpretação, o que permite um melhor entendimento ao aplicar o modelo de transporte de solo e de seus resultados.

No Capítulo 6, estão as conclusões deste projeto, assim como se propõem algumas recomendações para o desenvolvimento de futuros trabalhos que guardam relação como o tema tratado.

A hipótese de nossa pesquisa foi a seguinte: Possível utilização dos dados obtidos do ⁷Be nas análises das amostras de solo e água de chuva, para a determinação da redistribuição de solo (erosão e deposição) numa parcela de trabalho.

1.1. Objetivo da pesquisa

1.1.1. Objetivo Geral

Levantar os parâmetros requeridos para a modelagem do transporte de solos em uma microbacia utilizando o desempenho do traçador natural radioativo Berílio-7 (^7Be). Dito objetivo pretende-se alcançar determinando as taxas de erosão dos solos em uma bacia usando o radionuclídeo natural ^7Be , discriminando as fontes de erosão, fazendo a modelagem matemática da erosão e levantando os parâmetros necessários para o transporte de sedimentos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Definir o principal agente de erosão na bacia do Córrego Mato Frio - MG;
- Definir os agentes secundários de erosão (pisoteio do gado, uso do solo, ação dos ventos, queimadas e outras ações antrópicas);
- Definir e otimizar a metodologia de amostragem de águas de chuva e de solos com vistas às análises radiométricas;
- Determinação das taxas de erosão dos solos usando o radioisótopo ^7Be ;
- Modelagem matemática da erosão e levantar os parâmetros necessários para o transporte de sedimentos no sistema.

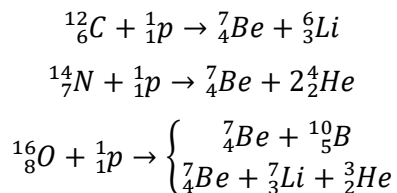
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desenvolvimento deste projeto foi elaborado levando-se em conta as informações existentes e disponíveis. O conteúdo da revisão da literatura traz informações sobre o radioisótopo ${}^7\text{Be}$: formação, passagem pela atmosfera, transporte até a superfície terrestre, tempo decorrido até a contagem, determinação de sua concentração no solo, interferência na contagem. Neste ponto também são mostrados os procedimentos de amostragem de solo em campo, assim como a preparação das amostras no laboratório. Finalmente se faz uma caracterização dos principais aspectos da área de trabalho.

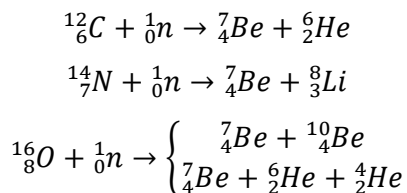
2.1. Origem do Fallout de ${}^7\text{Be}$

O Berílio-7 (${}^7\text{Be}$) é um radionuclídeo cosmogênico, sendo o produto da espalação dos raios cósmicos galácticos e das partículas solares energéticas com os átomos de carbono, nitrogênio e oxigênio. Esta interação ocorre na troposfera superior e na estratosfera inferior da atmosfera (YOSHIMORI *et al.*, 2003; PASTEFANOU, 2009). O ${}^7\text{Be}$ assim formado tem uma meia vida curta 53,3 dias.

O ${}^7\text{Be}$ atinge um estado estável e de menor energia quando decai para ${}^7\text{Li}$; esse decaimento ocorre por captura eletrônica. Neste processo, duas situações podem acontecer: a) 89,5% dos átomos de ${}^7\text{Be}$ decaem diretamente para o estado de menor energia e b) 10,5% decaem primeiro para o estado excitado do ${}^7\text{Li}$, que emite uma radiação gama com energia igual a 477,6 keV e torna-se estável (KASTE *et al.*, 2002). As reações de produção do ${}^7\text{Be}$ são descritas por Papastefanou (2009) da seguinte maneira:



(1)



De acordo com Yoshimori *et al.*, (2003) a taxa de produção do ${}^7\text{Be}$ é maior na atmosfera superior. Dependendo da latitude a mesma vai atingir um valor máximo e ao final vai decrescer em direção à superfície terrestre. Papastefanou (2009) em seu trabalho “Beryllium-7 Aerosols in Ambient Air” determinou que a produção máxima do ${}^7\text{Be}$ acontece na região da atmosfera de 20 km de altitude em relação a superfície terrestre.

A atividade solar representa um fator determinante na produção de ${}^7\text{Be}$. Sua influência pode-se resumir como uma correlação negativa entre a produção de ${}^7\text{Be}$ na atmosfera e a ocorrência de manchas solares (*sunspot*), que são o índice de atividade solar (PAPASTEFANOU e IOANNIDOU, 2004). Papastefanou e Ioannidou (2004) analisaram os eventos de vento solar forte, que ocorreram nos meses de outubro e novembro de 2003, eles verificaram que estes eventos afetaram a incidência dos raios cósmicos na Terra, resultando em uma considerável baixa de produção de isótopos cosmogênicos.

2.1.1. ${}^7\text{Be}$ na Atmosfera

Segundo Papastefanou (2009) o tempo médio de residência do ${}^7\text{Be}$ na atmosfera inferior é de 8 dias, esse tempo de residência também depende da frequência da precipitação que é o principal meio do transporte do ${}^7\text{Be}$ até a superfície terrestre (KASTE *et al.*, 2002).

Cannizzaro *et al.*, (2004) analisou o comportamento temporal (diário, mensal e anual) da concentração do ${}^7\text{Be}$ no ar próximo ao solo e sua correlação com a atividade solar de 21 anos. Seus resultados confirmaram a relação inversa entre as duas variáveis. Ioannidou *et al.*, (2005) mediram as concentrações mensais atmosféricas do ${}^7\text{Be}$ em Thessalonike, obtendo os maiores valores no verão e os menores no inverno; mesmo assim, os resultados da estação do

verão foram relacionados com a elevação da tropopausa e ao transporte vertical das massas de ar na troposfera, os dois fenômenos ocorrendo durante os meses mais quentes.

As variações na concentração do ^7Be na troposfera estão ligadas a quatro situações principais que são (FEELY *et al.*, 1989):

1. O incremento da taxa de transporte entre as massas de ar da estratosfera (com altas concentrações de ^7Be) e a troposfera, isso ocorre principalmente nas latitudes médias e no início da primavera.

2. A diminuição da estabilidade na troposfera durante os meses quentes, o que aumenta o transporte vertical das massas de ar entre a troposfera superior e a média e baixa troposfera.

3. O efeito da variação sazonal que transporta as massas de ar da troposfera das latitudes médias até as altas latitudes (transporte horizontal).

4. A variação na taxa da deposição úmida do aerossol atmosférico que transporta o ^7Be pela precipitação e suas mudanças estacionais.

2.1.2. ^7Be na Precipitação

Este radionuclídeo (^7Be) ingressa ao solo por duas vias: a deposição úmida (chuvas), que é a principal fonte de entrada e representa aproximadamente o 90% e a deposição seca (ação da gravidade), que representa menos do 10% (BENITEZ *et al.*, 1999; WALLBRINK e MURRAY, 1994).

Investigações anteriores realizadas em diferentes regiões e ambientes, têm demonstrado que o fluxo de ^7Be na deposição úmida está relacionado de maneira direta com a quantidade da precipitação (JURI AYUB *et al.*, 2009; JURI AYUB *et al.*, 2012; KASTE *et al.*, 2002), resultando no fato de que os padrões estacionais de deposição estão estreitamente associados

com a variabilidade das chuvas (CAILLET *et al.*, 2001; FEELY *et al.*, 1989; JURI AYUB *et al.*, 2009; JURI AYUB *et al.*, 2012; KASTE *et al.*, 2011).

Andrello *et al.*, (2010) com trabalho na cidade de Londrina, verificou que o ^7Be é fortemente absorvido nos primeiros 2 cm do solo, independentemente da precipitação pluviométrica. A pesquisa de Marestoni *et al.*, (2009) também na cidade de Londrina, indicaram uma profundidade de relaxação de massa de $4,71 \pm 0,22 \text{ kg.m}^{-2}$ e um coeficiente de correlação entre o inventário de ^7Be no solo e a precipitação igual a $r^2 = 0,86$. Lohaiza *et al.*, (2011) em pesquisas na província de San Luis - Argentina, obtiveram a correlação entre o depósito atmosférico do ^7Be e a magnitude da precipitação. Wallbrink e Murray, (1994) estimaram uma correlação entre a atividade do radionuclídeo depositado no local de estudo e a precipitação, o valor registrado foi de $r^2 = 0,60$.

Talpos *et al.*, (2005) indicam que em uma escala de tempo menor de um ano os processos atmosféricos são as principais causas da variação temporal da concentração de ^7Be no ar próximo ao nível do solo. Para eles o coeficiente de correlação entre a atividade de ^7Be no ar e a precipitação apresenta variações sazonais e geográficas. Nas regiões tropicais e equatoriais, a taxa de precipitação é alta, os coeficientes de correlação são máximos. Nas latitudes médias a atividade solar e os fenômenos atmosféricos determinam a variabilidade da concentração de ^7Be no ar da superfície terrestre. Nas regiões polares o coeficiente de correlação é zero, mostrando que a deposição seca, os processos turbulentos de trocas de ar atmosféricos e a atividade solar são os agentes principais.

2.2. Estimativas de redistribuição do solo usando o ^7Be

Blake *et al.*, (1999) propuseram o modelo de distribuição do ^7Be no solo. O mesmo está baseado na comparação do inventário no solo da área de estudo com o inventário do solo em uma área de referência (sítio estável e sem perturbações, próximo ao local de estudo, onde não ocorra erosão ou deposição de sedimentos). Quando o inventário de ^7Be for menor que o inventário da área de referência tem-se um processo de erosão. No entanto, se o inventário do ^7Be for maior que o inventário de referência, então tem-se uma região de deposição.

O método de conversão de atividades de ^7Be em quantidades de solo erodidas e sedimentos depositados foi proposto supondo que há uma forte e rápida fixação do ^7Be na superfície do solo, e que sua distribuição em profundidade é exponencial.

2.2.1. Modelo de distribuição do ^7Be no solo

Considerando que x (kg.m^{-2}) representa a profundidade mássica de solo medida da superfície e $C(x)$ a concentração de ^7Be expressa em termos de densidade mássica de atividade (Bq.kg^{-1}) na profundidade x , Schuller *et al.*, (2006) e Sepulveda *et al.*, (2008) propõem que a distribuição em profundidade da concentração em atividade pode ser representada por:

$$C(x) = C(0)\exp\left(\frac{-x}{h_0}\right) \quad (2)$$

sendo $C(0)$ a concentração em atividade total do perfil abaixo de $x = 0$, e h_0 (kg.m^{-2}), a profundidade mássica de relaxação, parâmetro este que varia com a forma da distribuição em profundidade do ^7Be no solo. Para um perfil exponencial de profundidade, 63% do ^7Be , ele estará retido na profundidade entre 0 e h_0 , podendo-se concluir que, quanto maior for o valor de h_0 , maior será a profundidade de penetração do ^7Be no solo.

O inventário de referência, A_{ref} (Bq.m^{-2}), é definido como a atividade total de ^7Be por unidade de área em uma área estável sem erosão, ou área de referência:

$$A_{ref} = \int_0^{\infty} C(x)dx = h_0 C(0) \quad (3)$$

O inventário, abaixo da profundidade x , $A(x)$ (Bq.m^{-2}) para a distribuição inicial é então:

$$A_x = \int_x^{\infty} C(x)dx = A_{ref} \exp\left(\frac{-x}{h_0}\right) \quad (4)$$

Como proposto por Schuller *et al.*, (2006) e Sepulveda *et al.*, (2008), medindo-se a concentração em atividade (C) em diferentes incrementos de profundidade de solo na área de referência e estabelecendo-se a massa em profundidade em cada incremento, os valores de $A(x)$ para as profundidades mássicas x correspondentes podem ser determinados. A partir da regressão linear entre $\ln(A(x))$ e x , é possível encontrar h_0 e A_{ref} .

2.2.2. Perdas de solo em um ponto de amostragem

Supondo que em um evento de chuva erosiva uma fina camada de profundidade mássica h (kg.m^{-2}) foi removida em um ponto de amostragem na área de estudo, o inventário de ${}^7\text{Be}$ remanescente neste ponto erodido, A (Bq.m^{-2}), será menor que A_{ref} . A massa de solo erodida por área, R (kg.m^{-2}), é igual à massa de solo da camada removida no ponto de amostragem. Substituindo $x = R$ na equação (4), a atividade remanescente neste ponto pode ser calculada pela equação 5:

$$A_R = A_{ref} \exp\left(\frac{-R}{h_0}\right) \quad (5)$$

Transformando a equação (5), a massa de solo erodida R por unidade de área no ponto de amostragem pode ser calculada a partir dos inventários de ${}^7\text{Be}$ obtidos na área de referência e na área de estudo:

$$R = h_0 \ln\left(\frac{A_{ref}}{A}\right) \quad (6)$$

A equação (6) indica que o parâmetro h_0 é um importante parâmetro para determinar a taxa de erosão de solo com base na medida total do inventário de ${}^7\text{Be}$ e constitui uma relação

linear entre a taxa de erosão e o logaritmo natural da razão do inventário de referência do inventário de ^7Be medido.

2.2.3. Deposição de sedimento em um ponto de amostragem

Se o inventário de ^7Be medido, A' ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$) para um ponto de amostragem na área de estudo é maior que A_{ref} , assume-se que ocorreu uma deposição de sedimento neste ponto. Segundo Schuller *et al.*, (2006) e Sepulveda *et al.*, (2008) é possível estimar a massa de sedimento depositada por unidade de área, R' ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$), dividindo a atividade em excesso ($A' - A_{ref}$) pela concentração em atividade média de ^7Be do sedimento depositado naquele ponto, C_d ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$), como na equação 7:

$$R' = \left(\frac{A' - A_{ref}}{C_d} \right) \quad (7)$$

A estimativa do valor de C_d é feita pela média dos valores das concentrações de atividade de ^7Be dos pontos de perda de sedimentos. A concentração em atividade de ^7Be do sedimento erodido de um ponto, C_e ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) pode ser estimada a partir da razão entre a fração do inventário perdido neste ponto, pela massa de sedimento erodida por unidade de área, o que é dado por:

$$C_e = \left(\frac{A' - A_{ref}}{R} \right) = \frac{A_{ref} \left[1 - \exp\left(\frac{-R}{h_0}\right) \right]}{R} \quad (8)$$

A concentração média em atividade de ^7Be do sedimento depositado C_d pode ser estimada como a média ponderada da concentração em atividade, C_e , do sedimento mobilizado da área S situada à montante :

$$C_d = \frac{\sum C_e R}{\sum R} \quad (9)$$

Utilizando os parâmetros A_{ref} e h_0 estabelecidos da distribuição vertical inicial de ^7Be no solo (isto é, do sítio de referência), e as equações (6) e (7), as taxas de erosão e deposição nos pontos de amostragem na área de estudo podem ser estabelecidos.

2.2.4. Principais pressupostos da técnica do ^7Be

De acordo com Walling *et al.*, 1999 e Schuller *et al.*, 2006, para estimar a redistribuição do solo usando o método do ^7Be , é necessário levar em conta três suposições-chave:

1. Qualquer quantidade de ^7Be pré-existente no solo antes do evento de erosão a ser investigado, deve estar uniformemente distribuída em toda a área de estudo.
2. A deposição da precipitação de ^7Be associado ao evento de erosão também deve ser espacialmente uniforme em toda a área de estudo.
3. O ^7Be depositado durante um evento de erosão deverá ser rapidamente fixado pelas partículas do solo e só poderá ser redistribuído pela mobilização e redistribuição destas partículas.

2.3. Vantagens e limitações do método do ^7Be

A grande utilidade do método do ^7Be é possibilitar a quantificação e avaliação de eventos erosivos de curto prazo escala de meses ou poucos anos ou individuais, portando um potencial para investigar a efetividade de práticas de conservação do solo (PINTO, 2011).

Uma facilidade para o uso do método (KASTE *et al.*, 2011) é que a área de referência pode ser preparada artificialmente num local próximo à área de estudo (PINTO, 2011).

Uma dificuldade no método é a amostragem para sua aplicação, como visto em Schuller *et al.*, (2006), que exige manuseio preciso e delicado das amostras de solo.

O uso do método do ^7Be é restrito aos solos sem cobertura, uma vez que o radioisótopo depositado junto à chuva é rapidamente fixado na vegetação, e desse modo a densidade e a natureza da cobertura vegetal influenciam nas atividades do radioisótopo no solo (PINTO, 2011; KASTE, 2011).

3. DESCRIÇÃO DO LOCAL DE TRABALHO

3.1. Localização

A bacia do córrego Mato Frio, localiza-se entre os paralelos 20°04'00" e 20°08'00" sul e entre os meridianos 44°28'00" e 44°31'00" oeste (Figura 1). Está quase totalmente inserida no município de Itaúna, com exceção de uma pequena faixa no extremo norte localizada no município de Mateus Leme, abrangendo uma área total de drenagem de 10,6 km² (Soares, 2010). No entanto, esta bacia está composta por seis sub-bacias (DRUMOND, 2008). As áreas de trabalho selecionadas para o desenvolvimento desta pesquisa localizam-se dentro das sub-bacias 3 e 4, as mesmas tem um área de drenagem de 1,46 km² e 0,84 km² respectivamente (Figura 2).

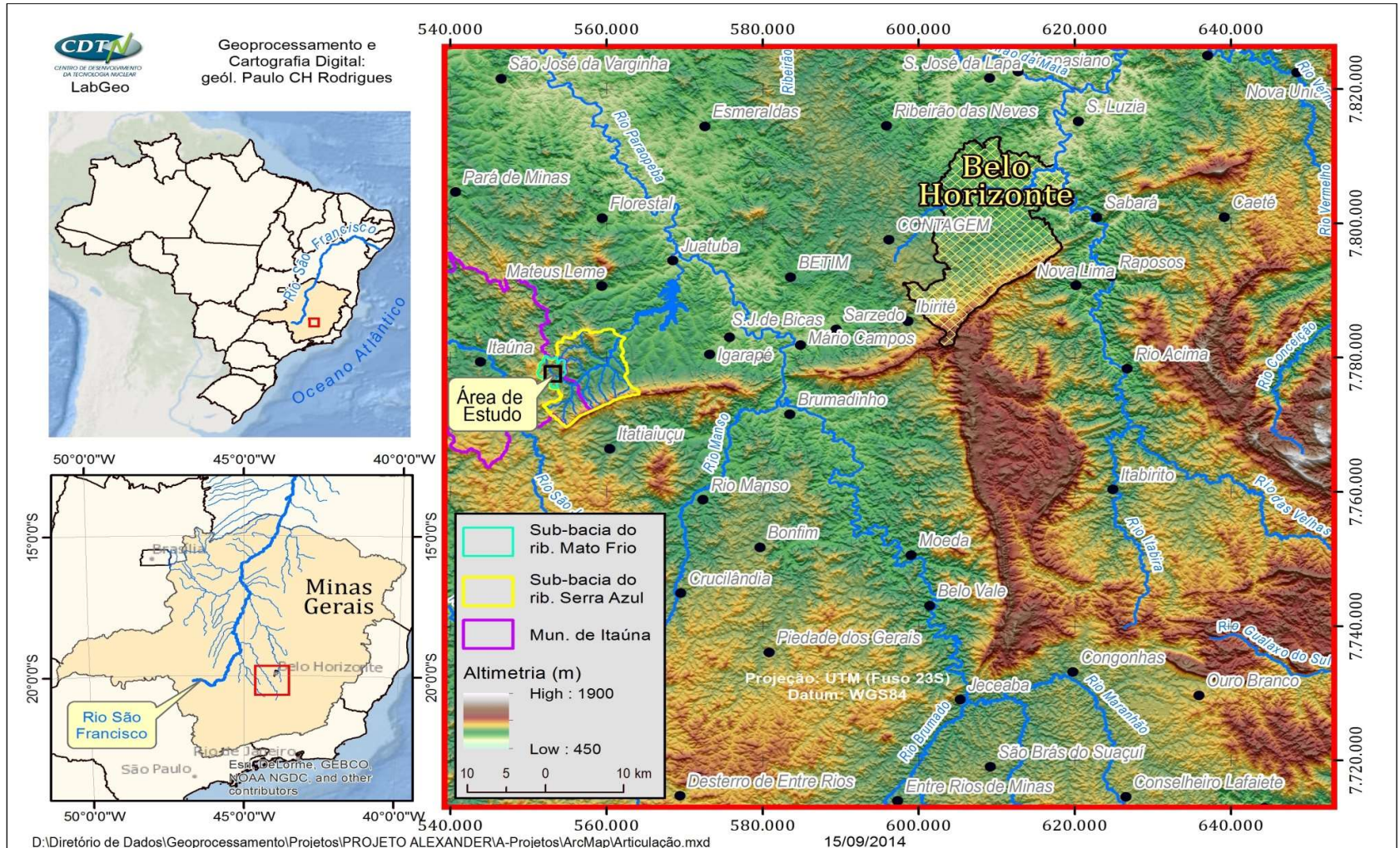
O Córrego Mato Frio é um dos principais cursos de água formadores da Bacia do Rio Serra Azul, situado a cerca de 50 km a sudoeste de Belo Horizonte, MG, uma das principais metrópoles do planalto central do Brasil. A importância desta bacia está relacionada com um grande reservatório de água construído em seu curso inferior, que é um dos três maiores sistemas de suprimento de água potável (2,5 m³.s⁻¹) para a região metropolitana de Belo Horizonte (ca. 4 milhões de habitantes). Além do abastecimento de água, duas outras atividades conflitivas são praticadas no interior da região da bacia; a agricultura de vegetais na área central e a mineração intensiva de minério de ferro nas regiões próximas às nascentes ao sul. Além disso, esta é considerada uma Bacia Experimental, posto que na mesma foi instalada a uma rede hidro meteorológica operada pela ANA, CPRM e, em menor escala, por outras instituições de pesquisa.

Com relação à microbacia do córrego Mato Frio, ele cobre uma área de ca. 8 km² e tem uma conformação montanhosa com declividades acentuadas em determinadas posições. Portanto a mais intensiva atividade na mesma é a pecuária e deste modo, tanto a os campos de pastos em encostas como o constante pisoteio do gado promovem a erosão do solo no local. A carga de sedimento chegando aos cursos d'água, composta com aquela proveniente da atividade

minerária, resulta em no aumento do assoreamento a jusante, com severas perdas de volume útil no reservatório e em detrimento da qualidade de suas águas.

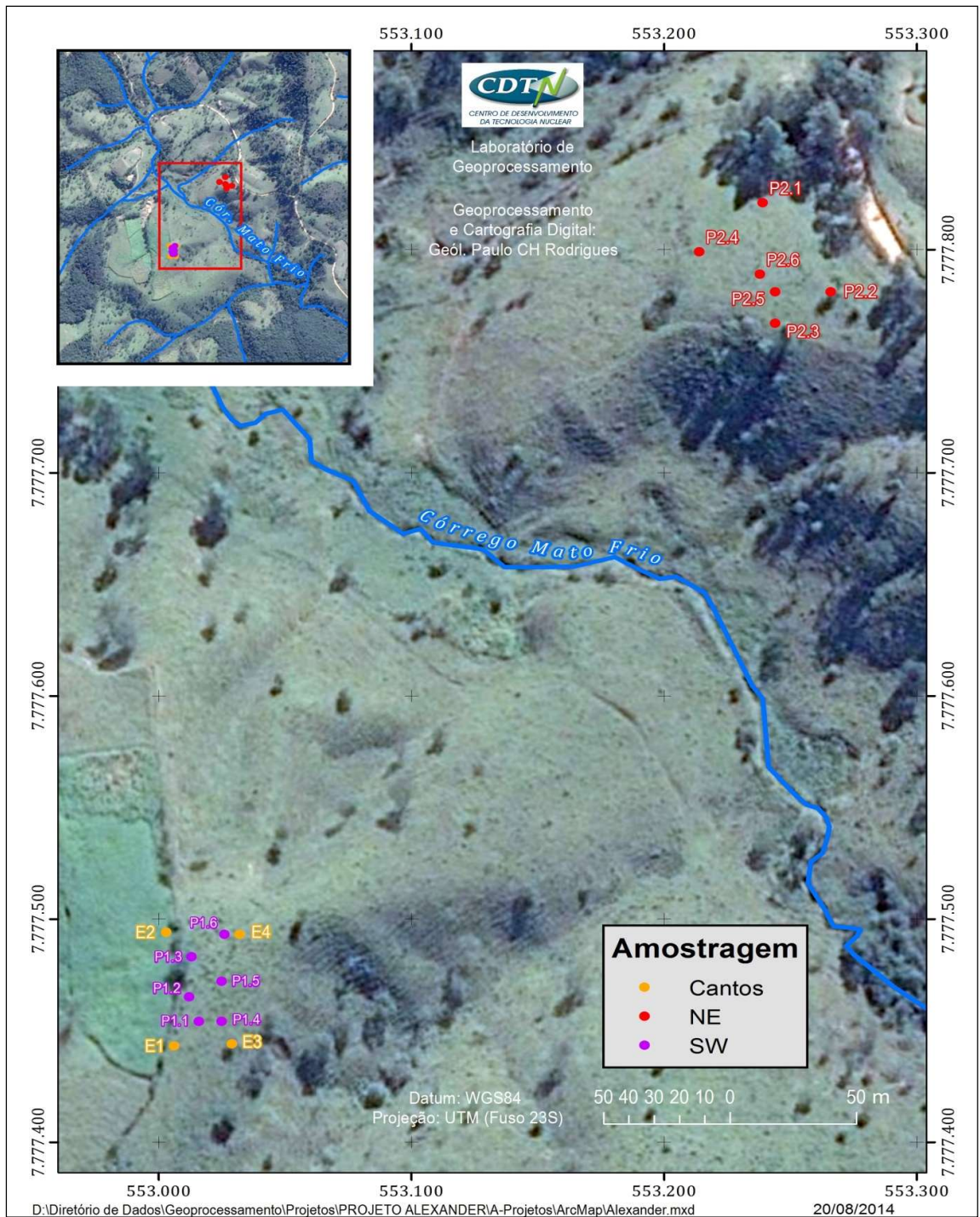
As áreas de amostragem, nas quais se encontram as parcelas de trabalho são parte de duas fazendas particulares, e as atividades principais desenvolvidas são a cria de gado e cavalos. A Figura 1, apresenta um mapa geral da Bacia do ribeirão Serra Azul, dentro da qual se encontra a Bacia do Córrego Mato Frio, que sua vez se localiza no Município de Itaúna, MG. Na Figura 2, se apresenta a localização das parcelas de trabalho e dos pontos de amostragem.

Figura 1 – Localização e altimetria da Bacia do Córrego Mato Frio, Município de Itaúna, MG.



Fonte: Elaborado pelo Geólogo Paulo CH Rodrigues, 2014. Laboratório de Geoprocessamento do CDTN.

Figura 2 - Localização da área de estudo e dos pontos de amostragem na Bacia do Córrego Mato Frio, Município de Itaúna, MG.



Fonte: Elaborado pelo Geólogo Paulo CH Rodrigues, 2014. Laboratório de Geoprocessamento do CDTN.

3.2. Geomorfologia

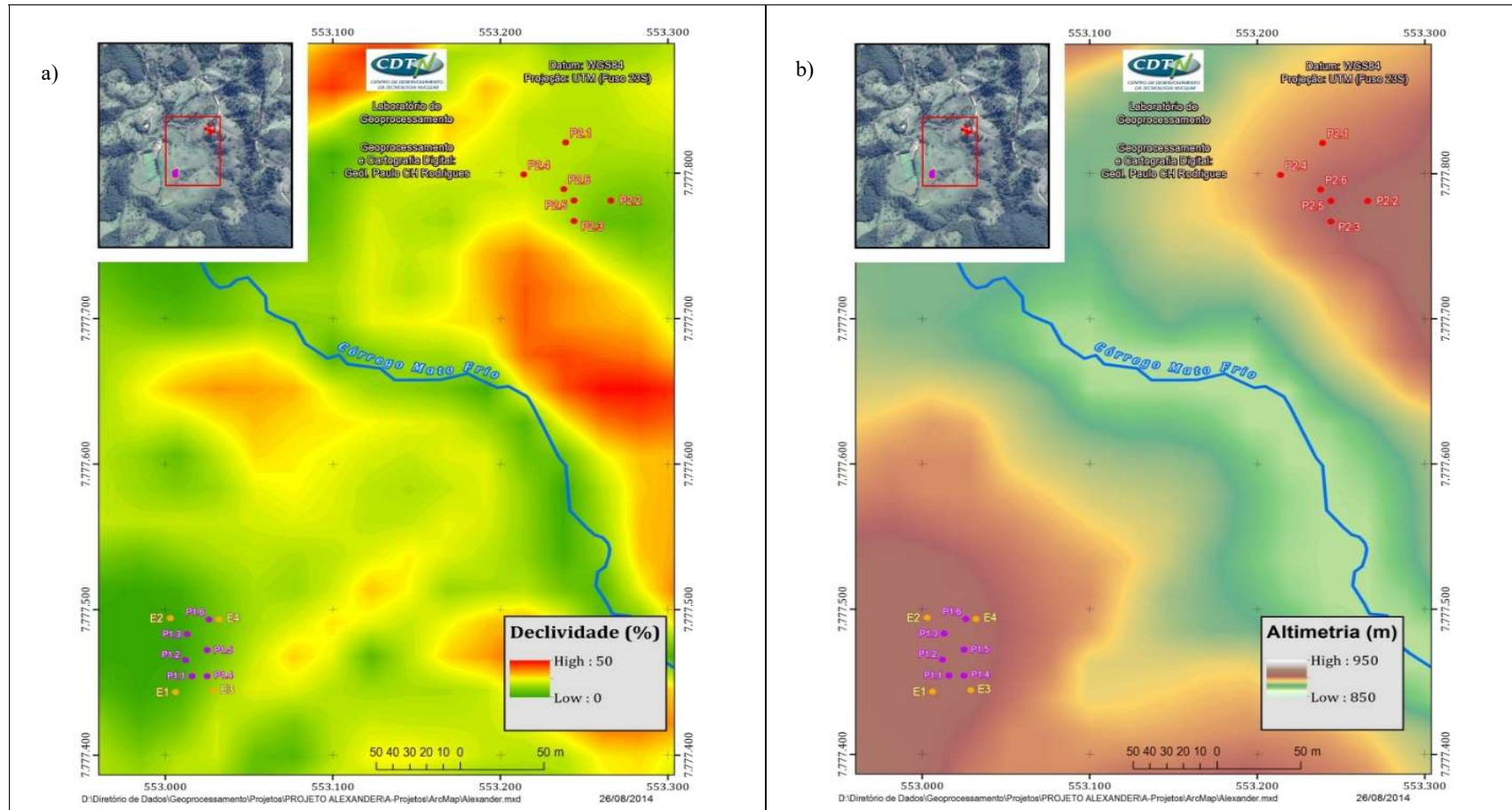
O relevo da bacia de Juatuba é bastante acidentado, apresentando uma topografia ondulada, com morros convexos, com encostas suaves (Franz, 1981). A conformação do relevo nas sub-bacias do córrego Mato Frio refletem diretamente na resposta dessas áreas aos eventos de precipitação, facilitando ou não a infiltração e reduzindo o escoamento superficial (SOARES, 2010). Na Tabela 1 e na Figura 3, mostra-se a informação relacionada à declividade e altimetria nos sítios de trabalho.

Tabela 1 - Variação da Declividade e Altimetria nas parcelas de trabalho.

Ponto	Declividade (%)	Altimetria (m)	
Parcela 1	E1	3	910
	E2	0	910
	E3	14	909,6
	E4	9	909,3
Parcela 2	E1	18	901,7
	E2	10	909,2
	E3	14	907,5
	E4	20	900,7

Fonte: Elaborado pelo autor, 2015. A partir das informações do Laboratório de Geoprocessamento do CDTN, Dados de Altimetria e Declividade: derivados dos dados altimétricos da folha IGA (1:25.000), 2014.

Figura 3 - Mapa de Declividade e Altimetria nas parcelas de trabalho.



Legenda: a) Porcentagem (%) de declividade

b) Elevação em metros (m)

Fonte: Elaborado pelo Geólogo Paulo CH Rodrigues, 2014. Laboratório de Geoprocessamento do CDTN.

3.3. Pedologia

De acordo com os dados primários obtidos dos estudos realizados por Drumond em 2008, os solos nos pontos estudados são do tipo muito profundos, os grupos texturais observados variam de média a muito argilosa. Na bacia do córrego Mato Frio existem duas classes de solo dominantes.

Na margem esquerda o latossolo ocupa grandes áreas. Os solos são bem a fortemente drenados, muito porosos, profundos ou muito profundos, resistentes à erosão e muito permeáveis. O pH destes solos varia em torno de 4,5 a 5,0 além de apresentarem baixa fertilidade natural.

Na margem direita o Argissolo é predominante. Os solos são normalmente profundos ou moderadamente profundos, são solos bem a moderadamente drenados, apresentam problemas relacionados com processos erosivos de maior intensidade, o pH situa-se em torno de 4,5 (SOARES, 2010).

3.4. Uso da Terra e Cobertura Vegetal

Os usos da Terra solo nas sub-bacias 3 e 4 são os seguintes: cultivo de cana e campineira, pastos e água em pequenos barramentos. Além das variações do Cerrado na cobertura vegetal, são também encontradas mata ciliar, remanescente de Mata Atlântica e vegetação típica de brejo.

Na Tabela 2 são apresentadas a distribuição dos usos do solo e suas porcentagens nas duas sub-bacias do córrego Mato Frio (SOARES, 2010) onde desenvolveu-se este trabalho de pesquisa.

Tabela 2 - Distribuição das coberturas vegetais naturais e plantadas e suas porcentagens nas sub-bacias 3 e 4 do córrego Mato Frio

	Sub-bacia 3	Sub-bacia 4
	%	%
Pasto	69	75
Pasto Sujo	5,1	-
Remanescente de Mata Atlântica	18	9,5
Mata Alterada	6,4	11
Lagoa	-	0,20
Mata Ciliar	1,2	-
Campineira	-	4,4
Afloramento Rochoso	-	-

Fonte: SOARES, 2010, p. 58.

O solo onde se desenvolve a pesquisa específica, está coberto em sua totalidade por pasto, pois essas fazendas são usadas principalmente para a cria: gado de leite e corte, contando com algumas árvores que se encontram dispersas e fora do área de trabalho.

3.5. Clima

O clima da região do córrego Mato Frio é caracterizado por uma estação quente e chuvosa, entre os meses de novembro e março e por uma época predominantemente seca entre junho e agosto (NEVES, *et. al.* 2004). Conforme a série de dados climatológicos das estações Serra Azul (código 02044054) e Alto da Boa Vista (código 02044021), as temperaturas médias mensais variam entre 16°C e 23°C, e os extremos valores de temperatura do ar são de 4°C e 34°C.

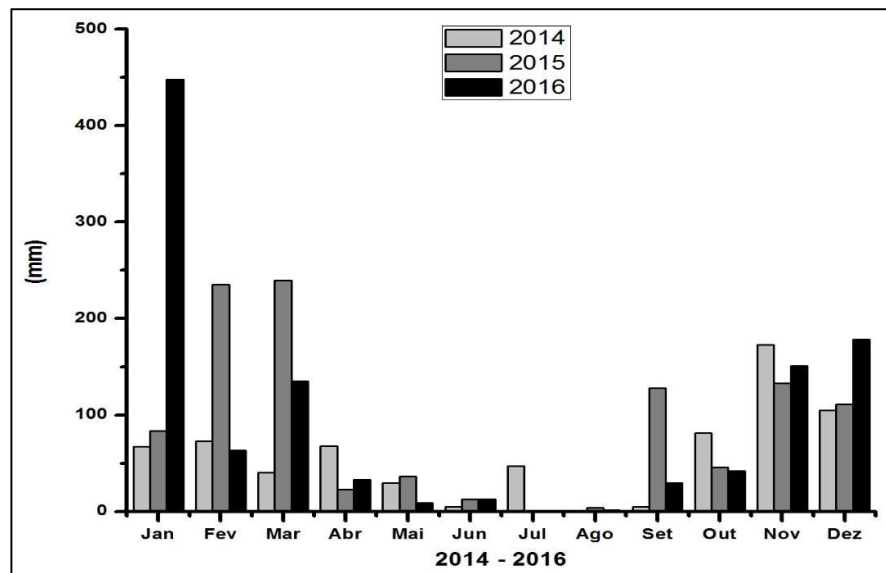
Os meses mais frios são junho, julho e agosto e os mais quentes são janeiro, fevereiro e março. A partir dos dados de temperatura do ar e de precipitação o clima foi classificado, segundo Köppen, como sendo Clima Tropical de Altitude (Cwa), também caracterizado por ser um clima temperado úmido com inverno seco e verão quente (SOARES, 2010).

3.6. Pluviometria

O dados da precipitação diária, mensal e anual da bacia do córrego Mato Frio foram obtidos dos registros da estação pluviométrica Fazenda Laranjeiras (www.snirh.gov.br/hidroweb/ FAZENDA LARANJEIRAS-JUSANTE, Código da Estação: 02044041, Responsável: ANA, Entidade Operadora: CPRM, Estado: Minas Gerais, Cidade: Itaúna, Bacia: Rio São Francisco, Micro-bacia: Rios São Francisco, Paraopeba E). Foram utilizados os dados históricos da precipitação anual dos primeiros trinta e nove anos desta bacia e obteve-se um valor médio de 1.480,3 mm entre os anos 1977 a 2015. O período chuvoso da região onde encontram-se as parcelas de trabalho tem início no mês de outubro e finaliza no mês de março.

Analisando as precipitações ocorridas de 2014 até 2016 (Figura 4), pode-se notar uma diminuição no volume das chuvas para o ano 2014 em relação aos anos seguintes; no entanto, o comportamento de distribuição sazonal destas continua sendo o mesmo, já que os volumes mais representativos ocorrem no intervalo de outubro até março.

Figura 4 - Precipitação entre 2014 e 2016: Estação Fazenda Laranjeiras (02044041)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

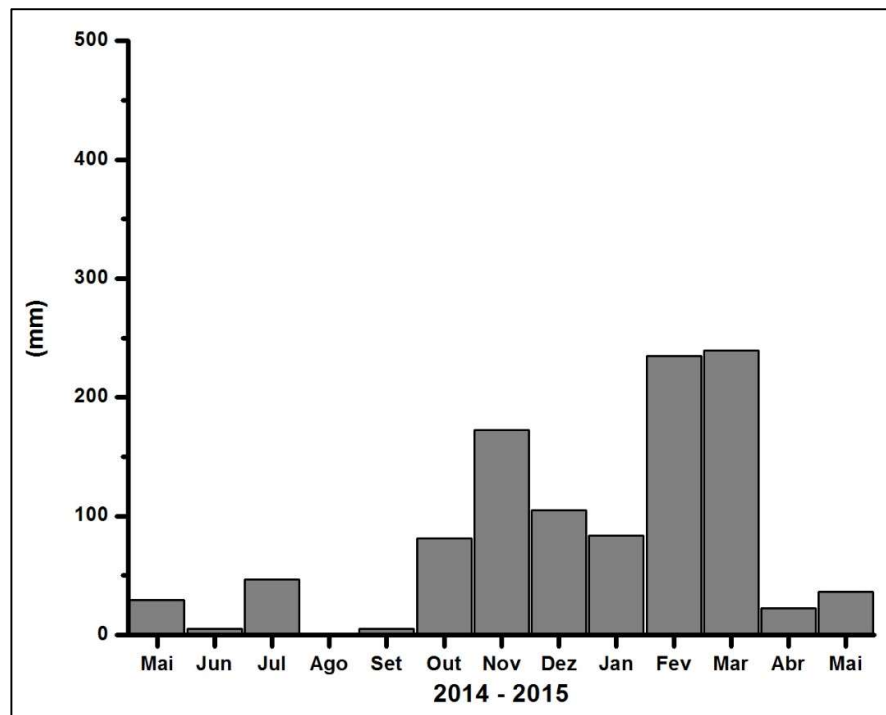
Nota: A partir dos dados obtidos da Estação Pluviométrica Fazenda Laranjeiras, na web www.snirh.gov.br/hidroweb

A Figura 4 também indica que de abril a setembro, há uma diminuição dos eventos de chuva, que quando ocorre tem um carácter esporádico e em quantidades muito menores em relação ao período anterior.

Considerando que o fluxo de ^7Be na deposição úmida está relacionado diretamente com a quantidade da precipitação (JURI AYUB, *et al.*, 2009; JURI AYUB, *et al.*, 2012; KASTE, *et al.* 2002), pode-se esperar que as maiores atividades de densidade superficial (Bq.m^{-2}) do ^7Be contidas na camada superior do solo das parcelas de trabalho, ocorram entre os meses de outubro até março.

As precipitações totais para os períodos de tempo analisado (Figura 5 e Figura 6) foram 1.062,6 mm e de 1.064.2 mm respectivamente.

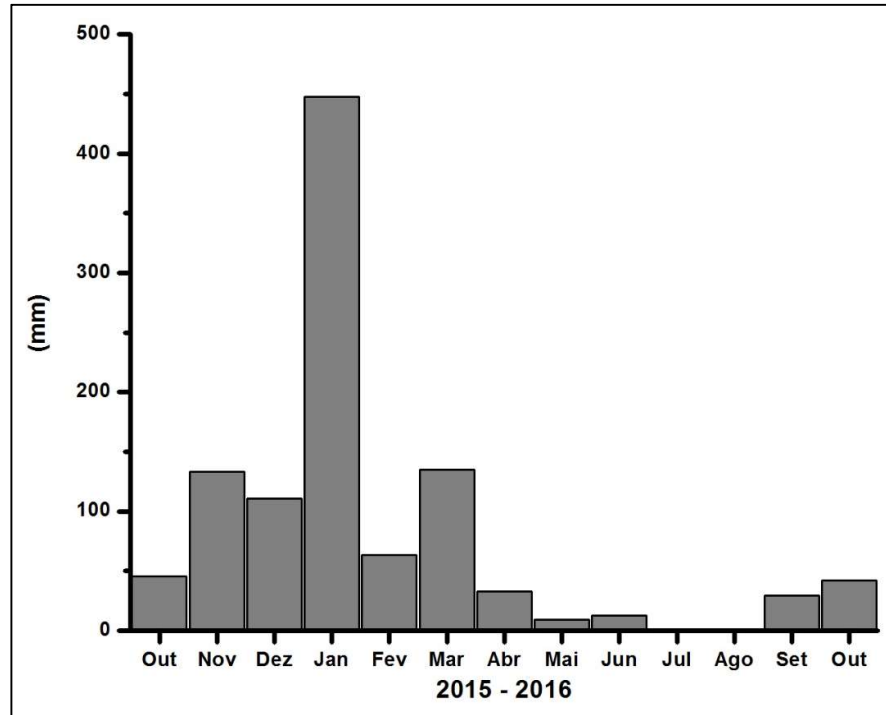
Figura 5 – Precipitação na área de estudo no período de 2014 a 2015, Estação Fazenda Laranjeiras - MG



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Nota: A partir dos dados obtidos da Estação Pluviométrica Fazenda Laranjeiras, na web www.snirh.gov.br/hidroweb

Figura 6 – Precipitação na área de estudo no período de 2015 a 2016, Estação Fazenda Laranjeiras - MG



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Nota: A partir dos dados obtidos da Estação Pluviométrica Fazenda Laranjeiras, na web www.snirh.gov.br/hidroweb

4. METODOLOGIA

No Brasil foram realizadas pesquisas neste tema em diferentes regiões. Contudo, não existem estudos contínuos nos quais tenham sido analisados os diversos componentes que envolvem o uso eficiente da técnica de ^7Be como traçador no transporte de sedimento por eventos de chuva. Foi por esta razão, que se fez o contato com o Grupo de Estudos Ambientais (GEA) do Instituto de Matemática Aplicada de San Luis (<http://gea.unsl.edu.ar/>), que possui pesquisadores com grande experiência no emprego da técnica do ^7Be , tendo trabalhado na modelagem de processos erosivos e de sedimentação de solo causados pelas precipitações, bem como também na elucidação dos processos de ingresso do ^7Be da atmosfera para a superfície da Terra.

Finalizada a primeira etapa (Linha de base: confirmação da presença de ^7Be nos solos das parcelas de estudo, bem como seu comportamento no tempo) desta investigação, fazia-se extremamente necessário confirmar se os cálculos realizados foram corretos, já que era sabido que a principal limitante neste tema que radicava na falta de experiência com o uso e manejo da técnica objeto de estudo. Esta confirmação foi realizada em trabalhos em conjunto com o “Grupo de Estudos Ambientais do Instituto de Matemática Aplicada de San Luis - Universidad Nacional de San Luis”, no período de abril a setembro de 2016.

Os trabalhos no GEA fizeram parte do projeto de pesquisa PROIPRO 02-1516, intitulado "Ingresso de aerossóis desde a atmosfera: suas variações estacionais e aplicações potenciais". Neste projeto o trabalho foi especificamente realizado dentro do componente: “Uso do FRN ^7Be para estimar taxas de erosão de solo”.

4.1. Coleta da Amostra de Solo

Uma das principais limitações para o uso efetivo de fallout de ^7Be na aplicação de modelos visando melhor entender os processos de erosão e sedimentação, é conseguir precisão da amostragem vertical para estabelecer sua distribuição em profundidade nas camadas do solo,

e desta forma, identificar a profundidade de distribuição exponencial de ^7Be no sítio de referência.

Nesse sentido, foi necessário o aprimoramento de técnicas nos trabalhos de campo feitos na bacia do córrego Mato Frio (Minas Gerais-Brasil) e na cidade da Cumbre (San Luis-Argentina), e que são descritas a seguir.

4.1.1. Prato Raspador (*Scraper Plate*) da IAEA

Este equipamento (Figura 7) tem dois componentes principais: uma base metálica retangular que é introduzida na superfície do solo e uma placa de metal ajustável que pode se mover ao longo do quadro. A profundidade pode ser controlada com o auxílio de uma barra fixadora do prato raspador em que existem marcações de profundidades pré-definidas, possibilitando a amostragem em profundidades conhecidas.

Este sistema tem sido amplamente utilizado inclusive em algumas pesquisas desenvolvidas no Brasil (MARESTONI, 2007; YONG, 2008).

Figura 7 - Características do Prato Raspador (*Scraper Plate*).



Fonte: YONG, 2008, p. 7.

As coletas de solo na bacia do córrego Mato Frio foram feitas de acordo à tecnologia do Prato Raspador. Em cada superfície do ponto de amostragem foi definida um área de trabalho

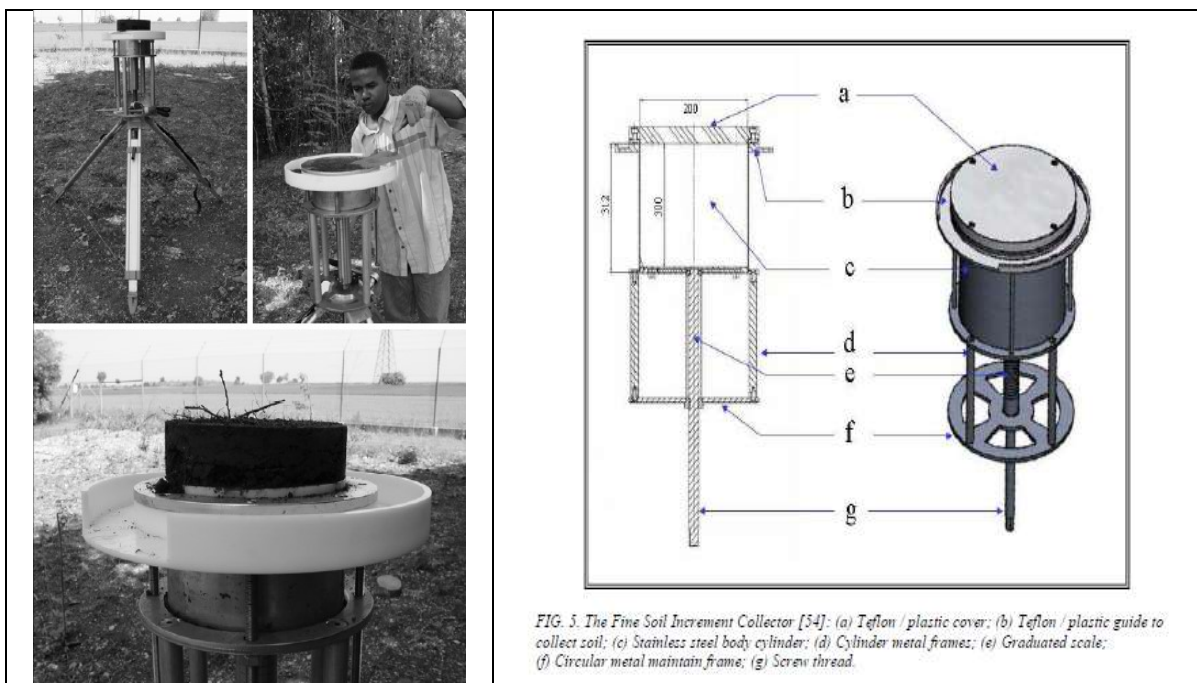
de 50 cm de comprimento por 20 cm de largura. Depois usou-se uma régua junto a uma espátula para raspar até uma profundidade determinada e coletar a amostra de solo.

No período de maio de 2014 até maio de 2015, a profundidade de corte nos pontos de amostragem foi de 1 cm somente. Porém, de outubro de 2015 até outubro de 2016 os intervalos na profundidade de corte no sítio de referência variaram entre 1 cm a 2,5 cm, até alcançar os 5 cm de profundidade.

4.1.2. Fine Soil Increment Collector (FSIC) da IAEA

A Unidade de Ciências do solo da Agência Internacional de Energia Atômica - IAEA (sigla em inglês) em cooperação com a Oficina Mecânica Seibersdorf, desenvolveu o protótipo FSIC (Figura 8). Esta equipamento pode tirar amostras de solo e fazer cortes do mesmo em incrementos de profundidade ao mm e garante a quantidade de massa suficiente para fazer medições confiáveis da atividade de ^7Be por espectrometria gama (IAEA, 2014).

Figura 8 - Características do equipamento: Fine Soil Increment Collector (FSIC).



Fonte: IAEA, 2014, p. 115-116.

O Grupo de “Estudos Ambientais do Instituto de Matemática Aplicada” de San Luis Argentina realiza as coletas da maneira seguinte: em cada ponto colhem-se três amostras de solo cada uma num cilindro de 10,5 cm de diâmetro. Posteriormente, no laboratório, utiliza-se o FSIC junto a uma espátula para fatiar o solo contido em cada cilindro em capas de 2 mm até alcançar uma profundidade de 20 mm. Esta metodologia foi aplicada no sitio de referência e nos pontos da área de estudo.

4.1.3. Coletor de Solo de Baixa Profundidade (CSPP⁷Be)

Após analisar os diferentes equipamentos para coletar amostras de solo em nível superficial, e observar suas vantagens e desvantagens; construiu-se um dispositivo que tem algumas das características de maior relevância das tecnologias usadas e que ajusta-se aos objetivos desta pesquisa. O protótipo inicial que foi desenvolvido dentro do CDTN recebeu o nome de: “*Coletor de Solo de Baixa Profundidade (CSPP⁷Be)*”, e tem como objetivo coletar amostras de solo em quatro profundidades ou posições diferentes. O operador pode regular de maneira fácil a profundidade em que precisa retirar as amostras, tendo a certeza que em cada corte que faça terá uma precisão da ordem de milímetros. Os resultados dos testes realizados até agora com o protótipo mostram que o mesmo poderia ser usado com êxito em áreas carentes de toda cobertura vegetal (zonas aradas).

4.2. Coleta da Água de Chuva

4.2.1. Ingresso de ⁷Be a partir da atmosfera (Mato Frio, Brasil)

A partir do mês de outubro de 2015, foi instalado no espaço de referência um equipamento para coleta de água de chuva com frequência mensal, montado no próprio Laboratório de Sedimentologia do CDTN com peças avulsas disponíveis no mesmo.

Utilizou-se um funil e o invólucro de um pluviômetro digital. O funil foi conectado por meio de uma mangueira a um recipiente plástico com capacidade de 3,785 litros. Este recipiente foi colocado dentro de uma caixa térmica plástica para protegê-lo de agentes externos que pudessem deteriorá-lo e foi trocado com frequência mensal. Este sistema foi empregado apenas para a coleta das amostras de água de chuva, os dados da precipitação foram obtidos do pluviômetro instalado na estação Fazenda Laranjeiras.

4.2.2. Ingresso de ^7Be a partir da atmosfera (San Luis, Argentina)

Coleta de amostras: estabeleceu-se um sistema de monitoração do ingresso de ^7Be através das chuvas, seguindo a padrão. O sistema era constituído por um coletor de chuva com uma superfície de captura de $0,5 \text{ m}^2$, acoplado a um tanque para conter a chuva coletada. Associado ao mesmo instalou-se um pluviômetro para o registro da magnitude da precipitação. O coletor de chuva foi diariamente lavado com água destilada e somente foram coletados eventos individuais de precipitação.

Preparação de amostras: as amostras coletadas foram tratadas seguindo o procedimento padrão: filtradas e acondicionadas em frascos Marinelli afim de determinar o conteúdo de ^7Be . Devido às características próprias da região que condicionam o teor atmosférico de ^7Be , assim como a características dos detectores gama utilizados na determinação, avaliou-se a aplicação de diferentes técnicas de concentração das amostras de chuva, nominalmente: evaporação e precipitação.

Análise dos dados: com o objetivo de obter registros completos e confiáveis das precipitações que caracterizam uma dada região, trabalhou-se com as bases de dados obtidas a partir da Tropical Rainfall Measuring Mission (Acker and Leptoukh, 2007). Embasados na informação pluviométrica obtida e no conteúdo de ^7Be medido na chuva, foram aplicados modelos simples para estimar o conteúdo esperado de ^7Be no solo, devido à deposição úmida (chuvas).

4.3. Plano de Amostragem, Área de Amostragem e Preparação das Amostras

O plano de amostragem define a maneira como os pontos a ser amostrados (sítio de referência e área de estudo) são selecionados e as relações de comparação que se podem estabelecer entre os mesmos. Neste plano se definem também outros aspectos como: tipo de estudo a elaborar, metodologia de amostragem a utilizar, profundidade de amostragem, número de amostras e outros.

4.3.1. Plano de Amostragem

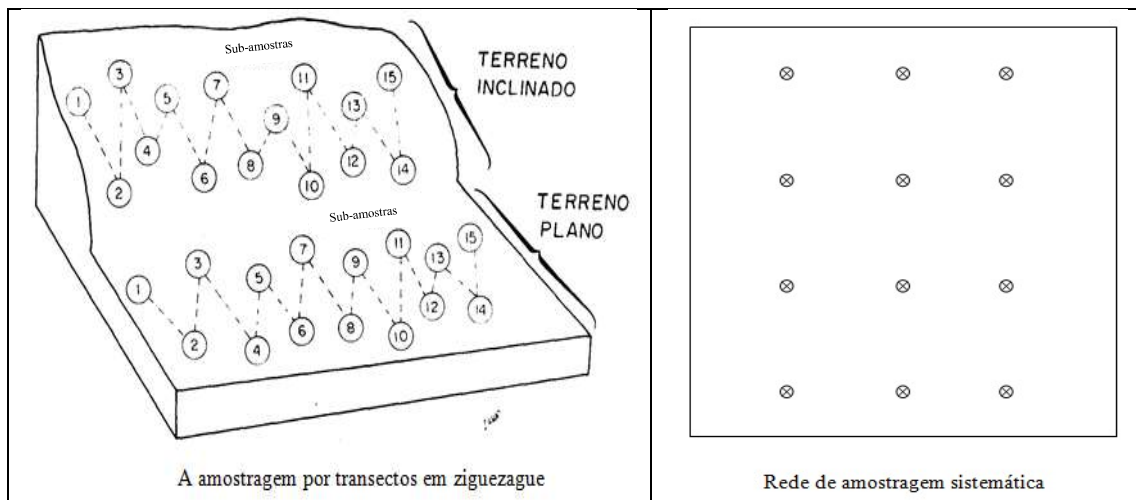
O estudo desenvolvido foi de carácter analítico pois buscou-se fazer comparações entre as taxas de redistribuição de solo na área de trabalho e o sítio de referência selecionado. É importante ressaltar que na primeira etapa deste estudo foi realizado um levantamento preliminar para estabelecer a linha de base referente ao conteúdo de ^7Be nos solos da bacia do córrego Mato Frio e sua variabilidade nos diferentes meses do ano.

Foi escolhida a amostragem sistemática (regular) para realizar a coleta de amostras de solo, que baseia-se em seguir um padrão geométrico específico onde as amostras são tomadas a intervalos regulares varrendo toda a área a ser amostrada (Figura 9). É um padrão útil para cobrir de forma fácil e uniforme um sítio, de uma maneira tal que toda a população esteja representada na amostra segundo o padrão escolhido.

É útil para estimar com precisão: zonas críticas, características estatísticas do sítio, e tendências. Adapta-se facilmente a estudos estatísticos. Suas principais vantagens são: assegura que a população esteja representada de forma total e uniforme, não requer o conhecimento prévio do sítio ou a população (IAEA, 2009). A amostragem sistemática não estratificada é a mais empregada em estudos de radionuclídeos usando para isto tanto transectas como redes (Figura 9).

As amostras de solo obtidas devem incorporar todo o inventário do fallout presente no solo, e para isto deve-se fazer medições prévias para estimar a profundidade da amostragem. Geralmente o ^7Be , devido a sua curta meia vida, não aparece nos solos em profundidades maiores do que 3 cm. As amostras coletadas no Sítio de Referência escolhido foram obtidas até 5 e 6 cm, e as amostras coletadas na área de trabalho foram obtidas até 1 e 5 cm.

Figura 9 - Esquema da amostragem Sistemática não Estratificada.



Fonte: IAEA, 2009.

4.3.2. Área de Amostragem

4.3.2.1. Seleção do local de estudo (Mato Frio, Brasil)

As duas parcelas estudadas se localizam próximas da cidade de Serra Azul, no centro-oeste do estado do Minas Gerais, Brasil, e apresentaram aproximadamente 6,5 % e 15,5 % de inclinação respectivamente. Estas parcelas constituem parte de duas fazendas particulares e foram liberadas por seus donos para o desenvolvimento desta pesquisa. No entanto, durante a primeira etapa do estudo trabalhou-se nas condições originais de uso dessas terras.

Os resultados obtidos das amostras analisadas no período de maio de 2014 a maio de 2015, constituíram a linha de base deste trabalho. Foram utilizadas nesta etapa da pesquisa duas áreas de iguais dimensões (50 m X 30 m). Em cada uma das duas áreas foi realizada uma amostragem em grade de 20 m X 5 m. A separação entre os pontos de coleta foi de 20 m. A frequência de amostragem foi mensal durante os 13 meses já citados, sendo que só no mês de outubro não se fez coleta alguma. A coleta foi praticada somente a 1 cm. A quantidade de amostras coletadas e analisadas foi de 70 unidades. Foram empregados aproximadamente 83 dias de análise para a parcela 1 e 63 dias para a parcela 2, perfazendo um total de 146 dias de análise.

Para a utilização da técnica do ^7Be é importante coletar as amostras do inventário de referência numa área que leve em consideração três fatores: 1) proximidade da área de estudo; 2) altitude similar e 3) ângulo de inclinação mínimo. Os dois primeiros quesitos são necessários para poder se afirmar que houve a mesma quantidade de precipitação em ambas as áreas. O último, é exigido devido ao fato de que o solo na área de referência não deve sofrer erosão ou deposição de solo, para, desta forma, servir como inventário de referência (IAEA, 2009).

A área de referência utilizada neste trabalho encontra-se a uma distância muito próxima das parcelas de trabalho e também faz parte da mesma propriedade. De outubro de 2015 a outubro de 2016 foram coletadas amostras de solo mensais até uma profundidade de 5 cm, para determinar a profundidade de penetração vertical que pode alcançar o radionuclídeo ^7Be .

4.3.2.2. Seleção do local de estudo e elaboração do esquema de amostragem (San Luis, Argentina)

Foram analisados, mediante fotografias aéreas, diferentes locais de utilização agrícola (sujeitos à prática de arado) que pudessem estar submetidos a processos erosivos. Em seguida realizou-se uma inspeção visual dos locais previamente delimitados, selecionando-se finalmente um local sujeito à prática desde há mais de 40 anos, localizado a 20 km da cidade de San Luis.

Para a elaboração do esquema de amostragem, foram analisadas as diferentes metodologias usuais. O número de perfis de solo a coletar por ponto de amostragem depende de diversos fatores: da massa necessária para análise por espectrometria gama (que depende por sua vez do detector gama a utilizar), do fracionamento do perfil que se realizará (número de camadas a se obter por perfil), que varia com o tipo de solo (densidade) e com o grau de precisão que se tem que analisar o perfil de distribuição vertical do elemento estudado.

Estes fatores foram examinados e resolveu-se por um fracionamento do perfil em camadas de 2 mm de espessura (até a profundidade máxima em que o ^7Be encontre-se detectável), requerendo-se uma massa entre 12 g e 50 g para análise; em razão do que foram coletados 3 perfis de solo em cada ponto de amostragem.

Na área selecionada a prática de arado é comum, realizou-se um estudo preliminar. Este consistiu na coleta de amostras sobre uma transecta paralelo aos sulcos de arado e a na direção da declividade e na coleta de amostras em um possível local sem declividade como potencial Sítio de Referência. Sobre a transecta foram marcados 3 pontos de amostragem, situados nas zonas alta, média e baixa (3 perfis por ponto de amostragem). No Sítio de Referência foi marcado um ponto de amostragem, tomando-se os três perfis correspondentes.

A amostragem preliminar permite conhecer a distribuição de ^7Be no Sítio de Referência, avaliar se o mesmo satisfaz a distribuição vertical requerida e se o conteúdo total de ^7Be corresponde ao estimado para deposição úmida.

4.3.3. Preparação das Amostras

4.3.3.1. Preparação de amostras (Mato Frio, Brasil)

Para o transporte das amostras coletadas nas parcelas de trabalho da bacia do córrego Mato Frio até o Laboratório de Sedimentologia do CDTN, foram usados sacos plásticos. A metodologia de preparação das amostras do solo, foi a seguinte:

- No Laboratório de Sedimentologia as amostras foram colocadas e distribuídas de maneira uniforme em bandejas plásticas. O propósito disso foi deixar as amostras secando ao ar por um período de 48 horas e dessa forma extrair a umidade contida no solo coletado.

- Já seca, cada amostra foi moída e triturada em sua totalidade. É importante lembrar que para cada amostra é coletado aproximadamente 1 kg de solo.

- Depois de ser completamente moídas e trituradas, as amostras foram passadas em peneira de 2 mm, para separar a fração maior do que 2 mm, a qual foi descartada de quaisquer análises.

- A fração do solo de cada amostra trabalhada abaixo de 2 mm foi pesada e acondicionada em porta amostra do tipo béquer Marinelli de 700 mL.

Tendo em consideração estes três fatores: a atividade de ^7Be presente no solo amostrado, a eficiência do detector utilizado e o tempo disponível para realizar as medidas (Marestoni, 2007), conseguiu-se definir a quantidade de solo a usar na análise de laboratório e trabalhou-se finalmente com uma massa de 0,616 kg e um tempo de análise máximo de 180.000 segundos na época seca e de 86.400 segundos na época de chuvas.

4.3.3.2. Procedimento de amostragem e preparação de amostras (San Luis, Argentina)

Coleta de amostras: a coleta das amostras foi realizada seguindo metodologias padrão. Esta consiste em cravar cilindros de PVC no solo a uma profundidade de 10 cm e extrai-los sem perturbar o perfil de solo contido no interior do cilindro. Os perfis extraídos foram selados e transportados para o laboratório dentro de bolsas plásticas.

Preparação das amostras: no laboratório cada perfil de solo foi fracionado em camadas de 2 mm de espessura utilizando um dispositivo construído para tal fim. Este conta com um anel de sujeição para o cilindro de PVC (que contém o solo) e um embolo que torna

possível empurrar o solo amostrado para fora do cilindro e fraciona-lo em camadas correspondentes a profundidades crescentes. Cada perfil foi fraccionado até 2 cm de profundidade, as amostras de um mesmo ponto de amostragem e da mesma camada foram misturadas afim de obter a massa suficiente para sua posterior análise. As amostras compostas assim obtidas foram secadas em estufa. a 65°C, em seguida peneiradas através de uma malha de 2 mm. A fração inferior a 2 mm foi acondicionada em tubos falcon e enviada para análise por espectrometria gama.

Análise de dados: os resultados obtidos das amostras analisadas por espectrometria gama, permitiram a elaboração do esquema de amostragem para determinar o grau de erosão a que está submetida a área selecionada, utilizando a técnica do ^7Be . A distribuição vertical do radionuclídeo estudado no Sítio de Referencia foi a esperada, portanto o ^7Be pode ser empregado para comparar os valores nos pontos de amostragem. Outro aspecto a destacar e que foi de vital importância na análise de dados, foi o cálculo do erro de cada valor obtido; este está relacionado com uma soma de erros que incluem os instrumentos de amostragem, corte, manipulação e preparação das amostras, e de análise, assim como os tempos de contagem e a capacidade do equipamento de espectrometria gama.

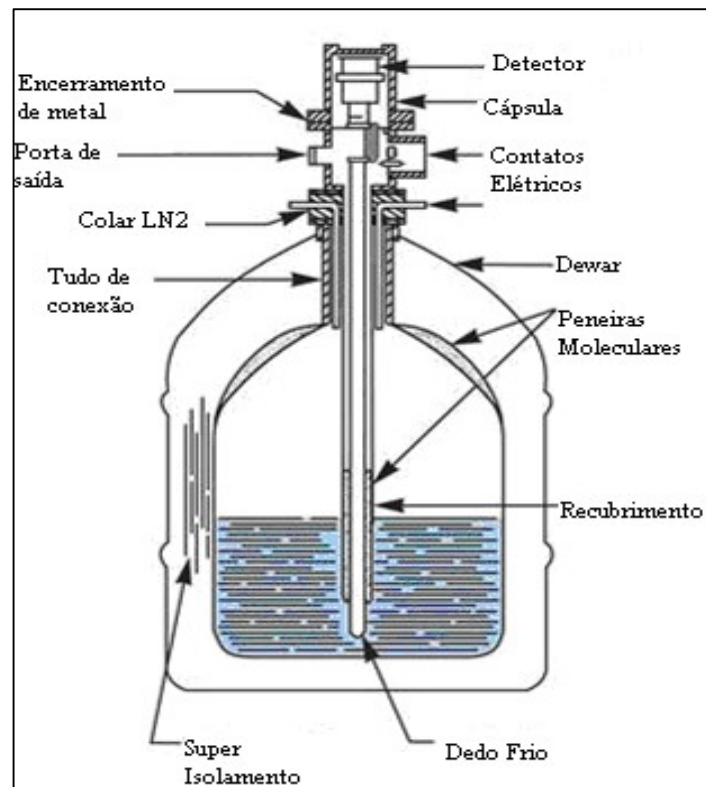
4.4. Espectrometria Gama

A espectrometria gama consiste no processo de determinar, por meio de um detector de radiação conectado a um espectrômetro analisador multicanal, quais radionuclídeos estão presentes na amostra e quais são suas atividades. Os detectores utilizados são os semicondutores, ou detectores de estado sólido, baseados em materiais semicondutores cristalinos, como silício e germânio. No entanto, à exceção do silício, os semicondutores geralmente precisam ser resfriados a temperaturas baixas, antes de serem operados e isto implica no uso de um sistema criogênico adicional. O detector fica localizado no interior de um recipiente denominado criostato. Ele está em contato térmico com um volume de nitrogênio líquido por meio de uma barra, chamada “dedo frio”. Nas configurações mais modernas, o pré-amplificador fica imediatamente debaixo do detector, de forma que a etapa de entrada de sinal no pré-amplificador se mantém a baixa temperatura (Figura 10).

O detector gama é montado no interior de uma blindagem de chumbo. Esta blindagem é necessária para minimizar a influência da radiação de fundo. Um suporte circular, centralizado sobre a face do detector, sustenta a fonte a uma distância que atenua efeitos secundários de detecção como soma e empilhamento, causados pelas transições gama mais intensas. Entre a fonte e o detector não há nenhum tipo de absorvedor (KNOLL, 2000).

No presente projeto, para analisar as amostras coletadas na bacia do córrego Mato Frio, utilizou-se o sistema de espectrometria gama da marca CANBERRA, com detector HPGe (germânio hiper-puro) coaxial modelo 5019, com 50% de eficiência nominal, DSA-2000 acoplado a um microcomputador com placa multicanal de aquisição de espectros e o programa Genie 2K, do Laboratório de Espectrometria Nuclear - LEN, Serviço de Técnicas Analíticas – SERTA/CDTN (Figura 10).

Figura 10 - Configuração de um detector de germânio, Camberra modelo 5019



Fonte: KNOLL, 2000.

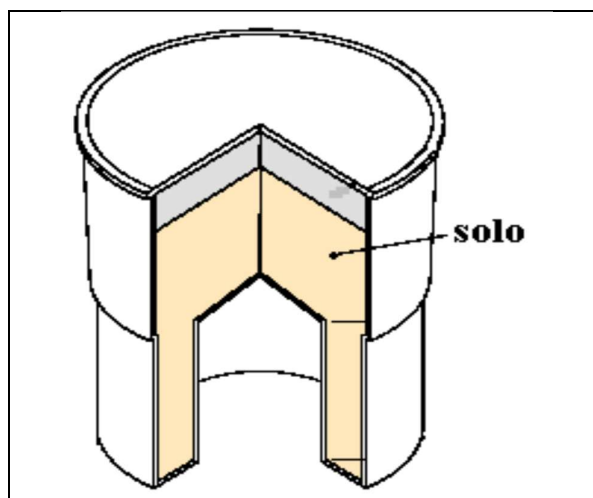
4.4.1. Condições de contagem

Um aspecto importante em espectrometria gama é a definição das condições de contagem, tais como a definição da geometria de contagem, das características físicas e químicas do porta amostra, da natureza da amostra, da quantidade de amostra (volume e/ou massa) e dos níveis de atividade do radionuclídeo de interesse presente na amostra.

Para Marestoni, 2007, outro aspecto importante quando se trabalha com amostras ambientais de baixa atividade, é o fato de ter que diminuir a radiação de fundo incidente no detector do equipamento, para obter bons resultados nas análises das mesmas. Também deve-se maximizar o tamanho da amostra analisada quando isso é possível.

Este é o caso das amostras de solo e água analisadas no presente trabalho, que são de baixa atividade. No caso do radionuclídeo ^7Be , que emite raios gama na energia de 477,6 keV, foram utilizados porta-amostras do tipo béquer Marinelli de 700 mL para melhorar a estatística de contagem das amostras em um tempo adequado. Isto possibilita analisar quantidades da ordem de 600g para solo e água. A Figura 11 apresenta um desenho de um béquer Marinelli.

Figura 11 - Porta-amostra Béquer Marinelli.



Fonte: MARESTONI, 2007, p. 51.

4.4.2. Eficiência de detector gama

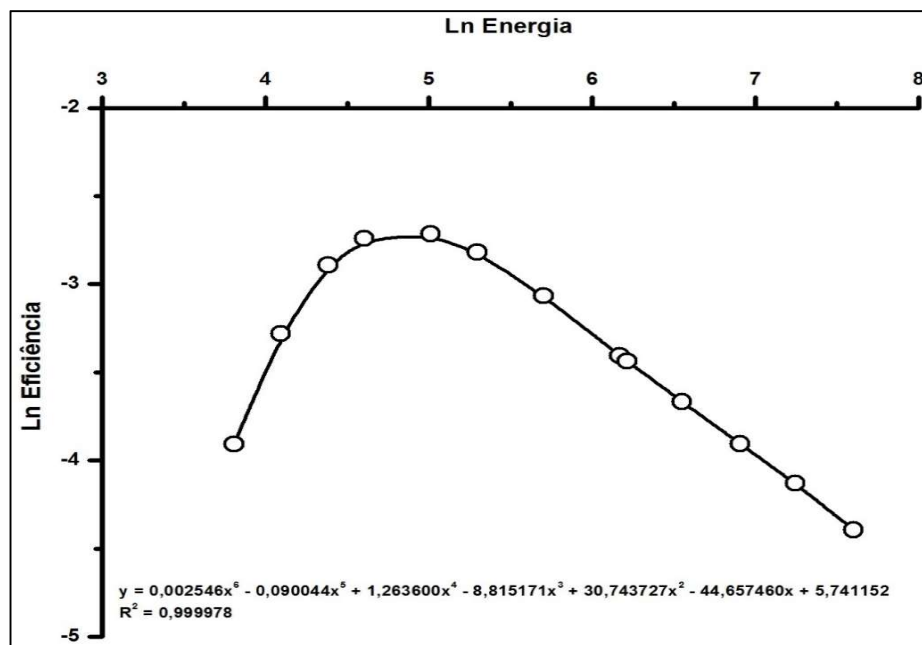
A eficiência de contagem de um detector apresenta uma dependência da energia do fóton a ser contado e da geometria de contagem (tamanho, posição e forma da amostra). Em geral, para aumentar a eficiência do detector um volume máximo de amostra, esta é posicionada o mais próximo possível da superfície do detector para que o número máximo de fótons possa ser detectado.

As eficiências de detecção para radionuclídeos emissores gama são geralmente obtidas a partir da curva de eficiência do detector. A obtenção desta curva é realizada, principalmente, utilizando-se padrões certificados de diferentes emissores gama que abrangem o intervalo de energia de interesse ou modelos matemáticos. No primeiro caso, são preparadas amostras de referência com os padrões dos radionuclídeos ou um coquetel destes utilizando-se uma matriz similar à da amostra a ser analisada.

No segundo caso, modelos matemáticos, uma vez conhecida a configuração geométrica, as características do detector e as características físicas e químicas da amostra a ser analisada (densidade, composição química, etc.), podem ser utilizados para estimar a eficiência de contagem para o radionuclídeo em estudo. A vantagem em se utilizar modelos matemáticos está no fato de que uma vez realizada a calibração para uma determinada geometria, pode-se alterar as características físicas e químicas da amostra sem necessidade de preparar vários padrões para uma mesma geometria. (GARCÍA O., 2012; PINTO *et al.*, 2013).

No presente trabalho utilizou-se um software baseado no método de Monte Carlo, fornecido pela CANBERRA, para fins calibração do sistema de detecção e análise. As curvas de eficiências obtidas para amostras de solo e água são apresentadas, respectivamente, nas figuras 12 e 13. A eficiência de contagem (ϵ) obtida para a energia de 477,6 keV do fotopico do ^7Be é de 0,03317 para solo e de 0,02937 para água de chuva.

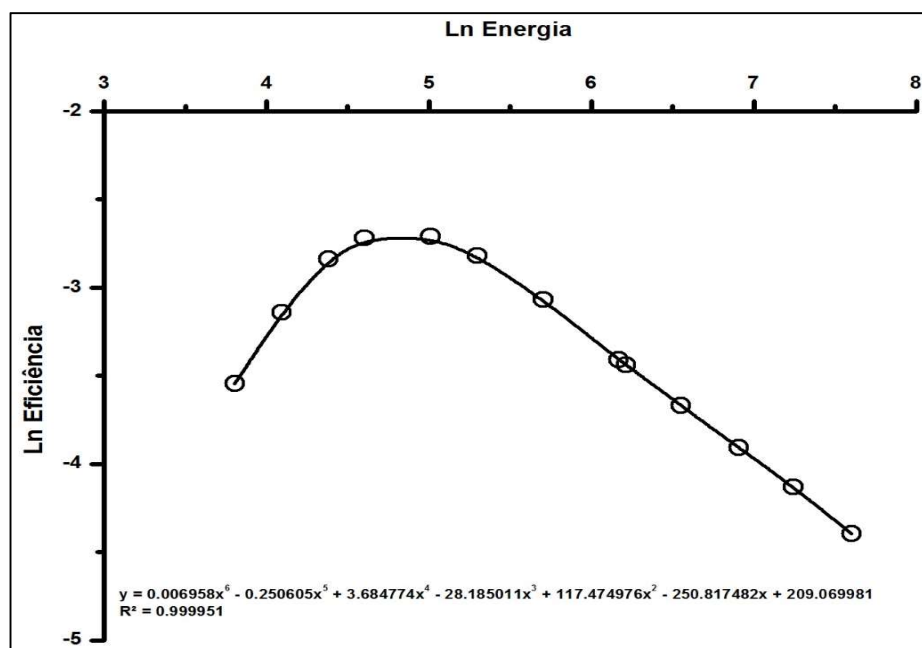
Figura 12 - Curva de Eficiência HPGe RPG para Solo - Mato Frio - MG



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Nota: A partir dos dados obtidos do Laboratório de Espectrometria Nuclear - LEN, Serviço de Técnicas Analíticas - SERTA/CDTN.

Figura 13 - Curva de Eficiência HPGe RPG para Água - Mato Frio - MG



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Nota: A partir dos dados obtidos do Laboratório de Espectrometria Nuclear - LEN, Serviço de Técnicas Analíticas - SERTA/CDTN.

4.4.3. Limite de Detecção do Detector Gama

O limite de detecção, LLD ($Bq.Kg^{-1}$) foi determinado utilizando a equação modificada de Currie, (1968), equação (10), para um nível de confiança de 95%.

$$LLD\left(\frac{Bq}{Kg}\right) = \frac{2.71 + 4.66\sigma}{I_{\gamma}.t.\varepsilon.m_a} \quad (10)$$

Sendo, σ o desvio padrão das contagens de background para um intervalo de energia definido; I_{γ} a probabilidade de transição absoluta para a energia do fotopico (keV) do 7Be ; t é o tempo de contagem do background (s); ε a eficiência de contagem e m_a é a massa da amostra (Kg).

Para um tempo de contagem de 180000 s, obteve-se um limite de detecção de 0,12 $Bq.Kg^{-1}$. Comparativamente, Kaste *et al.*, (2014) obtiveram um LLD de 0,45 $Bq.Kg^{-1}$, porém utilizando uma quantidade menor de amostra, o que é coerente com o valor medido no presente estudo.

4.4.4. Incerteza dos Resultados

A incerteza expandida associada aos resultados analíticos (δ_A) foi calculada pela equação (11), de acordo Garcêz, (2016):

$$\delta_A = \sqrt{\frac{\delta_N^2}{(m_a \varepsilon t I_{\gamma})^2} + N^2 \left(\frac{\delta_{\varepsilon}^2}{(m_a \varepsilon^2 t I_{\gamma})^2} + \frac{\delta_m^2}{(m_a^2 \varepsilon t I_{\gamma})^2} + \frac{\delta_t^2}{(m_a \varepsilon t^2 I_{\gamma})^2} \right)} \quad (11)$$

Sendo, respectivamente, δ_N , δ_ϵ , δ_m e δ_t , as incertezas associadas à área do fotopico, à eficiência de detecção, à massa da amostra e ao tempo de contagem. A maior incerteza associada aos resultados obtidos foi em torno de 21%.

4.4.5. Interferência Analítica na Determinação do ^7Be

Nos períodos de monitoramento no qual o volume de precipitação foi baixo a quantidade de ^7Be no solo não foi constante, além de ser reduzida. Esta situação dificulta a identificação e quantificação deste radionuclídeo devido às baixas atividades medidas e ao consequente aumento nas incertezas associadas (PINTO, 2011; KASTE *et al.*, 2014).

Além disso, quando a atividade do ^7Be é muito baixa, o valor medido pode sofrer forte influência da possível presença do ^{228}Ac que apresenta um fotopico gama com energia de 478,40 keV, muito próxima a energia do fotopico do ^7Be , de 477,6 keV (PINTO, 2011).

Durante o período de amostragem esta situação foi observada em dois momentos bem definidos: no mês de agosto do ano 2014 quando não havia chuvas, e nas amostras de janeiro do ano 2015 que foram contadas duas meias vidas depois.

Landis *et al.*, (2012) utilizaram metodologias experimentais e tratamento dos dados das medidas espectrométricas para eliminar esta interferência nos resultados obtidos para baixas atividades do ^7Be .

4.4.5.1. Avaliação da Interferência do ^{228}Ac

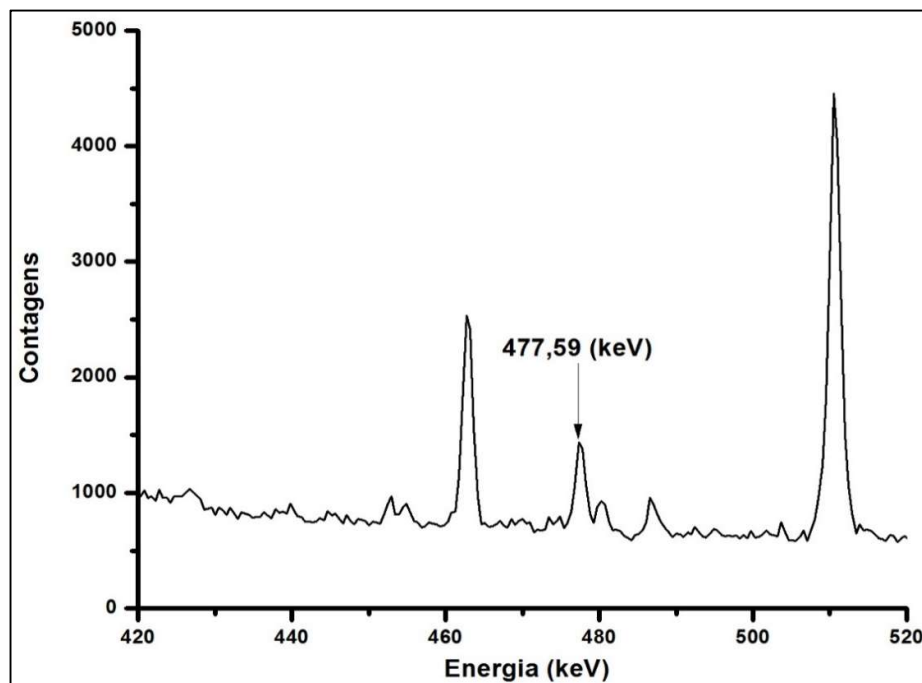
Com o objetivo de avaliar o nível de interferência do ^{228}Ac ($t_{1/2} = 6,15$ h) nas medidas experimentais da atividade do ^7Be , algumas amostras de solo da região de trabalho foram selecionadas e analisadas com repetições em intervalos de tempo de aproximadamente um ano para promover o total decaimento do ^7Be ($t_{1/2} = 53,3$ d). A expectativa era de que se algum sinal

da presença de ^{228}Ac na energia de 478,40 keV fosse observado, a interferência deste radionuclídeo estaria evidente.

O procedimento foi realizado com doze amostras de solo que foram analisadas novamente após um ano e os espectros gama obtidos não identificaram a presença do fotopico na energia de 478,40 keV. Concluiu-se portanto que a interferência devida a presença do ^{228}Ac nas medidas do ^7Be é negligenciável.

As Figuras 14 e 15 apresentam os espectros gama de uma mesma amostra analisada duas vezes em um intervalo de tempo de aproximadamente um ano.

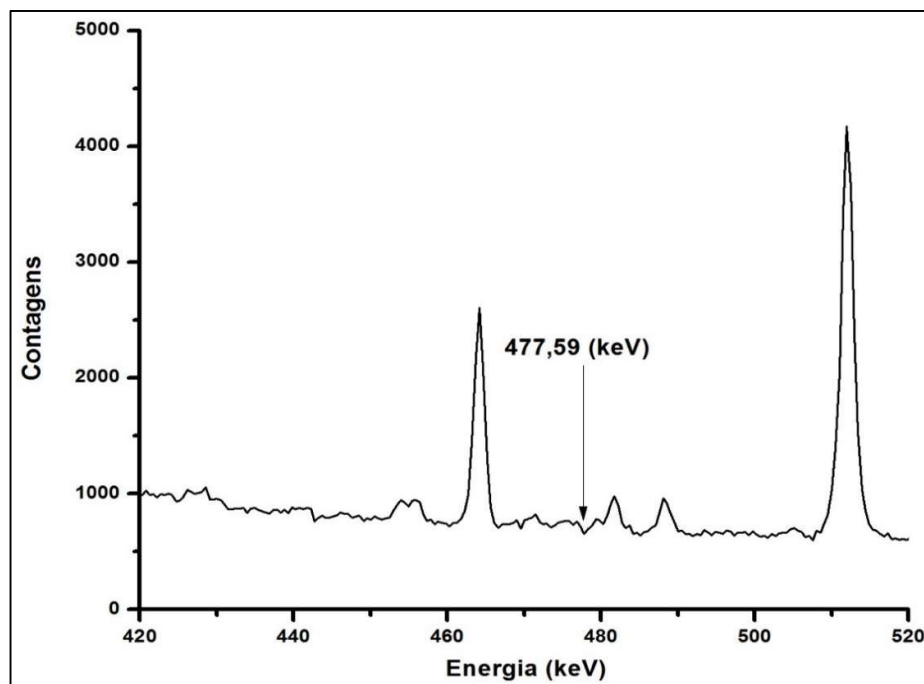
Figura 14 - Espectro gama da amostra de solo do Mato Frio - MG, registrado em março de 2015 (tempo de contagem de 180000 s)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Nota: A partir dos dados obtidos do Laboratório de Espectrometria Nuclear - LEN, Serviço de Técnicas Analíticas - SERTA/CDTN.

Figura 15 - Espectro gama da amostra de solo do Mato Frio - MG, registrado em setembro de 2016 (tempo de contagem de 347000 s)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

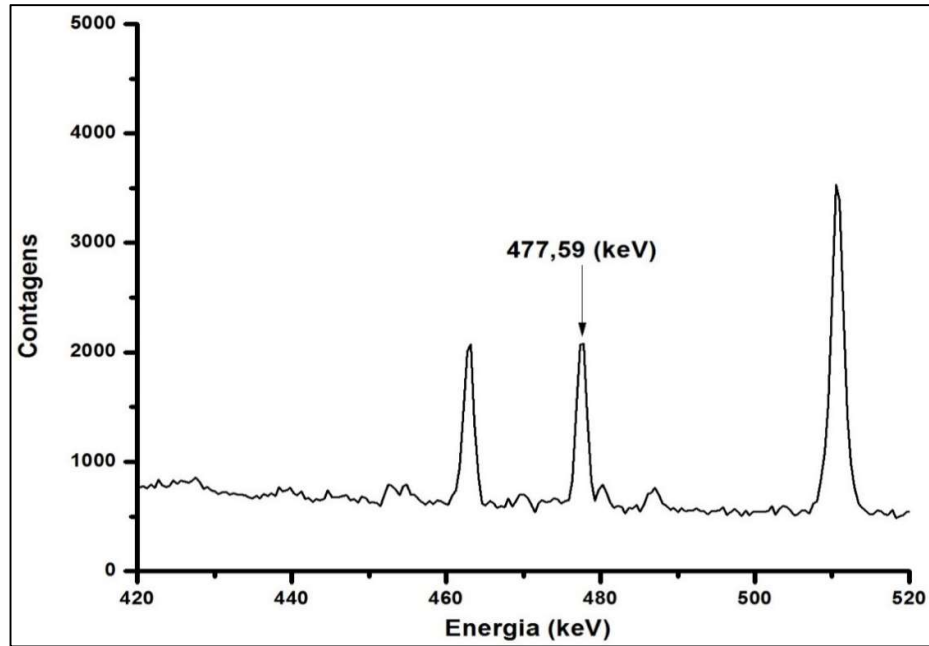
Nota: A partir dos dados obtidos do Laboratório de Espectrometria Nuclear - LEN, Serviço de Técnicas Analíticas - SERTA/CDTN.

4.4.5.2. Determinação da Meia-Vida do ^7Be

Uma forma de verificar se as medidas espectrométricas realizadas foram representativas da presença de ^7Be no solo, sem a interferência do ^{228}Ac , é a determinação da meia-vida do ^7Be com base nos resultados obtidos.

Uma amostra de solo foi analisada em dias diferentes para verificar o decaimento radioativo do ^7Be (477,59 keV) e calcular a meia-vida correspondente. As figuras 16 e 17 apresentam os espectros gama obtidos.

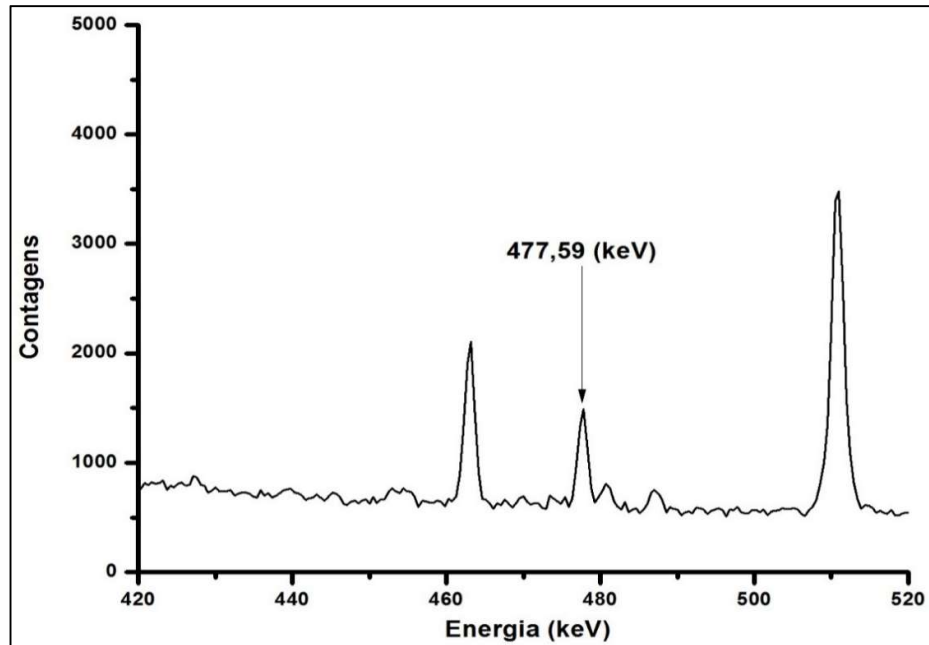
Figura 16 - Espectro gama de amostra de solo do Mato Frio - MG, registrado em 13/04/2015



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Nota: A partir dos dados obtidos do Laboratório de Espectrometria Nuclear - LEN, Serviço de Técnicas Analíticas - SERTA/CDTN.

Figura 17 - Espectro gama de amostra de solo do Mato Frio - MG, registrado em 03/06/2015



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Nota: A partir dos dados obtidos do Laboratório de Espectrometria Nuclear - LEN, Serviço de Técnicas Analíticas - SERTA/CDTN.

Utilizando os dados da Tabela 3 e as equações (12) e (13) obteve-se uma meia-vida de 51,3 d, um valor bem próximo ao da literatura, 53,12d (BERKELY LABORATORY ISOTOPES, 2015)

$$A_f = A_0 e^{-\lambda t} \quad (12)$$

$$A = \frac{N}{\varepsilon m_a t I_\gamma} \quad (13)$$

Sendo na equação (12) A_f a atividade medida após o decaimento ($Bq.Kg^{-1}$), A_0 a atividade inicial ($Bq.Kg^{-1}$), λ a constante de decaimento (s^{-1}) e t o intervalo de tempo de decaimento (s). Na equação (13), A é a atividade do radionuclídeo em $Bq.Kg^{-1}$, N é o número de contagens líquidas correspondentes ao raio gama (γ) considerado, m_a é a massa da amostra (Kg), t é o tempo de contagem (s), ε é eficiência de contagem para a energia do raio gama (γ) e I_γ é a probabilidade absoluta de transição para o raio gama (γ) medido.

Tabela 3 - Dados de contagem para a determinação da meia-vida do 7Be

Data de Contagem	$N.t^{-1}$ (cps)	A_0 (dps)	A_f	ε	I_γ
13/04/2015	0,0289	8,3455	-	0,03317	0,1044
03/06/2015	0,0145	-	4,1872		

Fonte: Elaborado pelo Dr. Roberto Pellacani G. Monteiro, 2016.

Nota: A partir dos dados obtidos do Laboratório de Espectrometria Nuclear - LEN, Serviço de Técnicas Analíticas - SERTA/CDTN.

4.4.6. Determinação da Atividade de 7Be

Uma vez realizada a calibração do equipamento com o modelo matemático pelo programa “Geometry Composer”, associado ao software Genie 2000, CANBERRA, foi

possível obter e identificar, no espectro de energia das amostras analisadas, as linhas gama e os respectivos radionuclídeos emissores presentes na amostra.

Além de identificar qualquer radionuclídeo que está presente no espectro, também é possível, utilizando a equação (13) determinar qual é a atividade específica do radionuclídeo de interesse na amostra.

4.4.7. Determinação do Inventário de ^7Be

Para realizar o cálculo do inventário diário de ^7Be entre os meses de outubro de 2015 e outubro de 2016, foi utilizada a seguinte equação:

$$I_d = I_{da} e^{(-\lambda^*t)} + E_d \quad (14)$$

¹Onde I_d é o inventário diário, I_{da} é o inventário do dia anterior, λ é a constante de desintegração do ^7Be (d^{-1}) e E_d é a entrada diária de ^7Be , seja pela via seca ou úmida.

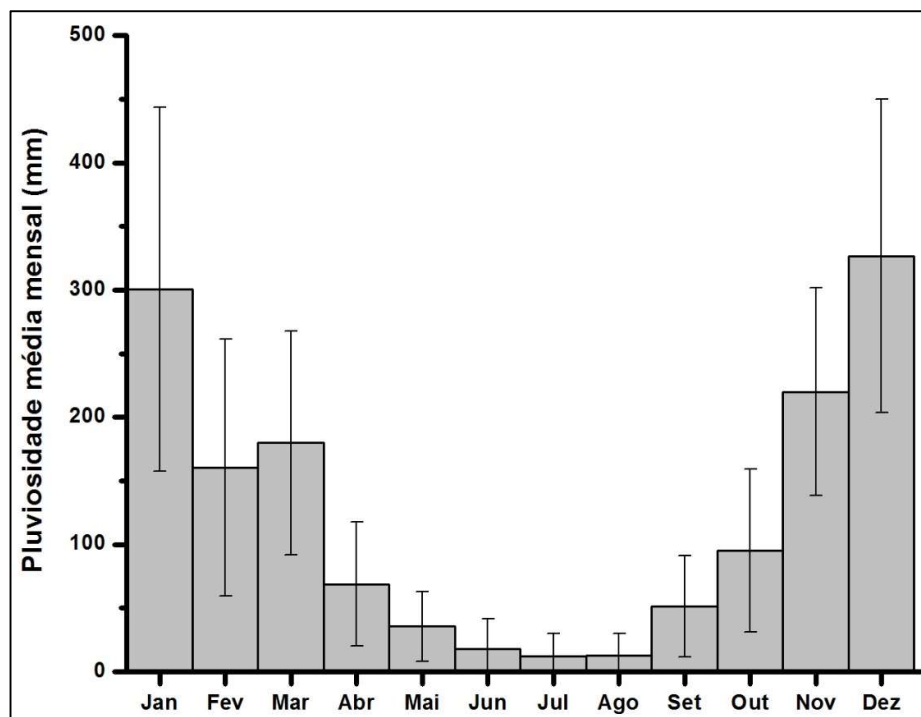
¹ Formula recebida em comunicação pessoal com Diego L. Valladares em abril 2016.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Comportamento do radionuclídeo ^{7}Be nas parcelas de trabalho do Córrego Mato Frio.

A precipitação média anual na área de trabalho é de aproximadamente 1500 mm, de acordo com os registros da precipitação média mensal dos últimos 39 anos da Estação Fazenda Laranjeiras, conforme mostrado na Figura 18 (www.snirh.gov.br/hidroweb/ FAZENDA LARANJEIRAS-Jusante). Analisando estes dados, pode-se observar uma marcada estação chuvosa que se estende de outubro a março e uma estação seca que inclui o período compreendido entre abril e setembro. De maio de 2014 a maio de 2015 (período inicial desta pesquisa), 80% dos eventos de chuva ocorreram na estação úmida ou de chuvas.

Figura 18 - Série histórica mensal média da precipitação acumulada na área de estudada.



Fonte: ESQUIVEL *et al.*, 2017.

Nota: Os valores médios foram obtidos com a média dos últimos trinta e nove anos. As barras indicam o desvio padrão.

Neste período inicial de levantamento da linha de base, a atividade específica do ^7Be contido no 1 cm superior do solo variou de $2,0 \pm 0,1 \text{ Bq.kg}^{-1}$ a $34,0 \pm 6,5 \text{ Bq.kg}^{-1}$ na parcela de trabalho P1 e de $3,1 \text{ Bq.kg}^{-1}$ a $22,0 \pm 0,2 \text{ Bq.kg}^{-1}$ na parcela de trabalho P2. O conteúdo de ^7Be , expresso por unidade de área, tendo em consideração uma profundidade de corte de 1 cm, variou de $21,1 \pm 2,4 \text{ Bq.m}^{-2}$ a $295,9 \pm 63,1 \text{ Bq.m}^{-2}$ na parcela P1 e de $27,7 \pm 5,2 \text{ Bq.m}^{-2}$ a $162,4 \pm 57,9 \text{ Bq.m}^{-2}$ na parcela P2 (Tabela 4). Para ambas parcelas, ficou evidenciado que o conteúdo de ^7Be no solo analisado variou de acordo com o período em que foram coletadas as amostras. Os valores mínimos foram observados na época seca (de abril a setembro) e os valores foram 14 e 7 vezes maiores na época chuvosa (de outubro a março), para P1 e P2, respectivamente (ESQUIVEL *et al.*, 2017).

Tabela 4 - Atividade de Concentração (C) do ^7Be e Conteúdo (A) do ^7Be no primeiro centímetro do solo para cada parcela experimental.

		Parcela 1				Parcela 2			
		C (Bq.kg^{-1})		A (Bq.m^{-2})		C (Bq.kg^{-1})		A (Bq.m^{-2})	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
2014	Mai	3,2	1,1	24,7	8,2	**	**	**	**
	Jun	2,0	0,1	21,1	2,4	3,8	***	35,1	***
	Jul	*	*	*	*	*	*	*	*
	Ago	3,6	1,5	28,6	11,2	*	*	*	*
	Set	4,2	1,1	32,6	10,3	4,4	***	40,1	***
	Out	2,9	***	22,5	7,1	3,1	***	27,7	***
	Nov	34,0	6,5	295,9	63,1	22,0	0,2	126,3	4,6
	Dez	19,3	5,0	133,3	38,1	19,1	4,2	162,4	57,9
2015	Jan	5,5	0,4	50,5	0,8	5,4	0,4	47,8	3,6
	Fev	18,8	10,3	144,3	117,1	15,4	4,1	124,4	24,4
	Mar	21,1	5,9	266,0	119,1	14,7	4,3	150,7	47,2
	Abr	9,8	0,8	100,5	32,1	5,0	0,6	48,1	8,3
	Mai	8,2	2,9	70,0	8,2	4,2	0,5	35,5	2,7

* Abaixo do limite de detecção.

** Não houve amostragem.

*** Somente um perfil foi coletado.

Fonte: ESQUIVEL *et al.*, 2017.

Nota: O valor médio dos perfis e o desvio padrão são reportados.

Na Tabela 4 pode-se observar uma relação entre o conteúdo do ^7Be no solo, a época do ano e as precipitações. Os meses de inverno (junho a agosto) são os mais frios na região da pesquisa, o que diminui o transporte vertical entre as massas de ar próximas ao solo e as da troposfera (FELLY *et al.*, 1989). Resulta que a deposição seca (a entrada) do ^7Be acima da superfície do solo é baixa, o que se reflete também em seu conteúdo.

Com o início da primavera (setembro a novembro), há um aumento na quantidade de ^7Be retido no solo, não obstante o volume da precipitação ser maior, devido ao fato de que há aumento no aporte lavado da atmosfera e, com ele, a deposição úmida de ^7Be . O comportamento durante o verão (dezembro a março) mantém a mesma tendência: valores altos do radionuclídeo e chuvas representativas.

Aqui é importante assinalar que estas altas concentrações de ^7Be coincidem com duas situações muito importantes, que são: 1) a estação chuvosa da região inicia em outubro e termina em março; portanto a lavagem da atmosfera é constante, e assim, também, a entrada do radionuclídeo por deposição úmida; 2) os meses mais quentes são os de janeiro a março, o que favorece o transporte vertical entre as massas de ar na troposfera, que por sua vez, se reflete em altas concentrações de ^7Be no ar próximo à superfície, e que são transportadas para o solo pelas chuvas (ANDRELLO *et al.*, 2010; FELLY *et al.*, 1989).

Com a chegada do outono (do final de março a maio) a concentração de ^7Be retido no solo diminui consideravelmente, assim como também as precipitações, o que restringe o aporte do radionuclídeo por deposição úmida. No final do mês de maio, a temperatura ambiente começa a diminuir, o que produz um efeito de estabilidade nas massas de ar da troposfera (MABIT *et al.*, 2008) e inibe o transporte vertical na mesma, reduzindo a quantidade de ^7Be disponível para ingressar no solo por deposição seca (FELLY *et al.*, 1989).

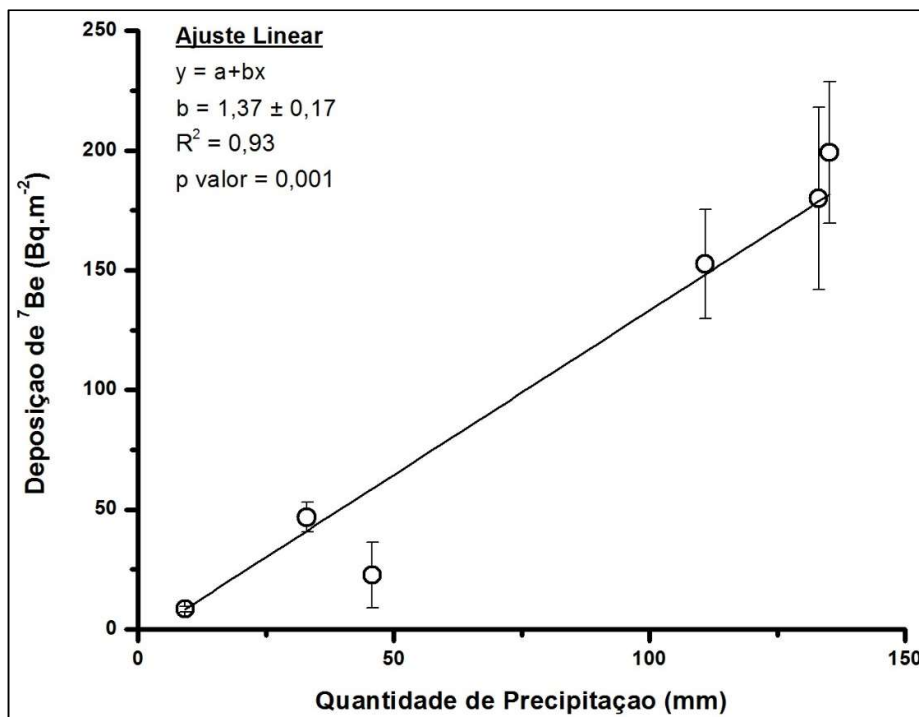
Embora o comportamento do ^7Be nas duas parcelas de trabalho mostrem a mesma tendência, pode-se constatar que os valores da segunda parcela são menores. Isto pode ter sua explicação nos seguintes fatos: o efeito das correntes de ar sobre a deposição seca e úmida (FELLY *et al.*, 1989), as características físico-químicas dos solos (KASTE *et al.*, 2011) e a influência da cobertura vegetal (MABIT *et al.*, 2008).

As variações anuais do conteúdo ^7Be do solo têm sido observadas e reportadas em outras regiões do mundo, como por exemplo, na Califórnia, USA (KASTE *et al.*, 2011) e em San Luis, Argentina (JURI AYUB *et al.*, 2009). Observou-se nestes estudos que a variação estacional no conteúdo de ^7Be presente no solo pode ser explicada pelo padrão assimétrico da distribuição anual das chuvas na região. As épocas seca e úmida nas parcelas do presente

estudo, que estão localizadas na área do Córrego Mato Frio (Brasil), são similares às regiões da Califórnia e de San Luis.

Entre os meses de outubro de 2015 e maio de 2016 (período chuvoso), foram coletadas amostras da precipitação mensalmente acumulada na parcela de trabalho N° 1 e foi determinado o conteúdo de ^7Be nas mesmas. A Figura 19 mostra a dependência que existe entre a deposição de ^7Be e a quantidade de chuva. Há uma forte correlação linear entre estas duas variáveis, com $r^2 = 0,93$ (ESQUIVEL *et al.*, 2017). Olsen *et al.*, (1985) também informaram sobre relações lineares, com coeficientes de correlação $r^2 = 0,63$ e $0,54$ em duas regiões dos EE.UU. Caillet *et al.*, (2001) reportou um coeficiente de correlação $r^2 = 0,66$ ($p = 0,001$) em um local na Suíça. Zhu y Olsen (2009) nos USA aportam uma correlação positiva com $r^2 = 0,46$, enquanto Walling *et al.*, (2009), no sul do Chile, encontraram um $r^2 = 0,82$. Resultados similares foram reportados para ambiente com um regime de precipitação estacional por Kaste *et al.*, (2011) com $r^2 = 0,8$ (Califórnia) e por Juri Ayub *et al.*, (2012), com $r^2 = 0,82$ (San Luis).

Figura 19 - Deposição de ^7Be e quantidade de chuva.

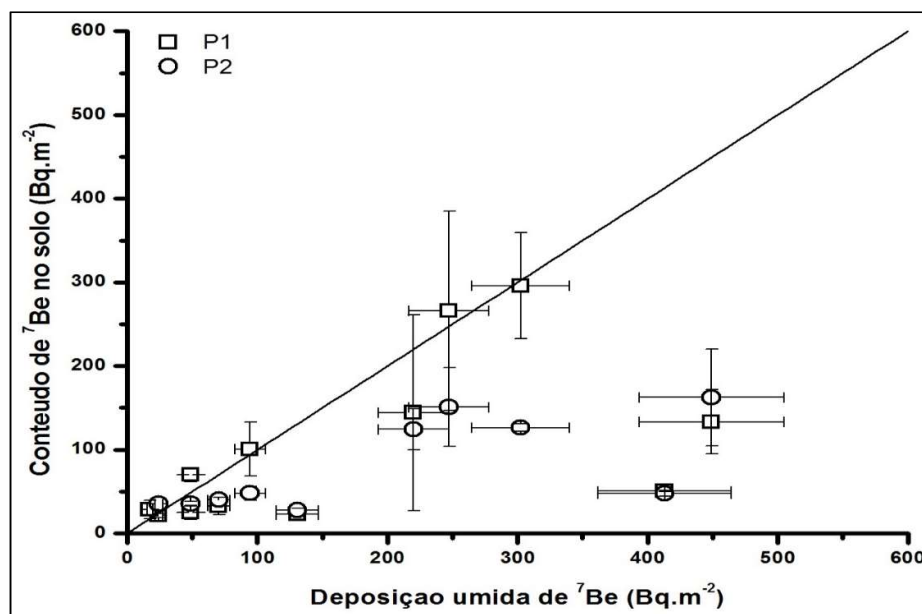


Fonte: ESQUIVEL *et al.*, 2017.

Nota: O ajuste linear foi obtido levando em conta o peso de erro. A barra de erro foi estimada a partir do erro estatístico da contagem e do erro nas medições da quantidade de precipitação.

Supondo que: a) a deposição seca de ^7Be seja insignificante (SALISBURY e CARTWRIGHT, 2005; IOANNIDOU *et al.*, 2005; WALLBRINK e MURRAY, 1994), b) o valor da concentração de atividade do ^7Be na água de chuva permaneça constante (JURI AYUB *et al.*, (2012), e c) o único mecanismo que favorece a perda de ^7Be do solo seja a desintegração radiativa, então se poderia estimar o valor esperado de ^7Be contido no solo por conta da deposição úmida (chuvas) utilizando o valor da inclinação $1,37 \pm 0,17 \text{ Bq.L}^{-1}$ e a precipitação média mensal (Figura 18). A Figura 20 mostra os valores medidos de ^7Be presente no solo (Tabela 4) e os valores esperados do conteúdo de ^7Be por deposição úmida na área de estudo. Somente alguns pontos mostram uma coincidência entre o conteúdo de ^7Be medido e o estimado. Em ambas parcelas observou-se que os valores medidos de ^7Be no solo (a 1 cm de profundidade) foram menores do que o conteúdo de ^7Be estimado por deposição úmida. Os dados que tiveram maior correspondência entre si foram observados nos meses secos (ESQUIVEL *et al.*, 2017).

Figura 20 - Medida do conteúdo de ^7Be no solo versus a deposição úmida de ^7Be (estimado no solo).

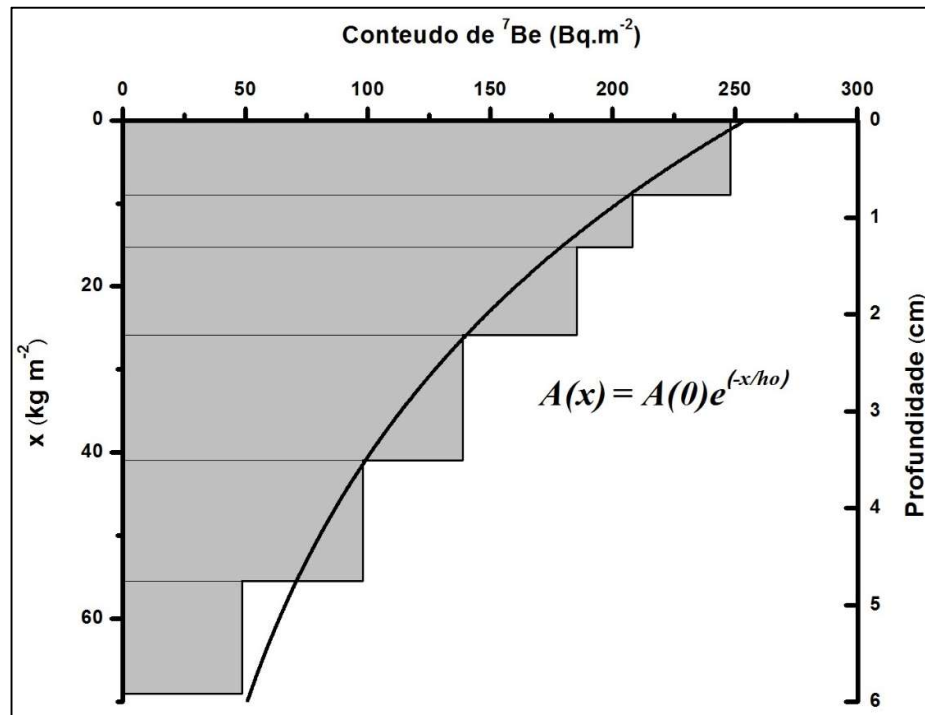


Fonte: ESQUIVEL *et al.*, 2017.

Nota: A deposição úmida de ^7Be foi calculada utilizando a média mensal da chuva anual (Figura 18) e a inclinação obtida na Figura 19. A barra de erro no eixo y foi estimado tendo em conta o erro estatístico da contagem e o erro na amostragem do solo. A linha contínua mostra a hipotética correspondência perfeita entre o ^7Be medido e o estimado.

A diferença entre estes dois valores pode ter sua explicação em uma maior penetração do ^7Be no perfil do solo. Com o propósito de avaliar esta hipótese, em outubro de 2015, na parcela N° 1 (P1) amostrou-se o perfil do solo até uma profundidade de 6 cm, segmentando o dito perfil em camadas de 1 cm de espessura. Verificou-se que o ^7Be foi detectável até 5 cm de profundidade (ESQUIVEL *et al.*, 2017). O ^7Be contido no solo mostrou a típica distribuição vertical decrescente (Figura 21). A profundidade de massa de relaxação estimada (h_0) foi igual a $43,4 \text{ kg.m}^2$. Este parâmetro indica a profundidade de penetração do radionuclídeo no solo: 63,2% do radionuclídeo está retido na camada de solo entre a superfície e h_0 (SEPULVEDA *et al.*, 2008).

Figura 21 - Distribuição vertical do ^7Be conteúdo no solo, no perfil do solo coletado na parcela P1 no mês de outubro de 2015.



Fonte: ESQUIVEL *et al.*, 2017.

Nota: A linha corresponde ao ajuste para uma função exponencial decrescente.

No entanto, a maior parte da literatura que descreve a distribuição do ^7Be no solo reporta profundidades máximas de penetração de aproximadamente 2 cm abaixo da superfície (SEPULVEDA *et al.*, 2008; LOHAIZA *et al.*, 2014). A profundidade de penetração observada neste estudo não é usual, mas foi constatada por outros autores, que reportam profundidades de

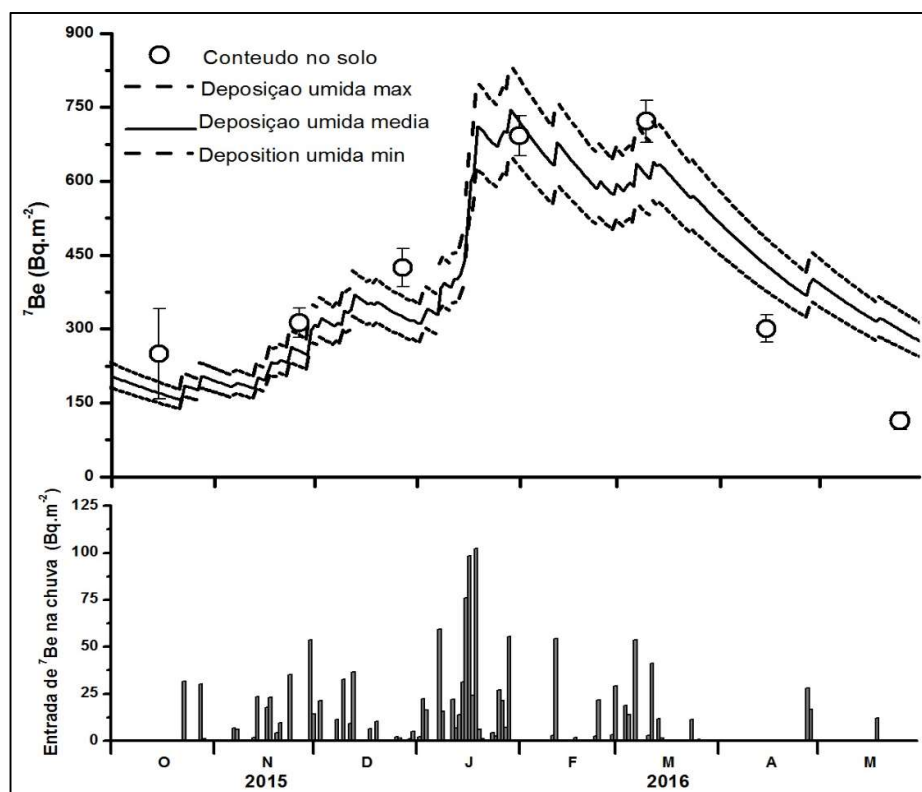
penetração entre 8 e 10 cm em alguns solos (KASTE *et al.*, 2002). Estes autores sugerem que a estrutura de drenagem e o conteúdo de umidade do solo poderiam afetar a distribuição de profundidade do ^7Be . O solo no local de estudo P1 é do tipo latossolo, caracterizado por um pH baixo e por argilas de iluviação. O alto conteúdo de areia nas camadas superficiais do solo e o seu baixo pH poderiam ser as razões para ter ocorrido uma penetração mais profunda do ^7Be neste local.

Tendo em conta os episódios de chuva registrados para os anos 2015 / 2016 e a atividade de concentração do ^7Be na chuva, foi possível estimar com bastante precisão a expectativa do ciclo anual do ^7Be por deposição úmida no solo (Figura 22, parte superior, linhas). As barras na parte inferior desta figura mostram a entrada do ^7Be da atmosfera como pulsos que estão relacionados com os episódios de chuva. Baseados na profundidade de penetração do ^7Be na parcela P1 para o período de novembro de 2015 a maio de 2016, no qual os perfis do solo foram amostrados mensalmente até 5 cm de profundidade (Figura 22, círculos).

Esta figura indica que: 1) cada pulso ^7Be (cada evento de precipitação) causou um incremento na deposição de ^7Be ; 2) a deposição de ^7Be mostrou ciclos de oscilação devido ao padrão assimétrico da precipitação; 3) durante os períodos secos espera-se que o conteúdo de ^7Be no solo diminua devido à desintegração radioativa; 4) as medidas do conteúdo de ^7Be estiveram mais próximas dos valores esperados para deposição úmida exibindo o mesmo ciclo anual devido ao regime de precipitação assimétrica, confirmando uma maior profundidade de penetração (abaixo de 5 cm) do ^7Be nestes solos; 5) as alterações estacionais do conteúdo de ^7Be no solo poderiam ser previstas com base na deposição atmosférica por chuvas, e 6) durante o período seco, o conteúdo de ^7Be no solo foi menor que o esperado por deposição atmosférica.

Este último ponto sugere que os solos no local pesquisado poderiam estar sujeitos a uma perda adicional da atividade de ^7Be . Durante a estação seca, esta região montanhosa está submetida a ventos que podem propiciar a erosão do solo e explicar os valores baixos de ^7Be no mesmo (ESQUIVEL *et al.*, 2017).

Figura 22 - Deposição úmida de ^7Be e conteúdo de ^7Be no solo (parte superior) e entrada de ^7Be pelas chuvas (parte inferior).



Fonte: ESQUIVEL *et al.*, 2017.

Nota: A entrada de ^7Be foi estimada a partir da quantidade das precipitações diárias ocorridas no período de outubro 2015 até maio 2016 e a inclinação obtida da Figura 19. A deposição úmida de ^7Be foi calculada levando em consideração a entrada de ^7Be , assim como seu decaimento radioativo e os erros no parâmetro da inclinação. A barra de erro para o conteúdo de ^7Be no solo foram calculados da mesma forma que na Figura 19.

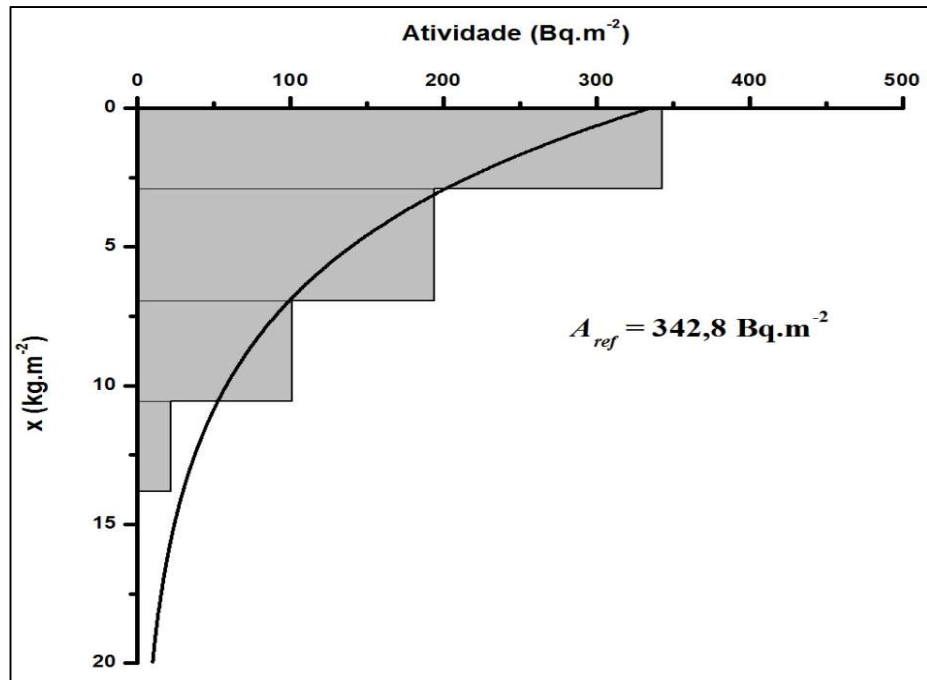
5.2. Comportamento do radionuclídeo ^7Be em La Cumbre, na Província de San Luís, Argentina.

5.2.1. Aplicação do ^7Be ao modelo de erosão

Estudo do modelo: analisou-se o marco teórico, os fundamentos, vantagens e desvantagens do uso do ^7Be no modelo para determinar taxas de erosão e sedimentação de solo. Para aplicar o modelo de transporte de solo usando a técnica do ^7Be , são necessários no mínimo

12 pontos de amostragem em um transecto, dependendo sempre do tipo de estudo que se pretende realizar. No caso específico deste estudo, não foi estabelecida esta quantidade tendo em vista o desconhecimento prévio do local selecionado. Assim tornou-se necessário realizar um levantamento rápido para conhecer o comportamento do radionuclídeo e se havia possibilidade de usar o mesmo para o cálculo das taxas de erosão e sedimentação do solo. Os valores prévios obtidos da análise por espectrometria gama indicaram que no local selecionado existem as condições mínimas necessárias para o uso da técnica do ^7Be como traçador do movimento de solo por eventos de chuva.

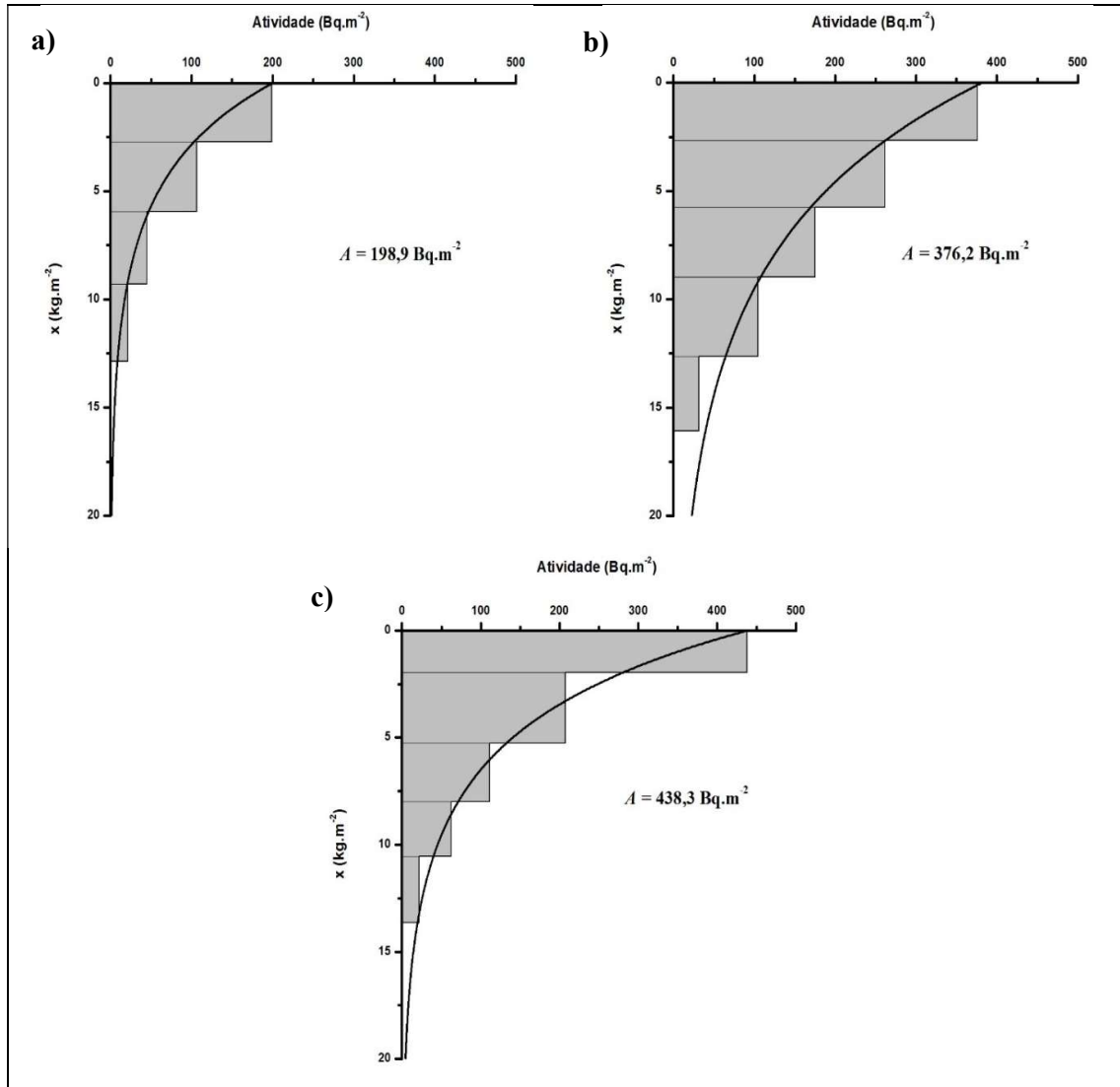
Figura 23 - Profundidade mássica de relaxação versus Atividade de Referência.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Nas Figuras 23 e 24 são mostrados os perfis de solo e a distribuição vertical do radionuclídeo analisado no Sitio de Referência (La Cumbre, Argentina) e nos 3 pontos de amostragem localizados na transecta do local do estudo. Também é indicado o valor correspondente de ^7Be para cada local. Na Figura 25 são mostrados o valor de ^7Be contido no solo e o esperado de acordo com um modelo simples de estimativa.

Figura 24 - Profundidade mássica de relaxação versus Atividade nos pontos de amostragem.

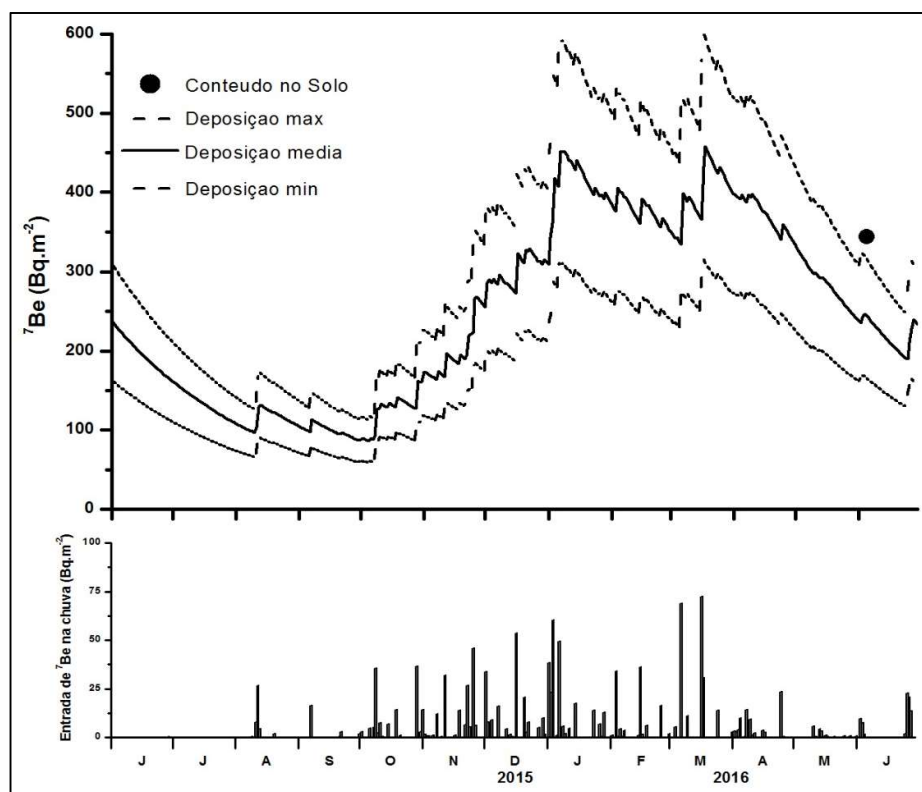


Legenda: a) Conteúdo de ⁷Be na parte alta
b) Conteúdo de ⁷Be na parte meia
c) Conteúdo de ⁷Be na parte baixa

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Para se ter uma ideia do comportamento do ⁷Be presente no solo do local sob estudo, são comparados os valores dos 3 pontos amostrados sobre a transecta com o valor obtido no Sítio de Referência. Pode-se facilmente verificar os pontos nos quais está acumulando sedimentos e aqueles onde a erosão é evidente. Com estes dados preliminares tem-se uma linha de base para futuras investigações na área.

Figura 25 - Deposição úmida de ^7Be e conteúdo de ^7Be no solo (parte superior) e entrada de ^7Be pelas chuvas (parte inferior), no local La Cumbre. (Junho 2016)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

O valor de ^7Be medido no solo encontra-se muito próximo do valor estimado (dado calculado a partir das precipitações diárias e da inclinação obtida para a região de San Luis). Pode-se observar que o comportamento desta curva é semelhante à obtida por Esquivel *et al.*, (2017), o que reforça a suposição de que se pode prever o valor de ^7Be presente no solo com uma boa precisão com base nas precipitações diárias e na inclinação obtida da concentração de ^7Be presente na chuva de uma determinada região.

5.3. Modelagem da redistribuição de solo usando o ^7Be no Córrego Mato Frio (2015-2016).

Conhecido o comportamento do ^7Be , no solo e na precipitação, dentro da área de trabalho, passou-se a executar as fases finais desta investigação, que consistiram no desenvolvimento das seguintes atividades:

5.3.1. Perfil de ^7Be no Solo

Entre os meses de outubro de 2015 e outubro de 2016 no Local de Referência, foram realizados com frequência mensal, perfilações do solo até uma profundidade de 5 cm, seccionando o perfil em camadas de 1 cm de espessura.

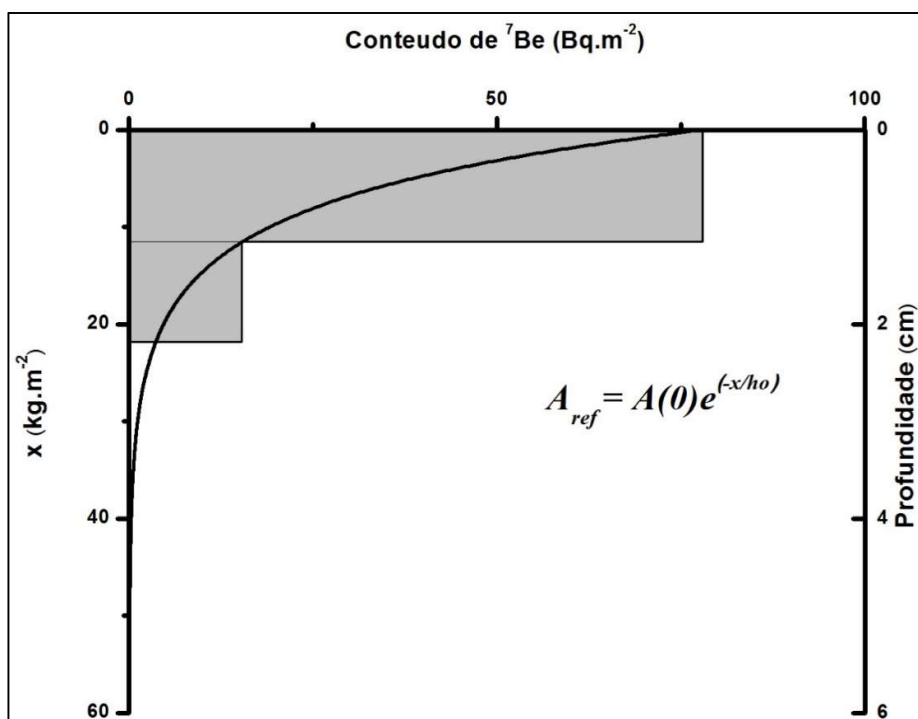
O conhecimento do perfil de penetração do ^7Be no solo é de grande importância para poder aplicar este isótopo natural como traçador nos processos de perda ou aporte de solo. A análise do perfil de distribuição vertical em detalhe permite reconhecer se o local selecionado pode ser utilizado como Local de Referência, posto que este deve exibir a típica distribuição vertical decrescente com a profundidade.

Se o padrão de distribuição apresenta perturbações, deverá ser descartado como tal. A correta seleção de um Local de Referência é limitante para a obtenção de dados confiáveis quando se determina a perda ou ganho de solo utilizando esta técnica.

Em outubro de 2016, obteve-se um inventário total de $78 \pm 17,2 \text{ Bq.m}^{-2}$ e determinou-se uma profundidade mássica de relaxação de $7,1 \text{ kg.m}^2$. É importante assinalar que contrariamente aos resultados dos meses anteriores, onde o ^7Be havia sido detectado até 5 cm de profundidade, neste mês em particular o radioisótopo somente foi observado nos primeiros 2 cm de solo (Figura 26).

No mês de outubro de 2015 o valor medido foi $248 \pm 91,8 \text{ Bq.m}^{-2}$, três vezes maior que o obtido para o mesmo local no ano seguinte. Não obstante, a tendência geral do padrão assimétrico das precipitações mantém-se em ambos: com o início da época de chuvas aumenta o teor de conteúdo de ^7Be no solo.

Figura 26 - Distribuição vertical do ^7Be no perfil do solo coletado no Sitio de Referência no mês de outubro de 2016.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Nota: A linha corresponde ao ajuste para uma função exponencial decrescente.

5.3.2. Ingresso desde atmosfera e Inventário mensal de ^7Be

É sabido que a principal forma de ingresso de ^7Be no solo desde a atmosfera se dá via deposição úmida, representando 90% do total (BENITEZ *et al.*, 1999; SALISBURY e CARTWRIGHT, 2005; IOANNIDOU *et al.*, 2005; WALLBRINK e MURRAY, 1994) e que a quantidade que ingressa no mesmo depende de sua concentração na chuva e da quantidade de chuva precipitada (Tabela 5). No período entre outubro de 2015 y fevereiro de 2017 a chuva foi coletada com frequência mensal e seu de ^7Be foi determinado.

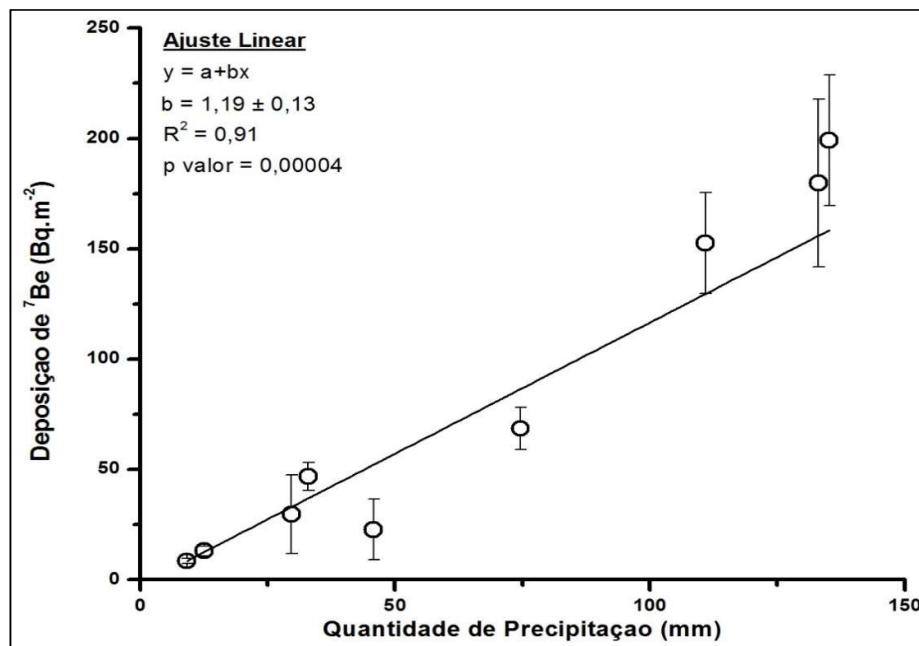
Tabela 5 - Quantidade de precipitação e Concentração de ^7Be na água de chuva.

	Mês	Precipitação (mm)	^7Be na água de chuva	
			Atividade de concentração (Bq.L^{-1})	Erro (\pm)
2015	Out	45.8	0.5	0.3
	Nov	133.1	1.4	0.3
	Dez	110.9	1.4	0.2
	Mar	135.2	1.5	0.2
	Abr	33	1.4	0.2
2016	Mai	9.2	0.9	0.1
	Jun	12.6	1.0	0.2
	Set	29.7	1.0	0.2
	Fev	74.6	0.9	0.1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A Figura 27 mostra a deposição de ^7Be em Bq.m^{-2} , em função da quantidade de chuva. Esta deposição húmida de ^7Be mostra uma dependência linear com a magnitude da precipitação, tal como foi descrito para esta região por Esquivel *et al.*, (2017). Os mesmos autores, tendo em conta o período entre outubro de 2015 e maio 2016, reporto uma inclinação de $1,37 \pm 0,17 \text{ Bq.L}^{-1}$. Quando o monitoramento das chuvas estende-se até fevereiro de 2017 (Figura 27), um novo valor de inclinação é obtido, $1,19 \pm 0,13 \text{ Bq.L}^{-1}$ apresentando uma forte correlação ($r^2 = 0,91$).

Figura 27 - Deposição de ^7Be versus quantidade de chuva (outubro 2015 - outubro 2016).

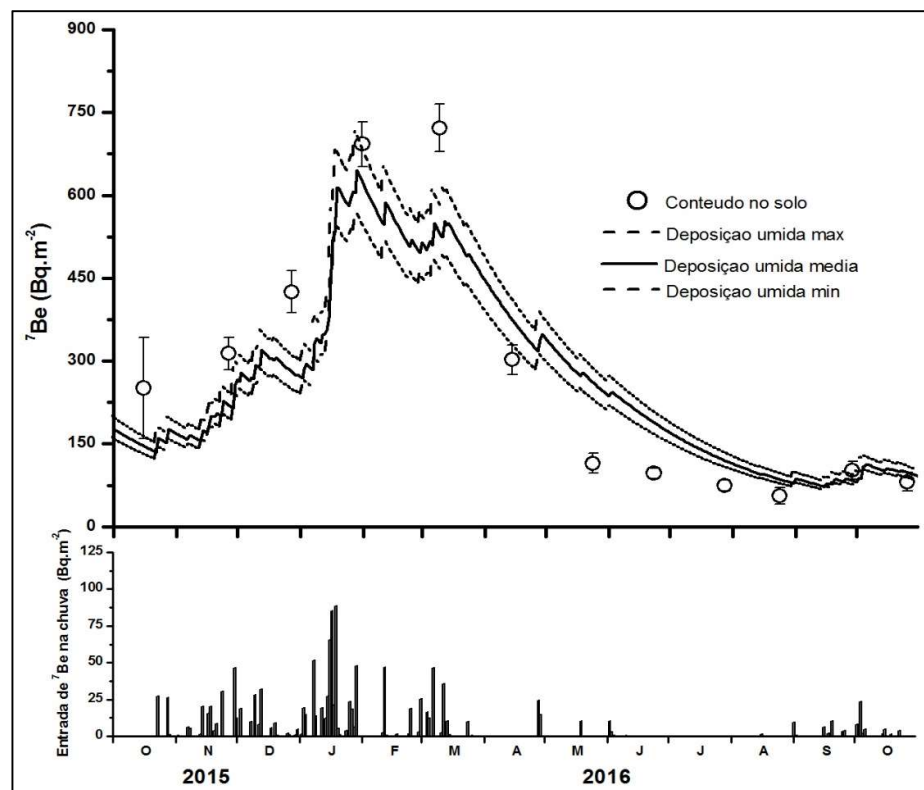


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Nota: O ajuste linear foi obtido levando em conta o peso de erro.

O valor da inclinação é o conteúdo médio de ^7Be de cada milímetro de chuva para esta região; pelo que este pode-se usar para estimar o teor de ^7Be esperado no solo devido às chuvas, para longos períodos de tempo. A Figura 28 mostra como linhas o conteúdo de ^7Be esperado no solo devido ao ingresso úmido ou o inventário teórico de ^7Be no solo. A seguir detalha-se sucintamente como foi construído o gráfico da Figura 28:

Figura 28 - Deposição úmida de ^7Be e conteúdo de ^7Be no solo (parte superior) e entrada de ^7Be pelas chuvas (parte inferior).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Nota: A entrada de ^7Be foi estimada a partir da quantidade das precipitações diárias ocorridas no período de outubro 2015 até outubro de 2016 e a inclinação obtida da Figura 27.

1. Para fazer o gráfico da parte inferior da Figura 28, foi considerado a inclinação (concentração média de cada milímetro de chuva) da Figura 27 e a magnitude dos eventos de chuva que ocorrem diariamente na área de estudo a partir do 1 de outubro de 2015 até o 31 de outubro de 2016. Este corresponde aos pulsos de entrada teórico do isótopo ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$) em cada dia do período indicado.

2. O gráfico da parte superior mostra como linhas a oscilação do inventário do ^7Be esperado (teórico) tendo presente os pulsos de entrada e o decaimento radioativo do isótopo de acordo com a equação (14). Mostra-se o valor médio e os valores máximos e mínimos esperados com base ao erro na obtenção da inclinação na Figura 27.
3. A figura na parte superior mostra também, como círculos o conteúdo de ^7Be efetivamente medido no solo para cada um dos meses reportados (Tabela 5).

Tabela 6 - Conteúdo de ^7Be medido nas amostras de solo do Sítio de Referência versus o conteúdo de ^7Be calculado usando a equação (14) para determinar o inventário diário.

		Sítio de Referência				
		Valor medido ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$)		Valor calculado ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$)		
		Valor	Erro (\pm)	Média	Máximo	Mínimo
2015	Out	248	91,8	145,7	161,9	129,5
	Nov	310,9	29,3	219,8	244,3	195,3
	Dez	422,7	38,3	280,1	311,3	248,9
	Jan	**	**	378,9	421,1	336,7
	Fev	690	40,6	620,9	690	551,7
	Mar	719,6	42,7	528,5	587,4	469,7
2016	Abr	299,3	27,3	371,5	412,9	330,1
	Mai	111,9	18,06	258,6	287,4	229,8
	Jun	93,9	9,3	186,5	207,3	165,8
	Jul	71	9,9	118,5	131,7	105,3
	Ago	52,3	15,1	84,8	94,2	75,4
	Set	99	16,4	82,4	91,6	73,2
	Out	78	17,2	96,8	107,6	86

** Não houve amostragem.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

É visível a tendência dos valores medidos de ^7Be (círculos) no solo para ajusta-se ao comportamento predito (linhas). É importante ressaltar que durante o período seco (abril-agosto) o conteúdo de ^7Be no solo mostra um decaimento exponencial decrescente, semelhante ao decaimento radioativo, avaliando que a perda de atividade ocorre por esse mecanismo. Isto indica que o local pode ser usado como Sítio de Referência para aplicar a técnica do ^7Be e reforçar o pressuposto que a

entrada de ^7Be por deposição seca é negligenciável em comparação ao ingresso por deposição húmida, podendo ser antecipado o inventário do ^7Be no solo a partir do conhecimento de seu ingresso na chuva. Porém, apesar que a concordância entre o medido no solo e o estimado na chuva seja grande, há uma diferença entre estes valores para cada mês avaliado. Isto sugere que outros fatores também poderiam estar afetando, em menor grau, o ingresso de ^7Be desde a atmosfera por isto, seria interessante analisar em estudos futuros aspectos tais como: a origem das massas de ar que chegam na região, análise de aerossóis, origem das tempestades, padrão (direção e velocidade) dos ventos na região, com o propósito de compreender duma forma mais detalhada o ingresso de ^7Be na atmosfera.

5.3.3. Determinação das taxas de erosão e sedimentação

Os processos de erosão e de sedimentação do solo são de ocorrência natural no ambiente; no entanto, produto de más práticas de gestão e do uso inadequado da terra estes fenômenos podem ser acelerados, tornando-lhes em processos de degradação.

A erosão é apenas o degaste que sofre a rocha, devido à ação de vários agentes incluindo os seres vivos; A sedimentação é a deposição em um local determinado de todo o material erodido e transportado de maneira previa.

Anualmente, de maneira global aumenta o número de hectares de solo que estão sujeitas a processos de erosão e de sedimentação, o que provoca a diminuição da produtividade (perda de minerais e matéria orgânica) ou a perda total do solo (sedimentação de áreas produtivas) .

Uma vez conhecidas as características próprias e o comportamento sazonal do ^7Be na parcela de trabalho, procedeu-se a determinar os valores de erosão e/ou sedimentação para a mesma. Para atingir este objetivo levou-se em conta cada um dos pressupostos da técnica assim como a capacidade analítica do laboratório.

Para aplicar a técnica foi utilizado como Sítio de Referência o local avaliado previamente (secção 5.3.1 e 5.3.2). O perfil ^7Be neste sítio mostra a típica diminuição exponencial decrescente com a profundidade característica dos Sítios de Referência e o conteúdo total (inventário) medido corresponde ao predito por deposição úmida em locais onde a única perda de atividade ocorre por decaimento radioativo.

Para calcular a erosão e sedimentação em cada um dos pontos de amostragem definidos na parcela de trabalho, é necessário o uso de equações (6) e (7) dos itens 2.2.2 e 2.2.3 desta tese. Dadas as características da zona de estudo apenas foi possível utilizar a equação (6), já que os valores de inventário nos 12 pontos monitorados foram menores do que o valor total do inventário no Sítio de Referência, indicando que todos os pontos estão sujeitos a erosão.

O inventário de referência (A_{ref}) medido no perfil do solo foi de $78 \pm 17,2 \text{ Bq.m}^{-2}$, a profundidade mássica de relaxação (h_0) calculada foi de $7,1 \text{ kg.m}^{-2}$. Este valor indica que no Sítio de Referência o 63% do inventário total está acima de h_0 ou seja entre 0 e 7,5 mm aproximadamente (SEPULVEDA *et al.*, 2008).

Ao aplicar o modelo de transporte de solo baseado no uso do ^7Be , foi obtido um valor de erosão líquida de $4,35 \text{ kg.m}^{-2}$ ($43,5 \text{ t ha}^{-1}$) (SEPULVEDA *et al.*, 2008); analisando a Figura 28 e observando que as chuvas no início de outubro foram as de maior volume, podemos atribuir-lhes às mesmas o processo erosivo que deu-se em nossa área de pesquisa. Um ponto importante a ressaltar é que a camada de solo perdido produto da erosão foi de 5 mm.

5.4. Fontes de erosão na Parcela de Trabalho

5.4.1. Principal mecanismo de erosão

As chuvas, dado seu regime (outubro até março), e as características da parcela de trabalho (tipo de solo, inclinação, relevo), representam a principal agente de erosão no local.

Em itens anteriores já este tema já foi tratado de uma maneira mais detalhada; portanto, aqui somente se faz uma menção rápida do referido mecanismo de erosão e sua representatividade.

5.4.2. Fontes secundárias de erosão

O local de trabalho escolhido para o desenvolvimento desta pesquisa, foi selecionado depois de realizar uma análise prévia de suas características próprias e da facilidade para coletar as amostras de solo e água sem gerar nenhum dano alguma ao proprietário da fazenda.

No ponto anterior, foi indicado o principal mecanismo de erosão na parcela de trabalho, mas há outras fontes que concorrem para o processo erosivo que ocorre na zona investigada. Esta são listadas a seguir e indicadas a sua importância:

1. Pisoteio do gado: na época seca esta é uma das principais fontes secundárias de erosão dentro do sítio de estudo. É importante ressaltar que a parcela investigada situa-se dentro de uma parte da fazenda onde o gado fica solto e transita de um ponto a outro sem restrição alguma.

2. Ação dos ventos: durante o intervalo de duração desta pesquisa, não foram percebidas grandes intensidades dos ventos no local de trabalho; pelo contrário, as mesmas geralmente tenderam a ser suaves.

3. Queimadas: durante os quase três anos de trabalho dentro da parcela, não se tem prova física alguma de que as queimadas foram uma atividade comum para a limpeza da massa vegetal da fazenda. Por isto este item não poder ser considerado como uma fonte secundária de erosão.

4. Uso da Terra e outras ações antrópicas: dentro da fazenda o uso da Terra restringe-se a duas atividades principais que são: a criação de gado leiteiro e a plantação de erva para a alimentação do mesmo. Na parcela de trabalho não ocorreram outras ações que pudessem contribuir com a erosão do solo.

6. CONCLUSÃO

Observando a boa concordância mostrada na Figura 28 entre os valores medidos e esperados de ^7Be no solo, especialmente durante a época de chuvas (outubro a março) podem ser extraídas as conclusões a seguir:

Confirmou-se que o principal mecanismo de entrada de ^7Be no solo do local desta pesquisa é a deposição úmida. Produto do comportamento assimétrico das precipitações (chuvas) na área, o conteúdo de ^7Be no solo refletiu uma variação sazonal acentuada ao longo do ano. Durante a estação chuvosa na qual ocorre pelo menos 80% da precipitação, os valores medidos e previstos do ^7Be estão mais próximos entre si; no entanto, na estação seca as diferenças entre eles são maiores. Esta situação pode ser atribuída à ação dos ventos na região que, apesar de não mostrarem grandes intensidades, podem interferir com a deposição e aderência do ^7Be no solo, isto é: podem ser agentes de transporte da deposição seca gerada pela gravidade para outras áreas próximas..

O monitoramento mensal do conteúdo de ^7Be , medido em amostras do solo, e o estimado esperado pela deposição úmida (eventos de precipitação), permitiram concluir que o ^7Be no solo da parcela em estudo pode atingir uma profundidade de penetração de 5 cm. Comparando esse resultado com outras investigações, pode-se dizer que é uma penetração vertical atípica para este radionuclídeo. No entanto, têm sido observados casos em que foram atingidas maiores profundidades, dependendo isto das características próprias do solo.

A Figura 28 mostra como o ingresso estimado de ^7Be aumenta com os eventos de precipitação. A mesma figura também reflete a diminuição dos valores de entrada esperados na estação seca. Pode-se concluir que o conteúdo do ^7Be no solo pode ser estimado com precisão a partir da constante de entrada do ^7Be na chuva e dos eventos de precipitação.

O modelo de ^7Be para estimar o transporte de solo (erosão e sedimentação), baseia-se na comparação do inventário de ^7Be nos pontos monitorados e localizados em uma parcela sob estudo com o inventário total do Sítio de Referência. O que faz que seja realmente necessário conhecer com a maior precisão possível o conteúdo do ^7Be no Sítio de Referência e assim obter

bons resultados ao aplicar a técnica. Pode-se considerar então como uma boa ferramenta para a correta seleção do Sítio de Referência, a estimativa do conteúdo de ^7Be esperado no solo a partir da entrada deste nos eventos de precipitação.

Para o uso do modelo de redistribuição de solo usando o ^7Be como traçador, é necessário conhecer dois dados importantes no Sítio de Referência que são: a distribuição vertical do radionuclídeo e sua profundidade mássica relaxação; o perfil no solo deve ter uma distribuição vertical decrescente com respeito à profundidade de penetração desde a superfície, a partir do conteúdo de ^7Be nas diferentes camadas e profundidades analisadas é obtida a profundidade mássica de relaxação onde se acumula 63% do radionuclídeo no solo. Com estes dados estabelece-se a altura de corte das amostras de solo, são otimizados processos como a preparação das amostras e por conseguinte os tempo de contagem por espectrometria de raios gama.

A partir do inventário total do Sítio de Referência, da profundidade mássica de relaxação e dos inventários nos pontos de amostragem, pode-se calcular as taxas de erosão e sedimentação para a parcela sob estudo. Neste trabalho só foi possível efetuar o cálculo da erosão já que o 100% dos inventários nos pontos amostrados foi sempre menor que o inventário total do Sítio de Referência; no entanto, foram obtidos os parâmetros mínimos para gerar o entendimento para calcular as taxas de deposição do solo em futuras investigações.

De um modo geral, o modelo da redistribuição de solo ^7Be é aplicado em solos com pouca ou nenhuma vegetação, submetidos à prática do arado para a agricultura, com declives suaves. No nosso caso, escolhemos uma parcela de terreno com uma inclinação de moderada a forte, sujeita ao pisoteio do gado, com vegetação baixa. Os pontos de monitoramento foram previamente limpos para garantir a entrada de ^7Be no solo em qualquer época do ano, ao aplicar o modelo foi obtido um valor de erosão média e neta de $4,35 \text{ kg.m}^{-2}$ onde a capa de solo removida foi de 5 mm. Essa perda de solo somente para um mês de chuva é um valor representativo e a ter em conta, já que nossa área de trabalho é um local vulnerável a sofrer processos erosivos intensos, pelo que é de grande importância manter a cobertura vegetal que cobre o local na atualidade.

Na coleta final de amostras de solo deste trabalho, foram estabelecidos 12 pontos de amostragem distribuídas da maneira seguinte: no local de referência, na área erodida e na área de acumulação; no entanto, uns dias antes de fazer o trabalho de campo planejado, o dono da fazenda alterou uma grande parte do solo de nossa parcela sob estudo; o que modificou nosso planejamento inicial e evitou que pudesse-se calcular as taxas de deposição do sedimento transportado pelas chuvas do mês de outubro 2016.

Possibilidade de melhoria da metodologia de amostragem

A metodologia de amostragem de esta pesquisa é semelhante às usadas por outros pesquisadores no Brasil; porém, procurando otimizar o tempo das análises radiométricas, é necessário determinar se a distribuição vertical do isótopo no solo é decrescente, assim como a h_0 que é a profundidade onde fica o 63% do ^7Be , com estes parâmetros consegue-se conhecer a altura de corte e reduzir a quantidade de amostra de solo a ser analisada, por tanto muda a geometria de contagem.

Para melhorar os tempos de contagem é importante ter uma ideia do comportamento do ^7Be nas diferentes épocas do ano. Desta maneira tem-se conhecimento de quando seu conteúdo no solo é maior e desta maneira pode-se otimizar o tempo de contagem no espectrômetro gama.

REFERÊNCIAS

ANDRELLO, A.; APPOLONI, C. Measurements of the Fallout Flux of Beryllium-7 and its Variability in the Soil. **Brazilian archives of biology and technology**, v.53, n.1, p.179-184, 2010.

BENITEZ N., C. B. Phosphorus-32, phosphorus-37, beryllium-7, and lead-210: Atmospheric fluxes and utility in tracing stratosphere/troposphere exchange. **Journal of geophysical research**, v.104(D9), n.11, p.745-754, 1999.

BLAKE, W.; WALLING, D.; HE, Q. Fallout beryllium-7 as a tracer in soil erosion investigations. **Applied radiation and isotopes**, v.51, p.599-605, 1999.

CAILLET, S.; ARPAGAU, P.; MONNA, F.; DOMINIK, J. Factors controlling ^7Be and ^{210}Pb atmospheric deposition as revealed by sampling individual rain events in the region of Geneva, Switzerland. **Journal of environmental radioactivity**, v.53, p.241-256, 2001.

CANNIZZARO F., G.; RANELI, M.; SPITALE, M.; TOMARCHIO, E. Concentration measurements of ^7Be at ground level air at Palermo, Italy-comparison with solar activity over a period of 21 years. **Journal of environmental radioactivity**, v.72, p.259-271, 2004.

CURRIE, L. Limits for qualitative detection and quantitative determination. **Analytical chemistry**, v.40, p.586-593, 1968.

DERCON, G.; MABIT, L.; HANCOCK, G.; NGUYEN, M. L.; DORNHOFER, P.; BACCCHI, O. O. S.; BENMANSOUR, M.; BERNARD, C.; FROEHLICH, W.; GOLOSOV, V. N.; HACIYAKUPOGLU, S.; HAI, P. S.; KLIK, A.; LI, Y.; LOBB, D. A.; ONDA, Y.; POPA, N.; RAFIQ, M.; RITCHIE, J. C.; SCHULLERR, P.; SHAKHASHIRO, A.; WALLBRINK, P.; WALLING, D. E.; ZAPATA, F.; ZHAANG, X. Fallout radionuclide-based techniques for assessing the impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality: an overview of the main lessons learnt under an FAO/IAEA Coordinated Research Project, **Journal of environmental radioactivity**, v.107, p.78-85, 2012.

DRUMOND, M. M. **Estudo da Formação de Escoamentos Utilizando a Técnica de Traçadores, na Bacia Representativa de Juatuba - Alto São Francisco** - Código FINEP: 01.06.0109.00. Relatório Final, Belo Horizonte: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CDTN/CNEN, 2008.

DUTRA, P. H. **Distribuição do ^{210}Pb em sedimentos de bacias hidrográficas circunvizinhas a mina de urânio de Caldas-MG**. 2014. 122f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ESQUIVEL L., A. D.; MOREIRA, R. M.; MONTEIRO, R. P. G.; DOS SANTOS, A. A. R.; JURI AYUB, J.; VALLADARES, D. L. Wet deposition and soil content of Beryllium - 7 in a micro-watershed of Minas Gerais (Brasil). **Journal of environmental radioactivity**, v.169/170, p.56-63, 2017.

FEELY, H.; LARSEN, R.; SANDERSON, C. Factors That Cause Seasonal Variations in Beryllium-7 Concentrations in Surface Air. **Journal environmental radioactivity**, v.9, p.223-249, 1989.

FRANZ, P. Composição botânica dos campos naturais da Bacia Representativa de Juatuba municípios de Mateis Leme, Igarapé e Itaúna em Minas Gerais. In: **Bacia Representativa de Juatuba**. p. 21-24. Brasília:, 1981, (DNAEE).

GARCÊZ, R. **Determinação das atividades específicas de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K , em amostras de fertilizantes minerais**. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 2016.

GARCÍA O., J. Determinación de ^{210}Pb y otros radionúclidos. In: SANCHEZ CABEZA, J. A.; DÍAZ ASENCIO, M.; RUIZ FERNÁNDEZ, A. C. **Radiocronología de Sedimentos Costeros Utilizando ^{210}Pb : Modelos, Validación y Aplicaciones**. Vienna: IAEA, 2012. 118p.

IAEA. **Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies**. Vienna: IAEA, 2014. (IAEA TECDOC No. 1741). Disponível em <<http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/10501/Guidelines-for-Using-Fallout->

Radionuclides-to-Assess-Erosion-and-Effectiveness-of-Soil-Conservation-Strategies>. Acesso em: 18 de mar. de 2015.

IAEA. **Proyecto Environmental Radionuclides as Indicators of Land Degradation in Latin American, Caribbean and Antarctic Ecosystems**, RLA 5/051 (ARCAL C), 2009. Disponível em <http://arc.al.unsl.edu.ar/Second_meeting.html>. Acesso em: 16 de abr. de 2014.

IOANNIDOU, A.; MANOLOPOULOU, M.; PAPASTEFANOU, C. Temporal changes of ^7Be and ^{210}Pb concentrations in surface air at temperate latitudes (40°N). **Applied radiation and isotope**, v.63, p.277–284, 2005.

JURI AYUB, J.; DI GREGORIO, D.; VELASCO, H.; HUCK, H.; RIZZOTTO, M.; LOHAIZA, F. Short-term seasonal variability in ^7Be wet deposition in a semiarid ecosystem of central Argentina. **Journal of environmental radioactivity**, v.100, p.977-981, 2009.

JURI AYUB, J.; LOHAIZA, F.; VELASCO, H.; RIZZOTTO, M.; DI GREGORIO, D.; HUCK, H. Assessment of ^7Be content in precipitation in precipitation in a South American semi-arid environment. **Science of the total environment**, v.441, p.111-116, 2012.

KASTE, J.; ELMORE, A.; VEST, K.; OKIN, G. Beryllium-7 in soils and vegetation along an arid precipitation gradient in Owens Valley, California. **Geophysical research letters**, v.38, 2011.

KASTE, J.; MAGILLIGAN, F.; RENSHAW, C.; BURCH FISHER, G.; BRIAN DADE, W. Seasonal controls on meteoric ^7Be in coarse-grained river channels. **Hydrological processes**, v.28, p.2738–2748, 2014.

KASTE, J.; NORTON, S.; HESS, C. Environmental chemistry of beryllium-7. **Journal reviews in mineralogy and geochemistry**, v.50, p.271-289, 2002.

KNOLL, G. **Radiation Detection and Measurement**. 3rd. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2000.

LANDIS, J.; RENSHAW, C.; KASTE, J. Measurement of ^7Be in soils and sediments by gamma spectroscopy. **Chemical geology**, v.291, p.175-185, 2012.

LOHAIZA, F.; JURI AYUB, J.; VELASCO, H.; RIZZOTTO, M.; DI GREGORIO, D.; HUCK, H.; VALLADARES, D. L. Depósito Atmosférico de Berílio-7 en Suelo. **Anales afa**, v.23, n.1, p.157-160, 2011.

LOHAIZA, F.; VELASCO, H.; JURI AYUB, J.; RIZZOTTO, M.; DI GREGORIO, D.; HUCK, H.; VALLADARES, D. L. Annual variation of ^7Be soil inventory in a semiarid region of central Argentina. **Journal environmental radioactivity**, v.130, p.72-77, 2014.

MABIT, L. B. Comparative advantages and limitations of the fallout radionuclides ^{137}Cs , ^{210}Pb and ^7Be for assessing soil erosion and sedimentation. **Journal of environmental radioactivity**, v.99, p.1799–1807, 2008.

MARESTONI, L. D. **Estudo da redistribuição de solo superficial em áreas cultivadas e não cultivadas utilizando o fallout do ^7Be** . 2007. 88p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, Paraná.

MARESTONI, L.; APPOLONI, C.; ANDRELLO, A.; MARTINS, E. ^7Be fallout for superficial soil erosion assessment. International Nuclear Atlantic Conference. **Anais...** September 27 - October 2, 2009, Rio de Janeiro. ABEN, 2009.

NEVES, B. V. B.; DUTRA, L. V.; DRUMOND, M. M.; RODRIGUES, P. C. H.; VERSIANI, B. R. Influência do desmatamento na evapotranspiração: Estudo na micro-bacia do ribeirão Serra Azul - MG com apoio do geoprocessamento. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 7^o, 2004, São Luis, MA. **Anais...** 2004.

OLSEN, C.; LARSEN, I.; LOWRY, P.; CUTSHALL, N.; TODD, J.; WONG, G.; CASEY, W. Atmospheric fluxes and marsh-soil inventories of ^7Be and ^{210}Pb . **Journal of geophysical research**, v.90, p.10487-10495, 1985.

PAPASTEFANOU, C. Beryllium-7 Aerosols in Ambient Air. **Aerosol and air quality research**, v.9, n.2, p.187-197, 2009.

PAPASTEFANOU, C.; IOANNIDOU, A. Beryllium-7 and solar activity. **Applied radiation and isotopes**, v.61, p.1493–1495, 2004.

PATROCINIO J., A. C. **Avaliação do histórico de sedimentação no lago da usina três bocas pela medida do ^{137}Cs e ^7Be** . 2010. 81f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, Paraná.

PINTO, M. **Avaliação da variabilidade espacial do fallout do ^7Be** . 2011. 71f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PINTO, M.; PIRES, L.; BACCHI, O.; ARTHUR, R.; BRUNO, I. P.; REICHARDT, K. Spatial variability of ^7Be fallout for erosion evaluation. **Radiation physics and chemistry**, v.83, p.1–7, 2013.

SALISBURY, R.; CARTWRIGHT, J. Cosmogenic ^7Be deposition in North Wales: ^7Be concentrations in sheep faeces in relation to altitude and precipitation. **Journal environmental radioactivity**, v.78, p.353-361, 2005.

SCHULLER, P.; IROUMÉ, A.; WALLING, D.; MANCILLA, H.; CASTILLO, A.; TRUMPER, R. Use of ^7Be to document soil redistribution following forest harvest operations. **Journal of environmental quality**, v.35, n.5, p.1756-1763, 2006.

SEPULVEDA, A.; SCHULLER, P.; WALLING, D.; CASTILLO, A. Use of ^7Be to document soil erosion associated with a short period of extreme rainfall. **Journal of environmental radioactivity**, v.99, p.35-49, 2008.

SOARES V., R. C. **Caracterização do fluxo subterrâneo das águas na porção sudoeste da bacia representativa de Juatuba**. 2010.166f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

TALPOS, S.; RIMBU, N.; BORSAN, D. Solar forcing on the ^7Be -air concentration variability at ground level. **Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics**, v.6, p.1626–1631, 2005.

BERKELEY LABORATORY ISOTOPES. **Project's: Exploring the Tables of Isotopes**. Disponível em < http://education.lbl.gov/Resources/lab_resources.html>. Acesso em: 15 de Jun. de 2015.

WALLBRINK, P.; MURRAY, A. Fallout of ^7Be in South Eastern Australia. **Journal environmental radioactivity**, v.25, p.213-228, 1994.

YONG, L. Assessment of soil erosion and effectiveness of soil conservation measures in China. **Soils Newsletters**, v. 30, n.2, p. 6-7, 2008.

YOSHIMORI, M.; HIRAYAMA, H.; MORI, S. Production of ^7Be Nuclei in the Earth's Upper Atmosphere from Galactic Cosmic Rays and Solar Energetic Particles. In: International Cosmic Ray Conference, 28th, 2003. Trukuba, Japan. **Proceedings of the...** Trukuba: International Union of Pure and Applied Physics, 2003. p.4273-4276.

ZAPATA, F. **Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides**. Dorchecht: Kluwer, 2002. 219 p.

Zhu, J.; Olsen, C. Beryllium-7 atmospheric deposition and sediment inventories in the Neponset River estuary, Massachusetts, USA. **Journal environmental radioactivity**, v.100, p.192-197, 2009.

APÊNDICE

Congressos

* **VARIATION OF MONTHLY INVENTORIES OF ^7Be FALLOUT IN THE SOILS OF THE SUB-BASINS 3 AND 4 IN MATO FRIO RIVER, A TRIBUTARY OF SERRA AZUL RIVER.** International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2015. Rebouças Convention Center. São Paulo, SP, Brasil. Outubro 04-09, 2015.

Autores: Alexander D. Esquivel e Rubens M. Moreira.

* **DETERMINATION OF ^7Be IN SOIL SAMPLE BY GAMMA SPECTROMETRY FOR EROSION RESEARCHS.** International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2015. Rebouças Convention Center. São Paulo, SP, Brasil. Outubro 04-09, 2015.

Autores: Alexander D. Esquivel, Geraldo F. Kastner, Ângela M. Amaral, Roberto Pellacani G. Monteiro e Rubens M. Moreira.

* **EVALUACIÓN DEL USO DE ^7Be PARA ESTIMAR EROSIÓN DE SUELOS EN ZONAS AGRÍCOLAS DE LA REGIÓN SEMIÁRIDA DE LA ARGENTINA.** IV° Reunión Argentina de Geoquímica de la Superficie (IV RAGSU). Puerto Madryn (Chubut, Argentina). Noviembre 22-28, 2016.

Autores: Esquivel, A., de Rosas J.P., Martinez Heimann, D., Negri, A.E., Lohaiza, F., Valladares D.L., Juri Ayub, J.

Artigos

* Esquivel L. A.D., Moreira, R.M., Monteiro, R.P.G., Dos Santos, A.A.R., Juri Ayub, J., Valladares, D.L. (2017). **Wet deposition and soil content of Beryllium - 7 in a micro-watershed of Minas Gerais (Brasil).** *Journal of Environmental Radioactivity*, 169/170, 56-63.

Grupo de Trabalho

* Forma-se um grupo de trabalho multidisciplinar em regiões diferentes da América Latina (Argentina, Brasil e Panamá), o que enriquece a investigação deste radionuclídeo (^7Be) e seu uso como traçador.



Brazilian Nuclear Program:

State Policy for a Sustainable Development

October 04-09, 2015 • Rebouças Convention Center • São Paulo, SP, Brazil

The Brazilian Association for Nuclear Energy (ABEN) certifies that the paper entitled
VARIATION OF MONTHLY INVENTORIES OF 7BE FALLOUT IN THE SOILS OF THE SUB-BASINS 3 AND 4 IN MATO FRIO RIVER, A
TRIBUTARY OF SERRA AZUL RIVER

Alexander D. Esquivel, Rubens M. Moreira

was presented in the 2015 International Nuclear Atlantic Conference (INAC 2015) as a welcome addition to the considerable technical program.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Antonio Teixeira e Silva'.

Antonio Teixeira e Silva
ABEN President

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Rogerio Arcuri Filho'.

Rogerio Arcuri Filho
INAC 2015 Chair





Brazilian Nuclear Program:

State Policy for a Sustainable Development

October 04-09, 2015 • Rebouças Convention Center • São Paulo, SP, Brazil

The Brazilian Association for Nuclear Energy (ABEN) certifies that the paper entitled
DETERMINATION OF ⁷BE IN SOIL SAMPLE BY GAMMA SPECTROMETRY FOR EROSION RESEARCHS

Alexander D. Esquivel, Geraldo F. Kastner, Ângela M. Amaral, Roberto Pellacani, Rubens M. Moreira
was presented in the 2015 International Nuclear Atlantic Conference (INAC 2015) as a welcome addition to the considerable technical program.

Handwritten signature of Antonio Teixeira e Silva in blue ink.

Antonio Teixeira e Silva
ABEN President

Handwritten signature of Rogerio Arcuri Filho in blue ink.

Rogerio Arcuri Filho
INAC 2015 Chair





RAGSU

Cuarta Reunión Argentina
de Geoquímica de la Superficie

"Tierra, aire y agua: hacia el entendimiento de los procesos globales"

Certificamos que

Alexander Esquivel, Juan Pablo de Rosas, Diego Martinez Heimann, Agustín E. Negri, Flavia Lohaiza, Diego L. Valladares, Jimena Juri Ayub
presentaron el trabajo titulado

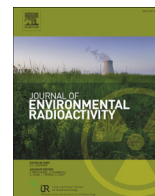
Evaluación del uso de Berilio-7 para estimar erosión de suelos en zonas agrícolas de la región
semiárida de la Argentina

En la IV Reunión Argentina de Geoquímica de la Superficie, realizada en Puerto Madryn, Chubut,
Argentina entre los días 23 al 25 de Noviembre de 2016.

Dr. José Luis Esteves
Presidente

Dr. Pablo J. Bouza
Vicepresidente





Wet deposition and soil content of Beryllium – 7 in a micro-watershed of Minas Gerais (Brazil)



Alexander D. Esquivel L^{a, b}, Rubens M. Moreira^b, Roberto Pellacani G. Monteiro^c, Anômora A. Rochido Dos Santos^d, Jimena Juri Ayub^{e, f, *}, Diego L. Valladares^{e, g}

^a Universidad Tecnológica de Panamá, Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas - (CIHH), Vía Domingo Díaz al lado de Pazco, S.A., 0819-07289, El Dorado, Panama

^b Setor de Meio Ambiente - (SEMAM), Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - (CDTN-CNEN), Av. Presidente Antônio Carlos 6627, Campus da UFMG, 31270-901 Belo Horizonte, MG, Brazil

^c Serviço de Técnicas Analíticas - (SERTA), Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - (CDTN-CNEN), Av. Presidente Antônio Carlos 6627, Campus da UFMG, 31270-901 Belo Horizonte, MG, Brazil

^d Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - (PUC-Minas), Av. Dom José Gaspar, 500 - Coração Eucarístico, Belo Horizonte, MG CEP 30535-901, Brazil

^e Grupo de Estudios Ambientales - (GEA), Instituto de Matemática Aplicada San Luis - (IMASL), Universidad Nacional de San Luis – CONICET, Ejercito de los Andes 950, D5700HHW San Luis, Argentina

^f Departamento de Bioquímica y Ciencias Biológicas, Facultad de Química, Bioquímica y Farmacia, Universidad Nacional de San Luis, Ejercito de los Andes 950, D5700HHW San Luis, Argentina

^g Departamento de Física, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales, Universidad Nacional de San Luis, Ejercito de los Andes 950, D5700HHW San Luis, Argentina

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 November 2016

Received in revised form

27 December 2016

Accepted 28 December 2016

Available online 11 January 2017

Keywords:

Atmospheric deposition

⁷Be

Soil content

Soil erosion

Gamma spectrometry

ABSTRACT

Beryllium-7 (⁷Be) is a natural radionuclide of cosmogenic origin, normally used as a tracer for several environmental processes; such as soil redistribution, sediment source discrimination, atmospheric mass transport, and trace metal scavenging from the atmosphere. In this research the content of ⁷Be in soil, its seasonal variation throughout the year and its relationship with the rainfall regime in the Mato Frio creek micro-watershed was investigated, to assess its potential use in estimating soil erosion. The ⁷Be content in soil shows a marked variation throughout the year. Minimum ⁷Be values were observed in the dry season (from April to September) and were between 7 and 14 times higher in the rainy season (from October to March). The seasonal oscillations in ⁷Be soil content could be explained by the asymmetric rainfall regime. A highly linear relationship between rainfall amount and ⁷Be deposition was observed in rain water. A good agreement between ⁷Be soil content and ⁷Be atmospheric deposition was noticed, mainly in wet months. ⁷Be penetration in soil reaches a 5 cm depth, this could be explained by the soil type in the region. The soils are Acrisol type, characterized by low pH values and clay illuviation in deeper layers of the soil. In some regions of Brazil special attention should be paid if this radionuclide will be used as soil erosion tracer, taking into account the soil origin and its particular properties.

© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Beryllium-7 (⁷Be) is a natural radionuclide of cosmogenic origin. It is produced in the atmosphere by spallation when cosmic rays hit nitrogen and oxygen atoms (Lal et al., 1958). Once formed it diffuses

through the atmosphere and is electrostatically adsorbed in atmospheric aerosol particles. It reaches the soil surface via two mechanisms: wet and dry deposition. It is assumed that the wet deposition is the main path leading to the ⁷Be input (90%) into the soil, dry deposition being negligible (Salisbury and Cartwright, 2005; Ioannidou et al., 2005; Wallbrink and Murray, 1994).

⁷Be is an important environmental radionuclide, its relatively short half-life of ⁷Be (53 days), along with its continuous and assessable production rate makes it a potentially powerful tool for surveying environmental processes; such as soil redistribution,

* Corresponding author. Grupo de Estudios Ambientales - (GEA), Instituto de Matemática Aplicada San Luis - (IMASL), Universidad Nacional de San Luis – CONICET, Ejercito de los Andes 950, D5700HHW San Luis, Argentina.

E-mail address: jjuri@unsl.edu.ar (J. Juri Ayub).

sediment source discrimination, atmospheric mass transport, and trace metal scavenging from the atmosphere (Kaste et al., 2002; Yoshimori, 2005; Steinmann et al., 1999; Daish et al., 2005; Matissoff et al., 2002; Walling et al., 1999; Blake et al., 1999; Schuller et al., 2006; Sepulveda et al., 2008). Kaste et al. (2011) pointed out that, in order to evaluate the potential of ^7Be as a tracer, it is necessary to know its seasonal and spatial depositional variability as well as quantify the relationship between precipitation and surface inventories.

The Mato Frio creek is one of the main tributaries forming the Serra Azul River watershed, near Belo Horizonte, one of the main cities in the central Brazilian plateau. The importance of this watershed is related with a large water reservoir constructed at its lower course, which is the third largest drinking water supply system (2.5 m³/s) to the metropolitan region of Belo Horizonte (about 4 million inhabitants). Besides supplying water, two other conflicting activities are practiced within the watershed area: vegetable agriculture in the central area and intensive iron ore mining at its headwaters. As regards the Mato Frio creek micro-watershed, it covers an area of about 8 km² and has a hilly landscape with steep slopes. Therefore the main farming activity is related with raising livestock, hence both the heavily inclined pasture lands and the constant trampling by cattle promote soil erosion. The sediment load thus added to the watercourses, compounded with those resulting from the ore mining activities, will result in increased sedimentation at the water reservoir downstream with severe volume losses and water quality impairment.

The aim of the research is to investigate the content of ^7Be in soil, its seasonal variation throughout the year and its relationship with the rainfall regime in the Mato Frio creek micro-watershed, to assess its potential use to estimate soil erosion.

2. Materials and methods

2.1. Study area

The study area is located within the Mato Frio creek micro-watershed (20 °04'00" S, 44 °28'00" W; 20 °08'00" S, 44 °31'00" W), about 50 km to the southwest of Belo Horizonte, in the state of Minas Gerais, Brazil (Maia et al., 2006). The micro-watershed is located 908 m asl and has slopes ranging from 6.5% to 15.5%. The climate in the region is characterized by a warm and rainy season from November to March and a cool and dry season from June to August (Neves et al., 2004). Average monthly temperatures vary between 16 °C and 23 °C. Taking into account temperature and rainfall records, the climate can be characterized as high altitude tropical according to the Köppen classification (Soares, 2010).

The soils in the region are Acrisols and Ferrasols, the most important soils in Brazil; covering 40% and 20% of the country, respectively. The Acrisol type is characterized by clay illuviation. In this soil type the clay particles are accumulated in the Bt horizon, causing sand enrichment in the upper layers of soil. This soil is rather acid (pH = 4.5), well-drained and has low fertility. The Ferrasols are a deep soil characterized by the sandy loam texture of the B horizon. This soil type is also acid (pH 4.5–5.0), well-drained with high porosity and has moderate to high fertility (Soares, 2010).

Two parcels, Parcel 1 (P1) and Parcel 2 (P2), on different soil types in the Mato Frio River micro-watershed were selected for this study. Parcel P1 was an Acrisol type and P2 a Ferrasol type, with the intention of exploring differences in the ^7Be soil content.

2.2. Rainfall

A rainfall database at the micro-watershed was obtained from the nearest available rain gauge station, located 1 km away from the

study sites (www.snirh.gov.br/hidroweb/FAZENDA_LARANJEIRAS-JUSANTE, Rainfall Code Station: 2044041, Responsible: ANA, Operating Agency: CPRM, State: Minas Gerais, County: Itaúna, Basin: Rio São Francisco, Micro-watershed: Rios São Francisco, Parapoeba E). The database covers daily rainfall over a period of 39 years, from 1977 to 2015. Additionally, monthly rainfall samples were collected throughout the wet season from October 2015 to May 2016. A standard gauge was used and the ^7Be activity concentration was measured by gamma spectrometry.

2.3. Soil

During the period from May 2014 to May 2015 monthly soil samples were taken at 1 cm depth, at both the P1 and P2 parcels. In each sampling time and for each parcel, two soil samples were taken. All soil samples were collected using a scraper plate with a 50 cm × 20 cm collection surface. The soil samples were dried at room temperature for 48 h, sieved through a 2 mm mesh and placed in a Marinelli beaker for gamma spectroscopy analysis.

In October 2015 at parcel P1, the soil profile was sampled at 6 cm depth, cutting the profile in layers of 1 cm thick, with the aim to explore the total ^7Be soil content. Following this in the same parcel, from November 2015 to May 2016, monthly soil samples were collected to 5 cm depths, cutting the profile into two layers: 0–2.5 cm depth and 2.5–5.0 cm depth. In each month only one soil profile were collected. The soil samples were collected and processed using the same equipment and procedures as before.

2.4. Gamma spectrometry analysis

The soil and rain water samples were submitted to gamma spectrometry analysis and the ^7Be emission pulses were measured at the 477.6 keV energy peak using a Hyper-pure Germanium detector (GX5019, CANBERRA) at the Nuclear Spectrometry Laboratory of the Center for Development of Nuclear Technology (CDTN). This spectrometer has a 1.9 keV resolution and a 50% relative efficiency at the 1.33 MeV gamma energy of ^{60}Co . The samples, weighting around 600 g, were placed in 700 mL Marinelli beaker, and the total counting time varied between 86,000 s and 180,000 s.

The efficiency curve of the Hyper-pure Germanium detector was obtained using the Genie 2000 CANBERRA Monte Carlo mathematical model software. Compounding it with the detector efficiency curve, the counting efficiency (ϵ) of the ^7Be gamma ray energy in the soil samples was $\epsilon = 3.3\%$. This methodology had to be used given that no soil reference standard was available at the laboratory. The same procedure has been used in other studies involving gamma spectrometry analysis (Díaz and Vargas, 2008; Vidmar et al., 1994; García, 2012; Pinto et al., 2013).

Equation (1) has been used to calculate the ^7Be activity in the soil and rain water samples (A).

$$A = \frac{N}{\epsilon m_a t I_\gamma} \quad (1)$$

where N is the net number of counts corresponding to the gamma radiation (γ) per counting time interval t (s), m_a is the mass of the soil sample (kg), I_γ is the absolute transition probability for the measured gamma ray, and ϵ is the counting efficiency. All the activity measurements were corrected for the ^7Be radioactive decay. The final results were expressed in terms of activity per unit mass of soil (Bq kg⁻¹) and of activity per unit of volume of rain (Bq L⁻¹).

It is necessary to check the interference level of ^{228}Ac in ^7Be activity measurements by gamma spectrometry in order to establish an analytical protocol for the ^7Be determination. Therefore, some soil samples were counted at different time intervals, of

approximately one year following sampling, in order to secure the complete decay of ${}^7\text{Be}$ ($t_{1/2} = 53.3\text{d}$) and detect if ${}^{228}\text{Ac}$ from the ${}^{232}\text{Th}$ the series was present. Twelve soil samples were recounted about one year after collection and showed the absence of photopeak at 478.40 keV. It was therefore concluded that the interference of ${}^{228}\text{Ac}$ was negligible in analysed samples. For rain water samples, it was not necessary to perform this analysis, since they would not have the ${}^{232}\text{Th}$ decay series. Fig. 1 (a–b) shows the gamma spectra of the same sample recorded after a time interval of approximately one year.

A further analytical check for soil samples as to count at 477.59 keV after different storage times to check if the activity decay was consistent with the ${}^7\text{Be}$ half-life (Fig. 1 c–d). A half-life of 51.3d was measured consistent with the value of 53.3d found in the literature for ${}^7\text{Be}$ (<http://ie.lbl.gov/education/isotopes.htm> (2000)).

The lower limit of detection (LLD) was determined (Currie, 1968) at the 95% confidence level and counting time of 180,000 s was 0.12 Bq kg^{-1} . The limit of detection calculated by Kaste et al. (2014) was 0.45 Bq kg^{-1} for sample masses in the range of 125–175 g.

3. Results and discussion

The monthly rainfall over the last 39 year period is depicted in Fig. 2. The annual precipitation is in the range of 1500 mm, with a wet season (from November to March) and a dry season (from April to October). During the period of the study, 80% of the precipitation events occurred in the wet season.

During the period between May 2014 and May 2015 the activity concentration of ${}^7\text{Be}$ in the top 1 cm of soil ranged from $2.0 \pm 0.1\text{ Bq kg}^{-1}$ to $34.0 \pm 6.5\text{ Bq kg}^{-1}$ at P1 and from 3.1 Bq kg^{-1} to $22.0 \pm 0.2\text{ Bq kg}^{-1}$ at P2 (Table 1). The ${}^7\text{Be}$ contents at 1 cm depth expressed per unit area, varied from $21.1 \pm 2.4\text{ Bq m}^{-2}$ to $295.9 \pm 63.1\text{ Bq m}^{-2}$ at parcel P1 and from $27.7 \pm 5.2\text{ Bq m}^{-2}$ to $162.4 \pm 57.9\text{ Bq m}^{-2}$ at parcel P2 (Table 1). At both parcels, the ${}^7\text{Be}$ content in the upper soil showed a marked variation throughout the period. The minimum ${}^7\text{Be}$ contents were observed in the dry season (from April to September) and were 14 and 7 times higher in the rainy season (from October to March), at P1 and P2, respectively. Variations in the ${}^7\text{Be}$ content in soils throughout the year

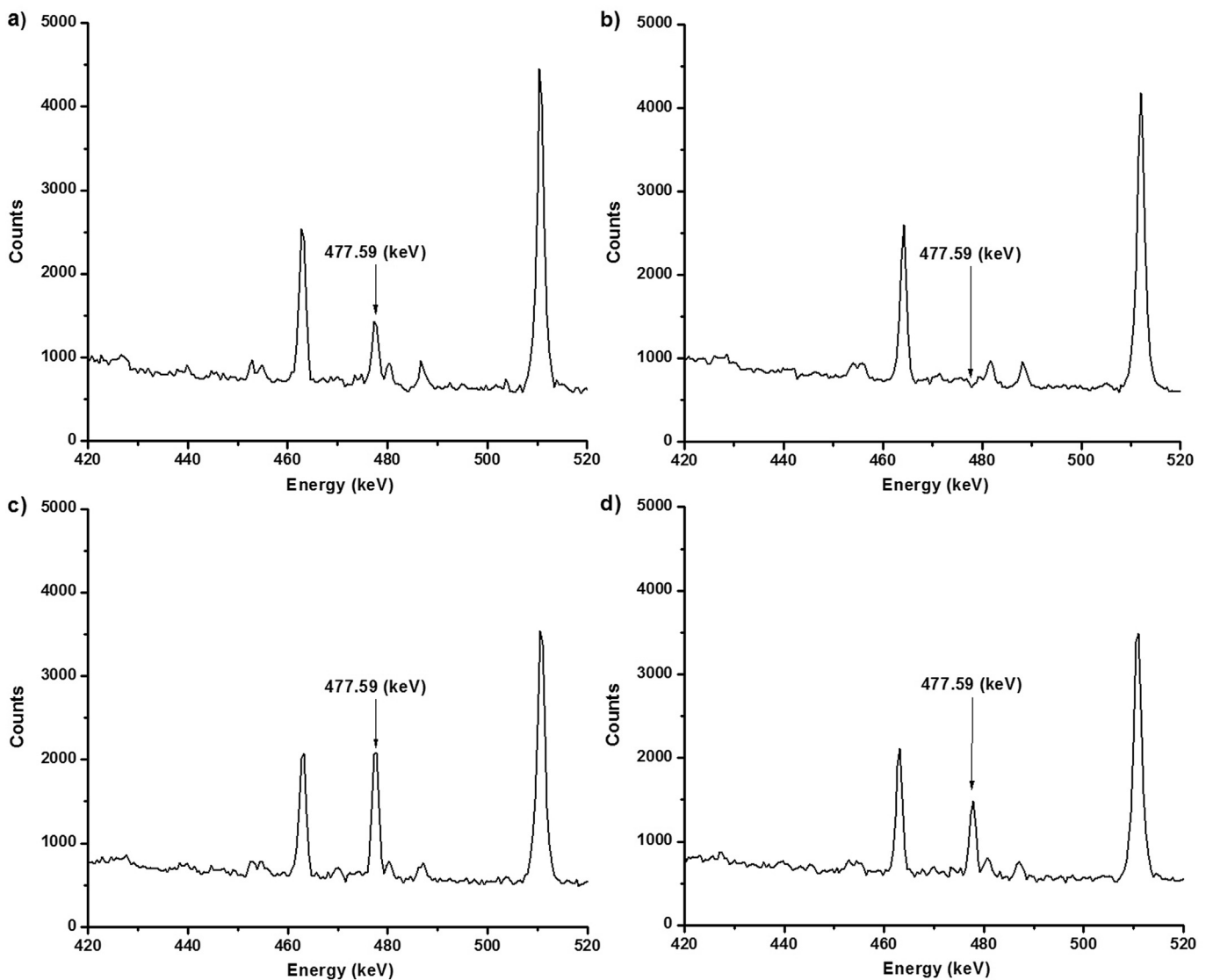


Fig. 1. Record spectra of ${}^{228}\text{Ac}$ interference evaluation and of ${}^7\text{Be}$ half-life measurement (a) Soil sample gamma spectrum registered in march of 2015 (counting time of 180,000 s), (b) Soil sample gamma spectrum registered in september of 2016 (counting time of 347,000 s), (c) Gamma spectrum of soil sample recorded on 04/13/2015 and (d) Gamma spectrum of soil sample after one half-life decay (recorded on 06/03/2015).

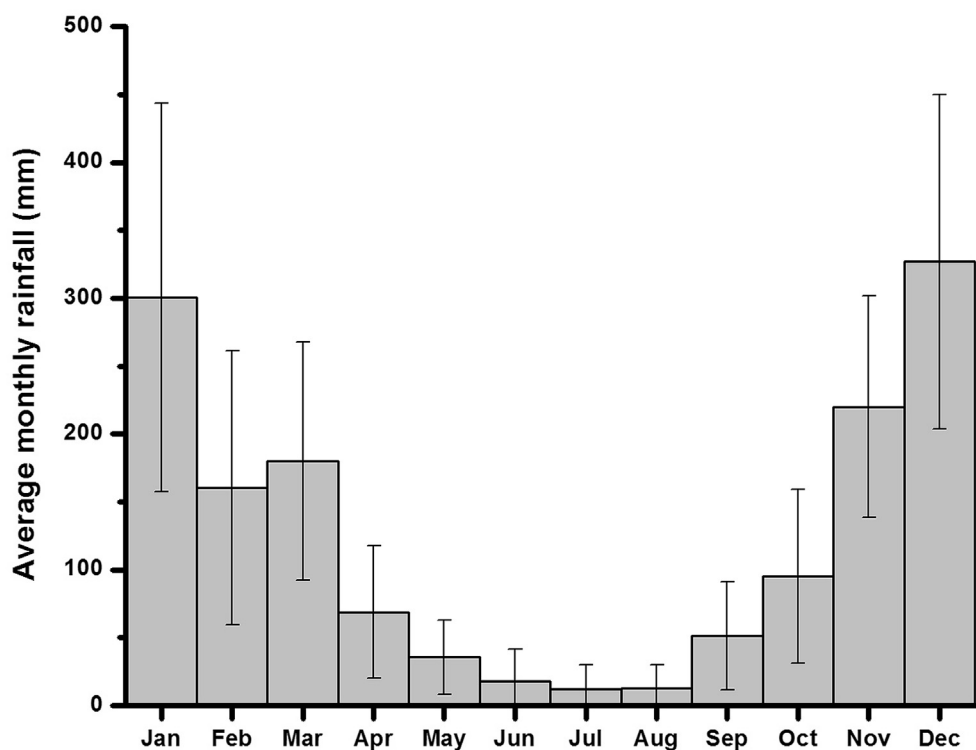


Fig. 2. Mean monthly accumulated rainfall amount in the studied area. Mean values were obtained averaging over the last thirty-nine year period. Bars indicate the standard deviation.

Table 1

^{7}Be activity concentration (C) and ^{7}Be content (A) in the first centimeter of soil, for each study parcel. The mean value of the 6 profiles and estándar deviation (SD) is reported.

		Parcel 1				Parcel 2			
		C (Bq kg ⁻¹)		A (Bq m ⁻²)		C (Bq kg ⁻¹)		A (Bq m ⁻²)	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
2014	May	3.2	1.1	24.7	8.2	**	**	**	**
	Jun	2.0	0.1	21.1	2.4	3.8	***	35.1	***
	Jul	*	*	*	*	*	*	*	*
	Aug	3.6	1.5	28.6	11.2	*	*	*	*
	Sep	4.2	1.1	32.6	10.3	4.4	***	40.1	***
	Oct	2.9	***	22.5	7.1	3.1	***	27.7	***
	Nov	34.0	6.5	295.9	63.1	22.0	0.2	126.3	4.6
2015	Dec	19.3	5.0	133.3	38.1	19.1	4.2	162.4	57.9
	Jan	5.5	0.4	50.5	0.8	5.4	0.4	47.8	3.6
	Feb	18.8	10.3	144.3	117.1	15.4	4.1	124.4	24.4
	Mar	21.1	5.9	266.0	119.1	14.7	4.3	150.7	47.2
	April	9.8	0.8	100.5	32.1	5.0	0.6	48.1	8.3
	May	8.2	2.9	70.0	8.2	4.2	0.5	35.5	2.7

* Below the detection limit.

** No sampling.

*** Only one profile sampled.

have been described at other regions in the world. Kaste et al. (2011) in California (USA) and Juri Ayub et al. (2009) in San Luis, Argentina found that the seasonal variation in the ^{7}Be content in the soil can be explained by the asymmetric pattern of the rainfall distribution throughout the year. The dry and wet seasons of the present study area are akin to both the California and San Luis regions.

During the wet season, from October 2015 to May 2016 monthly accumulated rainfall was sampled and ^{7}Be content measured. Fig. 3 shows the dependence of ^{7}Be deposition on the amount of rainfall.

There was a strong linear relationship between these two parameters; with a slope of $1.37 \pm 0.17 \text{ Bq L}^{-1}$ ($r^2 = 0.93$; $p = 0.001$). Olsen et al. (1985) also reported linear relationships with $r^2 = 0.63$ and 0.54 at two regions in the USA, Caillet et al. (2001) reported $r^2 = 0.66$ ($p = 0.001$) at a site in Switzerland. Zhu and Olsen (2009) in the USA reported a positive correlation with $r^2 = 0.46$. Walling et al. (2009) in Southern Chile, found $r^2 = 0.82$. Similar results were found at an environment with a seasonal precipitation regime by Kaste et al. (2011) with $r^2 = 0.8$ and by Juri Ayub et al. (2012), with $r^2 = 0.82$.

If it is assumed that: a) ^{7}Be dry deposition is negligible (Salisbury and Cartwright, 2005; Ioannidou et al., 2005; Wallbrink and Murray, 1994), b) the value of ^{7}Be activity concentration in rainwater remains constant (Juri Ayub et al., 2012), and c) the only mechanism leading to ^{7}Be loss from the soil is radioactive decay, then the expected value of ^{7}Be content in the soil due to wet deposition could be estimated using both the value of the slope, $1.37 \pm 0.17 \text{ Bq L}^{-1}$, and the mean monthly precipitation (Fig. 2). Fig. 4 depicts the measured values of ^{7}Be content in soil (Table 1) and the predicted values of ^{7}Be content by wet deposition. Only a few cases indicate a perfect match between measured and estimated ^{7}Be content. In both parcels, most of the measured ^{7}Be inventory values in the soil (at 1 cm depth) were less than the estimate of ^{7}Be content from wet deposition. The few data with a close match corresponded to dry months.

This difference between these two values could be due to a deeper penetration of ^{7}Be in the soil profile. With the objective of evaluating this hypothesis, in October 2015, for P1 the soil profile was sampled at 6 cm depth, cutting the profile in layers of 1 cm thickness. It was found that ^{7}Be was detectable down to the 5 cm depth. The ^{7}Be content in soil shows the typical decreasing vertical distribution (Fig. 5). The estimated relaxation mass depth (h_0) is 43.4 kg m^{-2} . The magnitude of this parameter indicates a deeper

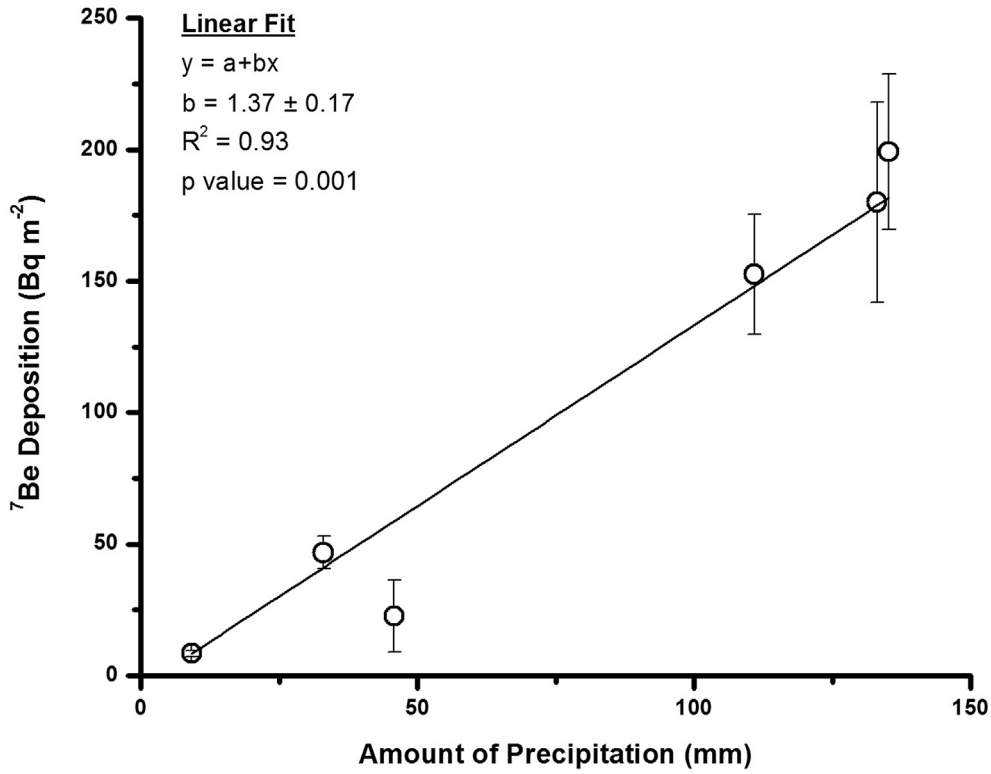


Fig. 3. ⁷Be deposition versus rainfall amount. Linear fit was obtained with error as weight. The bar error was estimated from the statistical counting error and the error in the measurements of amount of precipitation.

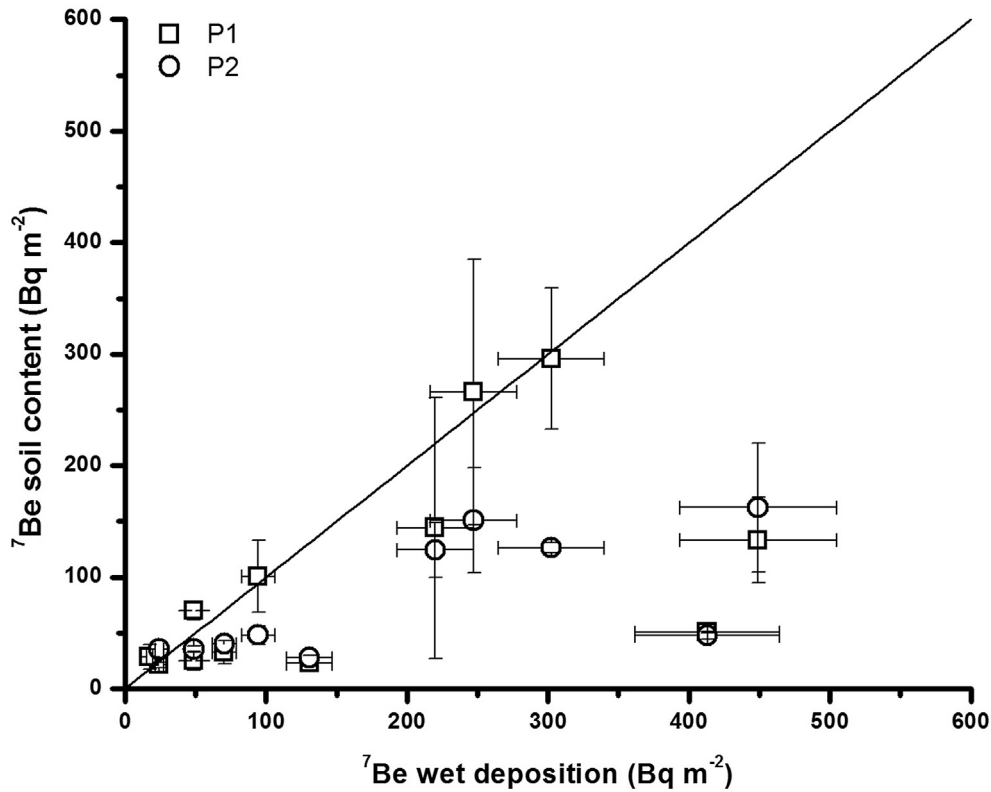


Fig. 4. Measured ⁷Be soil content in soil vs ⁷Be wet deposition (estimate in soil). The ⁷Be wet deposition was estimated using the mean monthly annual rainfall (Fig. 5) and the estimated slope obtained in Fig. 6. The bar error in y axis was estimated taking into account de statistical counting error and the error in the soil sampling. The continuous line shows the hipothetical perfect match between measured and estimate ⁷Be.

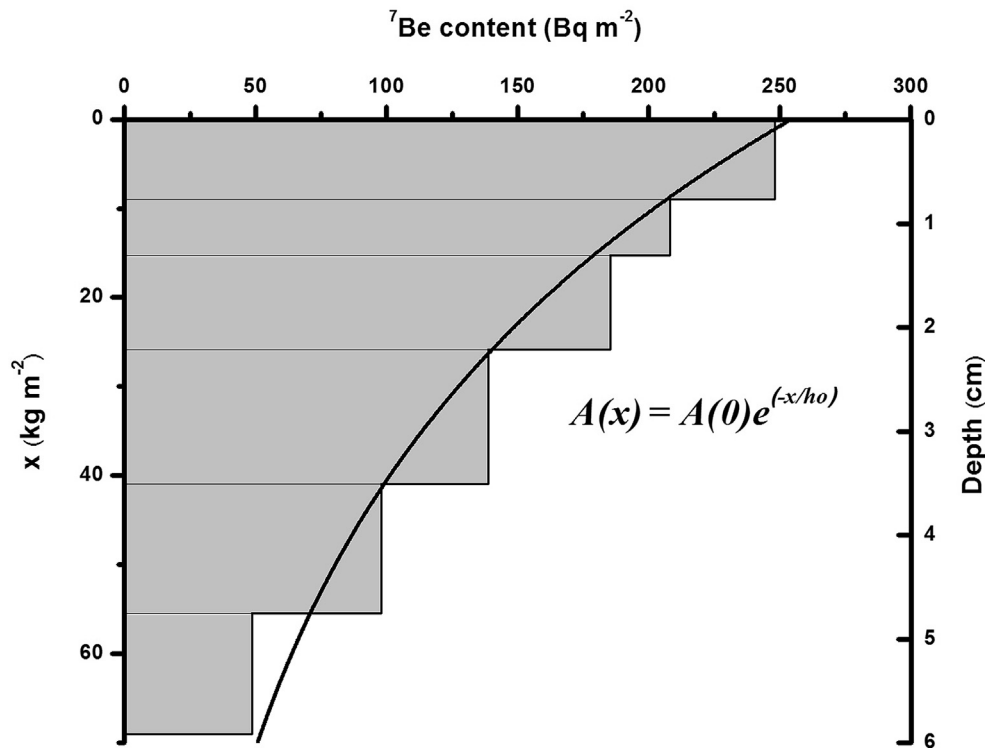


Fig. 5. Vertical soil distribution of ^7Be content in the soil profile for P1 in October 2015. The line correspond the fit to an exponential decreasing function.

penetration of the radionuclide into the soil; 63.2% of the radionuclide is retained in the soil layer between the surface and h_0 (Sepulveda et al., 2008).

Most of the literature describing the distribution of ^7Be in soil report maximum penetrations depths of about 2 cm of soil (Sepulveda et al., 2008; Lohaiza et al., 2014). The penetration depth observed in the present study is unusual, but has been observed by other authors who report penetration depths down to 8 or 10 cm in some soils (Kaste et al., 2002). These authors suggest that the drainage structure and the moisture status of the soil could be affecting the depth distribution of ^7Be . The soil at the P1 study site is of Acrisol type, characterized by low pH and clay illuviation. The higher sand content in the superficial layers of soil and its low pH could be the reasons for the deeper penetration of ^7Be at this site.

Taking into account the recorded rainfall events from the 2015/2016 biennium and the ^7Be activity concentration in rain, the expected annual cycle of ^7Be wet deposition on the soil could be quite accurately estimated (Fig. 6, upper part, lines). The bars in the lower part of this figure show the ^7Be input from the atmosphere as pulses which are related to the rain episodes. Based on the deeper penetration of ^7Be in parcel P1, for the period from November 2015 to May 2016 the soil profiles were sampled monthly to 5 cm depth (Fig. 6, circles). This figure reveals that: 1) each ^7Be pulse (each precipitation event) caused an increment of ^7Be deposition, 2) the ^7Be deposition exhibited oscillation cycles due to the asymmetric precipitation pattern, 3) during dry periods the expected ^7Be content in the soil decreased due to radioactive decay; 4) the measured ^7Be content were closer to the value expected from wet deposition and show the same annual cycle due to the asymmetric precipitation regime. These results confirm the deeper penetration (down to 5 cm) of ^7Be in these soils, 5) the seasonal changes in ^7Be content in the soil could be predicted from the atmospheric deposition by rainfalls, and 6) during the dry period the ^7Be content in the soil was lesser than the expected by atmospheric deposition. This last point suggests that the soils in the investigated site could be subject

to an additional loss of ^7Be activity. During the dry season this hilly region is subjected to winds that may lead to soil erosion and explain the lesser value of ^7Be in soil.

4. Conclusions

The ^7Be content of soil and the corresponding input by precipitation events were monitored at a micro-watershed. The results indicated penetration of ^7Be reached the 5 cm depth. The observed vertical penetration is atypical for this radionuclide, but could be explained by the soil type at the site. It is characterized by low pH and clayey illuviation. ^7Be has been widely used to estimate soil erosion and sedimentation. An important precondition for this application is the knowledge of its vertical distribution. Our results show that in some regions and soil types the vertical ^7Be profile can reach deeper depths. In such cases the vertical distribution has to be carefully evaluated if ^7Be is to be used to estimate erosion or sedimentation taken into account the soil type and its properties (clay content, pH, etc).

The ^7Be content in soil had a marked seasonal variation throughout the year, explained by the precipitation pattern. The region have a marked rainy and dry seasons, at least the 80% of the precipitation occurs during the wet season. The oscillation of the ^7Be soil content had a similar pattern, which can be expected from the rainfall events. During the rainy season the measured and predicted values of ^7Be are closer, major differences were recorded in dry periods; which could be attributed to erosion process. During the dry season, winds are common in the region and loss of soil bearing adhered ^7Be is expect to occur.

The good agreement between the measured and expected values of ^7Be content in soil, mainly during the rainy season, confirms the general assumption that wet deposition is the main mechanism by which ^7Be reaches the soil. Furthermore, the ^7Be content in the soil can be accurately estimated by the ^7Be rain content.

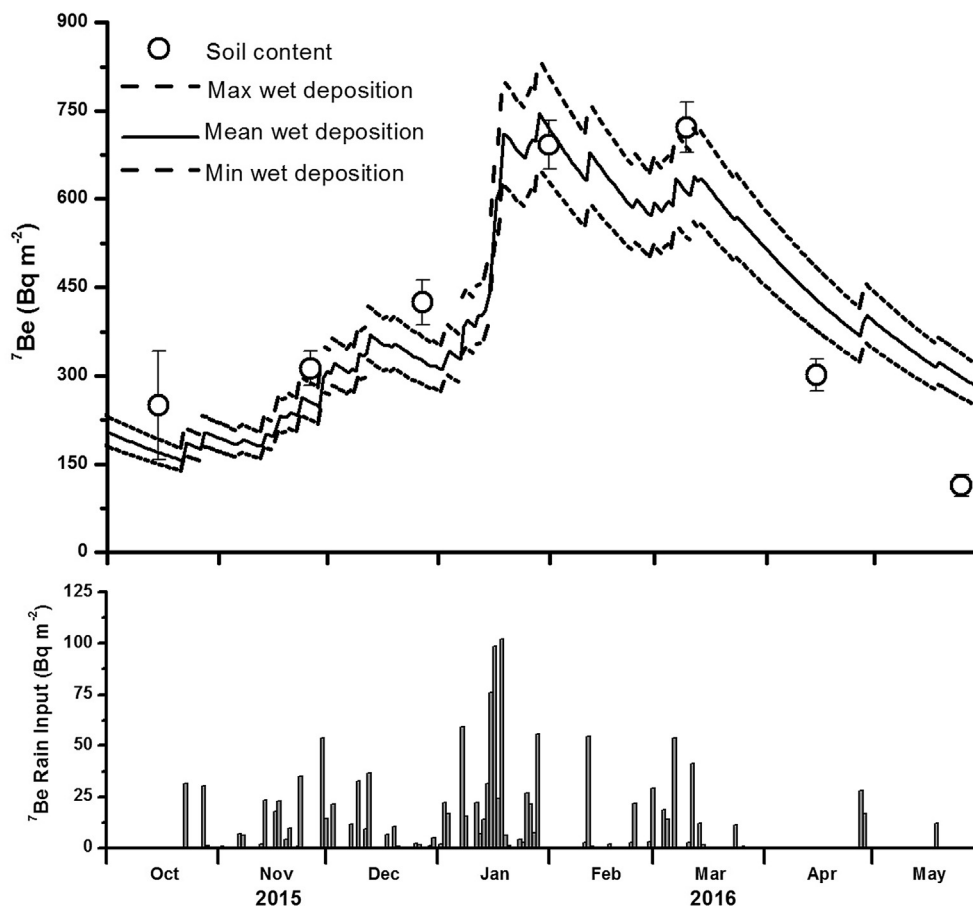


Fig. 6. ^7Be wet deposition and ^7Be soil content (upper) and ^7Be input by rains (lower). ^7Be input was estimated from the amount of daily precipitations occurred in the period October 2015 to May 2016 and the estimated slope of Fig. 2. ^7Be wet deposition was estimated taking into account the ^7Be inputs and its radioactive decay and the error in the slope parameter. The error bar for ^7Be soil content are the same that in Fig. 3.

The use of ^7Be as a tool for erosion and/or sedimentation is based on the comparison of the total content of ^7Be between at a study site (eroded or settled) with that at a reference site. Hence, an accurate measurement of ^7Be at a reference site is crucial to carry studies using the ^7Be technique. Assessment of the expected ^7Be content in soil from the rainfall could be a strong tool to confirm the correct selection of the reference site.

Acknowledgements

This research project is supported by the following institutions: Nuclear Technology Development Center (CDTN), Brazilian Nuclear Energy Commission (CNEN), Environmental Studies Group (GEA), Institute of Applied Mathematics San Luis (IMASL), National University of San Luis (UNSL), National Scientific and Technical Research Council (CONICET) and the Technological University of Panama (UTP). The authors thank the comments provided by the anonymous referee and the editor that greatly enriched this work.

References

Blake, W.H., Walling, D.E., He, Q., 1999. Fallout beryllium-7 as a tracer in soil erosion investigations. *Appl. Radiat. Isotopes* 51, 599–605.
 Caillet, S., Arpagaus, P., Monna, F., Dominik, J., 2001. Factors controlling ^7Be and ^{210}Pb atmospheric deposition as revealed by sampling individual rain events in the region of Geneva, Switzerland. *J. Environ. Radioact.* 53, 241–256.
 Currie, L.A., 1968. Limits for qualitative detection and quantitative determination. *Anal. Chem.* 40, 586–593.
 Daish, S.R., Dale, A.A., Dale, C.J., May, R., Rowe, J.E., 2005. The temporal variations of

^7Be , ^{210}Pb and ^{210}Po in air in England. *J. Environ. Radioact.* 84, 457–467.
 Díaz, N.C., Vargas, M.J., 2008. DETEFF: an improved Monte Carlo computer program for evaluating the efficiency in coaxial gamma-ray detectors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 586, 204–210.
 García, O.J., 2012. Determinación de ^{210}Pb y otros Radionúclidos. *Radiocronología de Sedimentos Costeros Util. ^{210}Pb Modelos, Validación Apl.* 21–28.
 Ioannidou, A., Manolopoulou, M., Papastefanou, C., 2005. Temporal changes of ^7Be and ^{210}Pb concentrations in surface air at temperate latitudes (40 N). *Appl. Radiat. Isotopes* 63, 277–284.
 Juri Ayub, J., Di Gregorio, D., Velasco, H., Huck, H., Rizzotto, M., Lohaiza, F., 2009. Short-term seasonal variability in ^7Be wet deposition in a semiarid ecosystem of central Argentina. *J. Environ. Radioact.* 100, 977–981.
 Juri Ayub, J., Lohaiza, F., Velasco, H., Rizzotto, M., Di Gregorio, D., Huck, H., 2012. Assessment of ^7Be content in precipitation in precipitation in a South American semi-arid environment. *Sci. Total Environ.* 441, 111–116.
 Kaste, J.M., Norton, S.A., Hess, C.T., 2002. Environmental chemistry of beryllium-7. *J. Rev. mineralogía Geochem.* 50, 271–289.
 Kaste, J.M., Elmore, A.J., Vest, K.R., Okin, G.S., 2011. Beryllium-7 in soils and vegetation along an arid precipitation gradient in Owens Valley. *Calif. Geophys. Res. Lett.* 38, L09401.
 Kaste, J., Magilligan, F., Renshaw, C., Burch Fisher, G., Brian Dade, W., 2014. Seasonal controls on meteoric ^7Be in coarse-grained river channels. *Hydrol. Process.* 28, 2738–2748.
 Lal, D., Malhotra, P.K., Peters, B., 1958. On the production of radioisotopes in the atmosphere by cosmic radiation and their application to meteorology. *J. Atmos. Terr. Physic* 12, 306–328.
 Lohaiza, F., Velasco, H., Juri Ayub, J., Rizzotto, M., Di Gregorio, D.E., Huck, H., Valladares, D.L., 2014. Annual variation of ^7Be soil inventory in a semiarid region of central Argentina. *J. Environ. Radioact.* 130, 72–77.
 Maia, A.L., Amaral, I.R., Bruno Rabelo, V.B., 2006. Metodologia DPFT de Identificação do Hidrograma Unitário e das Precipitações Efetivas: estudo de Caso para a Bacia Hidrográfica de Juatuba - MG. *Rev. Bras. de Recur. Hídricos* 11, 79–90.
 Matissoff, G., Bonniwell, E.C., Whiting, P.J., 2002. Soil erosion and sediment sources in an Ohio watershed using Beryllium-7, Cesium-137 and Lead-210. *J. Environ. Qual.* 31, 54–61.
 Neves, B.V.B., Dutra, L.V., Drumond, M.M., Rodrigues, P.C.H., Versiani, B.R., 2004.

- Influência do desmatamento na evapotranspiração: estudo na micro-bacia do ribeirão Serra Azul - MG com apoio do geoprocessamento. VII Simpósio de Recur. Hídricos do Nordeste.
- Olsen, C.R., Larsen, I.L., Lowry, P.D., Cutshall, N.H., Todd, J.F., Wong, G.T.F., Casey, W.H., 1985. Atmospheric fluxes and marsh-soil inventories of ^7Be and ^{210}Pb . *J. Geophys. Res.* 90, 10487–10495.
- Pinto, M.V., Pires, L.F., Bacchi, O.O.S., Arthur, R.C.J., Bruno, I.P., Reichardt, K., 2013. Spatial variability of ^7Be fallout for erosion evaluation. *Radiat. Phys. Chem.* 83, 1–7.
- Salisbury, R.T., Cartwright, J., 2005. Cosmogenic ^7Be deposition in North Wales: ^7Be concentrations in sheep faeces in relation to altitude and precipitation. *J. Environ. Radioact.* 78, 353–361.
- Sepulveda, A., Schuller, P., Walling, D.E., Castillo, A., 2008. Use of ^7Be to document soil erosion associated with a short period of extreme rainfall. *J. Environ. Radioact.* 99, 35–49.
- Soares, V.R.C., 2010. Caracterização do fluxo subterrâneo das águas na porção sudoeste da bacia representativa de Juatuba, 166p. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- Schuller, P., Iroumé, A., Walling, D., Mancilla, H., Castillo, A., Trumper, R., 2006. Use of ^7Be to document soil redistribution following forest harvest operations. *J. Environ. Qual.* 35, 1756–1763.
- Steinmann, P., Billen, T., Loizeau, J.L., Dominik, J., 1999. Beryllium-7 as a tracer to study mechanism and rates of metal scavenging from lake surface waters. *Geochim. Cosmochim. Acta* 63, 1621–1633.
- Vidmar, T., Aubineau-Laniece, I., Anagnostakis, M.J., Arnold, D., Brettner-Messler, R., Budjas, D., Capogni, M., Dias, M.S., De Geer, L.-E., Fazio, A., Gasparro, J., Hult, M., Hurtado, S., Jurado Vargas, M., Laubenstein, M., Lee, K.B., Lee, Y.-K., Lepy, M.-C., Maringer, F.-J., Medina Peyres, V., Mille, M., Morales, M., Nour, S., Plenteda, R., Rubio Montero, M.P., Sima, O., Tomei, C., Vidmar, G., 1994. An intercomparison of Monte Carlo codes used in gamma-ray spectrometry. *Appl. Radiat. Isotopes* 66, 764–768.
- Wallbrink, P.J., Murray, A.S., 1994. Fallout of ^7Be in South Eastern Australia. *J. Environ. Radioact.* 25, 213–228.
- Walling, D.E., He, Q., Blake, W., 1999. Use of ^7Be and ^{137}Cs measurements to document short- and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land. *Water Resour. Res.* 35, 3865–3874.
- Walling, D.E., Schuller, P., Zhang, Y., Iroume, A., 2009. Extending the timescale for using beryllium-7 measurements to document soil redistribution by erosion. *Water Resour. Res.* 45 <http://dx.doi.org/10.1029/2008WR007143>.
- Yoshimori, M., 2005. Production and behavior of beryllium-7 radionuclide in the upper atmosphere. *Adv. Space Res.* 36, 922–926.
- Zhu, J., Olsen, C., 2009. Beryllium-7 atmospheric deposition and sediment inventories in the Neponset River estuary, Massachusetts, USA. *J. Environ. Radioact.* 100, 192–197.