

RAFAELA MACIEL REBELO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE DADOS PARA AVALIAÇÃO
DE RISCO AMBIENTAL A AGROTÓXICOS NO BRASIL USANDO O *PESTICIDE
ROOT ZONE MODEL* (PRZM)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Ciências
Farmacêuticas da Faculdade de Ciências da
Saúde, Universidade de Brasília, como requisito
parcial à obtenção do Título de Mestre em
Ciências Farmacêuticas.

Orientadora: Eloisa Dutra Caldas

**Brasília – DF
2013**

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

Catálogo da Publicação

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília. Acervo 1010391.

R291d Rebelo, Rafaela Maciel.
Desenvolvimento de uma plataforma de dados para avaliação de risco ambiental a agrotóxicos no Brasil usando Pesticide Root Zone Model (PRZM) / Rafaela Maciel Rebelo. -- 2013.
xvii, 108 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília, Faculdade de Ciências da Saúde, Programa de Pós-Graduação em Ciências Farmacêuticas, 2013.

Inclui bibliografia.

Orientação: Eloísa Dutra Calda.

1. Produtos químicos agrícolas - Brasil. 2. Impacto ambiental - Avaliação. 3. Banco de dados. I. Calda, Eloísa Dutra. II. Título.

CDU 632.95(81)

RAFAELA MACIEL REBELO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE DADOS PARA AVALIAÇÃO
DE RISCO AMBIENTAL A AGROTÓXICOS NO BRASIL USANDO O *PESTICIDE
ROOT ZONE MODEL (PRZM)***

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Farmacêuticas da Faculdade de Ciências da Saúde, Universidade de Brasília, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Ciências Farmacêuticas.

Brasília, 26 de julho de 2013.

BANCA EXAMINADORA

PRESIDENTE

Prof^a. Dr^a. Eloisa Dutra Caldas
Membro Interno do Programa
Universidade de Brasília

MEMBROS:

Prof. Dr. Rômulo Penna Scorza Júnior
Membro Externo do Programa
EMBRAPA/ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Prof^a. Dr^a. Fernanda de Almeida Vasconcelos
Membro Externo do Programa
Universidade de Brasília

SUPLENTE:

Prof. Dr. César Koppe Grisolia
Membro Externo do Programa
Universidade de Brasília

Ao meu pequeno milagre, minha princesa,
que cresce dentro de mim e torna
minha vida muito mais especial.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela sua presença constante em minha vida.

Aos meus pais Sandra e Júlio, por todo amor, carinho e apoio incondicional, por serem a minha base, a minha fortaleza.

Ao meu marido Rodrigo, pelo amor, companheirismo, paciência, apoio, conforto, em especial nos momentos mais difíceis.

A minha irmã Fernanda, pela ajuda, exemplo, amizade, compreensão, auxílio, por ser a melhor irmã que eu poderia ter.

A minha avó Diva, por seu carinho constante e a confiança que sempre depositou em mim.

Aos meus avós Pedro, Audir (in memoriam) e Walkyria que junto a minha avó Diva tornaram a minha infância mágica, especial com todo carinho e amor que sempre dedicaram a mim.

A meu afilhado Vinícius, por tornar minha vida muito mais alegre e feliz com seu jeito doce de ser.

A professora Eloísa, por sua orientação, por ter acreditado em mim sempre e por ter me proporcionado a realização deste projeto.

Ao meu Tio Paulo, pelo grande incentivo que sempre deu a capacitação profissional.

A minha Tia Jorgina e minha sogra Rosa, por todo apoio e incentivo.

Ao professor Bernhard Enders que com muita paciência me ajudou a trabalhar com Fortran.

Ao professor Clayton Alveres que me forneceu os *shapes* da equação universal de perda de solos.

Ao amigo Ronald Parker, da Agência de Proteção Ambiental Americana que me ajudou e incentivou em várias etapas deste trabalho.

A amiga Ingrid Sunzenauer, que me proporcionou um excelente treinamento no modelo utilizado no trabalho.

Aos amigos Régis e Jaciara, que me ensinaram o uso da ferramenta ARCGIS e me apoiaram em diversos momentos.

Aos amigos da CCONP e COASP (alguns já em outras instituições), em especial Adriana, Karina, Marlos, Renata, Tiara, Izabela, Reinaldo, Rúben e sua mãe Ivanete, e tantos outros que foram muito importantes neste processo sempre me ajudando especialmente com a amizade.

A minha Coordenadora Marisa, por ter me ajudado, permitido a minha liberação e sempre incentivado o meu crescimento profissional.

Ao Diretor de Qualidade Ambiental Fernando Marques e Coordenador Geral de Avaliação de Substâncias Químicas e Produtos Perigosos Márcio Freitas, por permitirem a minha liberação do IBAMA para dedicação ao mestrado.

Ao setor de capacitação do IBAMA, em especial ao amigo Valério, por me ajudarem na condução do processo de afastamento.

À coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio recebido.

À coordenação Geral de Agrometeorologia do Instituto Nacional de Meteorologia pela cessão das informações das estações meteorológicas.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a execução deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE QUADROS	x
ANEXOS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Avaliação de Risco Ambiental do uso de Agrotóxicos.....	3
2.2 Impacto do uso de agrotóxicos em organismos aquáticos no Brasil	17
2.3 O modelo PRZM (<i>Pesticide Root Zone Model</i>)	23
3. OBJETIVOS	30
4. MÉTODOS	31
4.1 Banco de dados meteorológicos	31
4.2 Banco de dados de culturas	39
4.3 Banco de dados de solos	39
4.4 Cenário PRZM.....	39
4.5 Propriedades físico químicas e de destino ambiental da substância estudada...	46
4.6 Uso do agrotóxico no campo.....	46
4.7 Versão do EXPRESS em português	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1 Dados meteorológicos do INMET.....	48
5.2. Aerosol	53
5.3 Evapotranspiração	53
5.4 Dados de cultivo	56
5.5 Versão do programa EXPRESS em português	59
5.6 Cenário soja	62
5.7 Propriedades físico-químicas e de destino ambiental da substância estudada...	70
5.8 Método de Aplicação do tiametoxam em soja.....	72
5.9 Cenário Americano de tiametoxam em soja.....	72
5.10 Arquivo supervisor de Execução do PRZM	73

5.11 Simulações PRZM.....	73
6. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS	81
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
ANEXOS	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Destino Ambiental dos Agrotóxicos.....	2
Figura 2. Componentes da avaliação de risco ambiental de agrotóxicos.....	5
Figura 3. Estratégia de fases para avaliação de risco ambiental de agrotóxicos.	12
Figura 4. Componentes do PRZM.....	23
Figura 5. Equilíbrio de massa para as camadas superficiais e para as zonas sub-superficiais do modelo PRZM.....	25
Figura 6. Configuração do sistema de ligação PRZM e VADOFT.....	27
Figura 7. Condições específicas para evapotranspiração.....	34
Figura 8. Localização das estações meteorológicas americanas.....	48
Figura 9. Localização das estações meteorológicas brasileiras monitoradas pelo INMET	49
Figura 10. Estações monitoradas pelo INMET com informação de velocidade do vento.	50
Figura 11. Estações monitoradas pelo INMET com informação de direção do vento.	50
Figura 12. Estações monitoradas pelo INMET com informação de umidade do ar...	51
Figura 13. Estações monitoradas pelo INMET com informação de evaporação.....	52
Figura 14. Estações monitoradas pelo INMET com informação de pressão atmosférica.....	53
Figura 15. Tela do Programa PROCAL_ETo, com dados dados da estação meteorológica Iguatu/ CE.....	54
Figura 16. Espacialização da cultura de soja no ano de 2011 no Brasil.	59
Figura 17.Tela de abertura do Express BRA1.0.....	60
Figura 18.Tela do Módulo de Entrada de Dados do Express BRA1.0.....	60
Figura 19. Tela de entrada dos parâmetros PRZM no Express BRA1.0	61
Figura 20. Tela do módulo de apresentação dos resultados do Express BRA1.0....	61
Figura 21. Acesso aos mapas das culturas brasileiras espacializadas.	62

Figura 22. Fator K Erodibilidade.....	67
Figura 23. Arquivo de supervisão de execução do PRZM para o cenário brasileiro.....	73
Figura 24. Entrada do balanço hídrico dados meteorológicos americanos.	74
Figura 25. Entrada do balanço hídrico dados meteorológicos brasileiros.	74
Figura 26. Saída do balanço hídrico do cenário brasileiro completo, na cultura de soja em Dourados/MS tratada com o agrotóxico tiametoxam.	75
Figura 27. Saída do balanço hídrico do cenário americano completo, na cultura de soja no Mississippi tratada com o agrotóxico tiametoxam.....	76
Figura 28. Saída do balanço hídrico do cenário americano parcial, na cultura de soja no Mississippi, com dados meteorológicos brasileiros tratada com o agrotóxico tiametoxam.	76
Figura 29. Saída do balanço hídrico cenário brasileiro parcial, na cultura soja em Dourados/MS, com dados meteorológicos brasileiros tratada com o agrotóxico tiametoxam.....	77
Figura 30. Esquema exemplificando a zonas onde foram determinadas as concentrações no PRZM.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características físico-químicas (FQ) e toxicidade aguda de alguns agrotóxicos relevantes para organismos aquáticos.....	8
Tabela 2. Parâmetros para caracterização de risco para organismos aquáticos.	15
Tabela 3. Conversão de unidades de parâmetros meteorológicos	32
Tabela 4 . Conversão de unidades direção dos ventos.....	32
Tabela 5. Interceptação máxima de chuva pela cultura	43
Tabela 6. Dados de entrada para o cálculo da Evapotranspiração	55
Tabela 7. Comparação dos resultados obtidos para a evapotranspiração.....	56
Tabela 8. Relação de culturas e suas respectivas áreas de cultivo. Fonte:IBGE, SIDRA	57
Tabela 9. Distribuição dos grupos de cores de acordo com a área plantada.....	58
Tabela 10. Resumo dos parâmetros meteorológicos da estação de Ponta Porã/MS (E83702).....	63
Tabela 11. Parâmetros meteorológicos inseridos no modelo PRZM.....	64

Tabela 12. Parâmetros de erosão e terreno para a cultura de soja em Dourados, MS.....	64
Tabela 13. Percentual de ocorrência de cada classe de LS no território brasileiro ...	66
Tabela 14. Classes de erodibilidade do solo	67
Tabela 17. Dados de latassolo vermelho distrófico usados na construção do cenário soja para os 6 horizontes previstos. CORED= 120 cm (Pessoa <i>et al.</i> , 2009).	70
Tabela 18. Parâmetros físico-químicos e de destino ambiental do tiametoxam e clodianidina	71
Tabela 19. Resumo das características meteorológicas estação WBAN03940.....	72
Tabela 20. Total do lixiviado (µg/L) de tiametoxam nos diversos cenários por ano simulado.	79
Tabela 21. Massa total (kg/ha) de tiametoxam disponíveis para erosão e escoamento superficial por ano simulado.	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Estudos requeridos pelo IBAMA para registro de produtos agrotóxicos no Brasil. (adaptado do Anexo IV da Portaria 84, IBAMA, 2012) (IBAMA, 2012a).....	7
Quadro 2. Exemplos de modelos disponíveis para avaliação de risco ambiental de agrotóxicos.....	13
Quadro 3. Estudos que avaliaram o potencial de contaminação de águas superficiais e subterrâneas por agrotóxicos utilizando modelos de lixiviação	18

ANEXOS

Anexo I - Modelo planilha de construção de cenário EPA.....	95
Anexo II - Comparações entre estações meteorológicas no ARCGIS.	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AERONET	Aerosol Robotic Network
AFIELD	Área do campo
AL	Alagoas
AM	Amazonas
AMXDR	Comprimento máximo da raiz
ANETD	Profundidade mínima de evaporação
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
AP	Amapá
as e bs	Coeficientes regionais que expressam a fração de radiação que chega a superfície da terra em dias nublados e sem nuvens, respectivamente.
BA	Bahia
BD	Densidade do solo
C	Nebulosidade, decimas de céu encoberto por nuvens (valor de 0 a 10).
C*	Calmo
CE	Ceará
CEAM	Centro de Modelos para Avaliação da Exposição
CINTCP	Capacidade máxima de intercepção da cultura
Cp	Calor específico do ar seco a pressão constante, $1,013 \times 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}$
CORED	Profundidade total do solo
COVMAX	Máximo de cobertura aérea do dossel
D	Dia do ano
DF	Distrito Federal
DPN	Espessura do compartimento no horizonte
DSN	Define os dados de precipitação
E	Leste
ea	Pressão de vapor natural do ar, kPa
ECP	Estações Climatológicas Principais
ENE	Este - Nordeste

Eq.	Equação
ERFLAG	Parâmetro erosão
es	Pressão de saturação de vapor, kPa
ES	Espírito Santo
ES*	Este – Sudeste
e^{0TM} , e^{0TM} , $e^0(T)$	Pressão de saturação de vapor a temperatura máxima, mínima e média, respectivamente, kPa
Eto	Evapotranspiração de referência, mm dia ⁻¹
EXAMS	<i>Exposure Analysis Modeling System</i>
FIRST	<i>FQPA Index Reservoir Screening Tool</i>
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
G	Fluxo de calor no solo, MJ m ⁻² dia ⁻¹
GENNEC 2	<i>GENeric Estimated Environmental Concentration</i>
GO	Goiás
Gsc	Constante solar, MJ m ⁻² min ⁻¹
ha	hectares
HL	Comprimento hidráulico
HTMAX	Altura máxima do dossel
IBAMA	Instituto Brasileiro dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICNAH	Condição da cultura depois da data de colheita
INICRP	Cultura inicial
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPEIND	Parâmetro evaporação pan
IREG	Região de distribuição das chuvas pelo método SCS
ISCOND	Condição inicial da superfície da cultura
J	Dia Juliano, adimensional
J*	Primeira estimativa do dia Juliano, adimensional
k	Coeficiente de localização de Hargreaves
K	Fator de erodibilidade
LS	Fator topográfico

m	Constante usada no cálculo de LS
M	Mês do ano
MA	Maranhão
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
MCARLO	Módulo de Simulação Monte Carlo
MACRO	<i>Water and solute transport in a macroporous soil</i>
MG	Minas Gerais
MOC	Método das características
MS	Mato Grosso do Sul
MT	Mato Grosso
N	Norte
n	Insolação, h
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NASS	Serviço Nacional de Agricultura e Estatística Americano
NCPDS	Número de períodos de cultura
NDC	Número de culturas na simulação
NE	Nordeste
NNE	Norte – Nordeste
NHORIZ	Número de Horizontes
NNW	Norte – Noroeste
NUSLEC	Número de fatores C
NW	Noroeste
OC	Conteúdo de carbono orgânico
OECD	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PA	Pará
PB	Paraíba
PE	Pernambuco
PEARL	<i>Pesticide Emission Assessment at Regional and Local scales</i>
PELMO	<i>Pesticide Leaching Model</i>
PFAC	Fator de pan evaporação
PI	Piauí
PR	Paraná

PRZM	<i>Pesticide Root Zone Model</i>
RJ	Rio de Janeiro
RN	Rio Grande do Norte
Rn	Saldo de radiação a superfície, MJ m ⁻² dia ⁻¹
RS	Rio Grande do Sul
RO	Rondônia
RR	Roraima
S	Sul
SC	Santa Catarina
SE	Sergipe
SE*	Sudeste
SFAC	Fator neve
SIDRA	Sistema IBGE de recuperação automática
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SLP	Valor da declividade
SP	São Paulo
SSE	Sul – Sudeste
SSW	Sul – Sudoeste
SW	Sudoeste
THEFC	Capacidade de campo
THETO	Conteúdo inicial de água no solo
THEWP	Ponto de murcha
THKNS	Espessura do horizonte
Tm	Temperatura média
TO	Tocantins
U2	Velocidade do vento a 2,00 m de altura, m s ⁻¹
UR	Umidade relativa do ar, %
USEPA	Agência de Proteção Ambiental Americana
USLE	Equação Universal de Perdas de solo
USLEP	Fator P
USLEK	Fator K
USLELS	Fator LS
Vv	Velocidade do vento, m s ⁻¹

W	Oeste
WFMAX	Peso seco máximo do dossel
WNW	Oeste - Noroeste
WSW	Oeste - Sudoeste
z	Altitude local, m
α	Albedo ou coeficiente de reflexão, adimensional
Δ	Declinação da curva de pressão de saturação $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$
ϕ	latitude local, rad
ε	Razão entre o peso molecular do vapor de água pelo ar seco
γ	Constante psicrométrica, $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$
λ	Calor latente de vaporização
λ^*	Distância ao longo da qual se processa o escoamento superficial (m)
θ	Declividade (%);
σ	Constante de Stefan-Boltzmann $\text{MJ K}^{-4} \text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$
ω_s	Ângulo horário do sol

RESUMO

REBELO, Rafaela Maciel. Desenvolvimento de uma plataforma de dados para avaliação de risco ambiental a agrotóxicos no Brasil usando *Pesticide Root Zone Model* (PRZM). – Faculdade de Ciências da Saúde, Universidade de Brasília, 2013.

O Brasil está entre os seis maiores usuários de agrotóxicos do mundo desde a década de 1970, assumindo a liderança deste mercado em 2008 (IBAMA, 2010). O uso intensivo dos agrotóxicos está associado a agravos à saúde humana e a outros organismos não-alvo, além de interferir em processos básicos do ecossistema, como respiração do solo, quebra de matéria orgânica e ciclagem de nutrientes. A avaliação de risco ambiental de agrotóxicos avalia a probabilidade de que um efeito ecológico adverso possa ocorrer, ou esteja ocorrendo, como resultado da exposição dos organismos a uma ou mais substâncias. Apesar deste processo ser um requerimento legal no Brasil desde 1996, o procedimento foi implementado pelo Instituto Brasileiro de Recursos Renováveis (IBAMA) somente em 2011. O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma plataforma de dados, a partir do *Express 1.03.02*, para conduzir avaliação de risco ambiental no Brasil usando o modelo *Pesticide Root Zone Model* (PRZM), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA). O sistema foi testado utilizando o cenário de pulverização foliar do inseticida tiametoxam em soja no Brasil e nos Estados Unidos. Dados com informações climáticas do Brasil nos últimos 10 anos foram obtidos do Instituto Nacional de Metrologia, dados de área plantada foram obtidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística e dados para construção do cenário da cultura soja foram obtidos de estudos publicados, incluindo parâmetros da fenologia, características de plantio, caracterização do solo e equação universal da perda de solos. A plataforma Express BRA 1.0 foi desenvolvida e sua interação com o PRZM foi testada satisfatoriamente no cenário proposto usando dados do Brasil e dos Estados Unidos. O potencial de lixiviação do tiametoxam na zona da raiz da soja é depende principalmente das condições do solo e do desenvolvimento da cultura. A plataforma Express BRA 1.0 poderá ser usada para avaliação de risco ambiental em outros cenários relevantes no processo de registro de agrotóxicos no Brasil.

Palavras chave: Agrotóxicos, Avaliação de Risco Ambiental, PRZM, Express

ABSTRACT

REBELO, Rafaela Maciel. Development of a platform for ecological risk assessment of pesticides in Brazil using the Pesticide Root Zone Model (PRZM). – Faculdade de Ciências da Saúde, Universidade de Brasília, 2013.

Brazil is one of the six largest consumers of pesticides in the world, taking the lead in this market in 2008 (IBAMA, 2010). The intensive use of pesticides is associated with damages to human health and other non-target organisms, and interferes with basic ecosystem processes such as soil respiration, breakdown of organic matter and nutrient cycling. Ecological risk assessment is a process that evaluates the likelihood that adverse ecological effects may occur or are occurring as a result of exposure to one or more substances. Although this process pesticides is a legal requirement in Brazil since 1996, the procedure was only implemented by the Brazilian Institute for the Environment and Renewable Natural Resources (IBAMA) in 2011. The main objective of this work is to develop a platform based on Express 2.03.2, to conduct ecological risk assessment in Brazil using the Pesticide Root Zone Model (PRZM), developed by the U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). The system was tested using the scenario "application of thiamethoxam in soybean". Brazilian meteorological information for the last 10 years were obtained from the National Institute of Meteorology; crop data were obtained from the Brazilian Institute of Geography and Statistics, and data for the soybeans scenario were obtained from published studies, including phenology parameters, agricultural practices, soil horizons and universal soil loss equation. The platform Express BRA 1.0 was developed and its interaction with PRZM satisfactorily tested for the proposed scenario using Brazil and USA data. The leaching potential of thiamethoxam in the root zone was mainly dependent on soil conditions and crop development. The BRA Express 1.0 platform can be used for ecological risk assessment of other relevant scenarios during the pesticide registration process in Brazil.

Keywords: Pesticides, Ecological Risk Assessment, PRZM, Express.

1. INTRODUÇÃO

Os agrotóxicos estão entre os principais instrumentos do atual modelo de desenvolvimento da agricultura brasileira, centrado em ganhos de produtividade (IBGE, 2010a). Os produtos agrotóxicos são regulados no país desde a promulgação do Decreto nº 24.114, de 12 de abril de 1934, que estabeleceu as diretrizes e obrigações para a produção, importação, exportação, comercialização e uso no Brasil (Britto, 2009). A Lei nº 7802, de 11 de julho de 1989 (Brasil, 1989), trouxe mudanças importantes na regulação do tema, incluindo a adição do órgão responsável pelo setor de meio ambiente, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), no processo de avaliação e registro destes produtos no país. Além do IBAMA, o registro envolve o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), que avalia questões agrônômicas, e a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), que avalia o impacto do uso dos agrotóxicos na saúde humana.

Os agrotóxicos são legalmente definidos como *os produtos e os agentes de processos físicos, químicos ou biológicos, destinados ao uso nos setores de produção, no armazenamento e beneficiamento de produtos agrícolas, nas pastagens, na proteção de florestas, nativas ou implantadas, e de outros ecossistemas e também de ambientes urbanos, hídricos e industriais, cuja finalidade seja alterar a composição da flora ou da fauna, a fim de preservá-las da ação danosa de seres vivos considerados nocivos* (Brasil, 1989a). Estes produtos são, portanto, sintetizados para causar danos a organismos vivos e são lançados no meio ambiente.

São vários os processos envolvidos no destino ambiental dos agrotóxicos, incluindo a lixiviação, escoamento superficial, sorção, degradação e volatilização (Spadotto *et al.*, 2010). Ao mesmo tempo, vários organismos não alvos podem ser expostos a estas substâncias no meio ambiente. A Figura 1 ilustra o destino dos agrotóxicos no ambiente desde sua aplicação no campo.

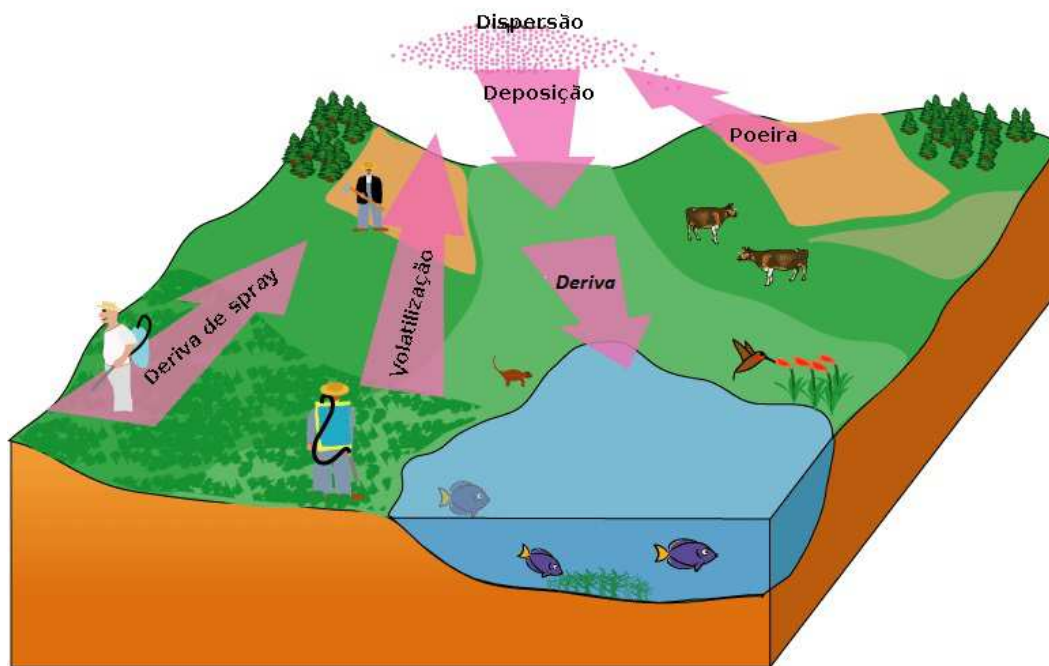


Figura 1. Destino Ambiental dos Agrotóxicos.

A avaliação do potencial risco ao meio ambiente pelo uso dos agrotóxicos é considerada uma importante etapa no processo de registro de agrotóxicos de vários países (UNEP, 2009). Nos Estados Unidos, a Lei Federal de Controle de Inseticidas, Fungicidas e Rodenticidas (*Federal Insecticide, Fungicide, and Rodenticide Act*, FIFRA) fornece a base para a regulação, venda e distribuição dos agrotóxicos no país, e possui entre seus elementos chaves o registro destes produtos com base em um padrão de avaliação de riscos e benefícios (FIFRA, 2005). A publicação em 1998 do *Guideline on Ecological Risk Assessment* pela agência ambiental americana (*United States Environmental Protection Agency*, USEPA), uma revisão da publicação de 1992, foi considerada um marco para um novo paradigma de avaliação de risco ambiental (Footprint, 2006). Na Europa, a *European and Mediterranean Plant Protection Organisation* desenvolveu guias de avaliação de risco ambiental de agrotóxicos com procedimentos flexíveis que podem ser adaptados para serem usados de acordo com as diferentes prioridades dos países membros da comunidade europeia (UNEP, 2009). Outros países como Canadá (Stephenson *et al*, 2007), Austrália (UNEP, 2009) e Japão (Tanaka *et al*, 2008) possuem procedimentos de avaliação de risco ambiental para agrotóxicos estabelecidos, enquanto que na China estes procedimentos ainda estão em desenvolvimento (IUPAC, 2012). No Chile (Jerez *et al*, 2006), o Ministério da Agricultura desenvolveu

uma base de dados de agrotóxicos que permite uma avaliação de risco simplificada, baseada no trabalho de Finzio *et al.* (2001), para determinar a concentração ambiental esperada (CAE). No Brasil, esta avaliação foi prevista na Portaria IBAMA nº 84 de 1996 (IBAMA, 1996) e posteriormente na regulamentação da Lei nº 7802 pelo Decreto nº 4074 de 2002 (Brasil, 1989). Inicialmente, o IBAMA concentrou seus esforços em estabelecer métodos para avaliação do potencial de perigo das substâncias, definindo protocolos de interesse e qualificando o processo de avaliação. Como resultado da avaliação de perigo, os produtos agrotóxicos são classificados em classes ambientais de I a IV, sendo a classe I a mais restritiva (altamente perigoso) e a classe IV a menos restritiva (pouco perigoso). Nesta etapa, ocorreram algumas avaliações de risco pontuais, como por exemplo, com formulações a base de endossulfam, que subsidiaram medidas restritivas que levassem à proteção de organismos aquáticos. Recentemente, o IBAMA passou a adotar a estrutura conceitual do processo de avaliação de risco ambiental definido pela Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA) na avaliação de novos ingredientes ativos (IBAMA, 2012a).

No processo de avaliação de risco ambiental, o uso de modelos/simuladores é uma importante ferramenta na obtenção das concentrações disponíveis do agrotóxico no ambiente após seu uso no campo. O modelo escolhido para este estudo foi o *Pesticide Root Zone Model* (PRZM), que avalia o destino dos agrotóxicos na zona da raiz. A partir dele, é possível estimar as concentrações do agrotóxico após processos como lixiviação, escoamento superficial, evapotranspiração e erosão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Avaliação de Risco Ambiental do uso de Agrotóxicos

A avaliação de risco ambiental, também denominado risco ecológico, avalia a probabilidade da ocorrência de um efeito ecológico adverso como resultado da exposição a uma ou mais substâncias (USEPA, 1998). O processo é usado para sistematicamente avaliar e organizar dados, informações, estimativas e incertezas com a finalidade de ajudar a compreender e prever as relações entre os agrotóxicos e os efeitos ecológicos de forma que seja útil para a tomada de decisão do ponto de vista ambiental (USEPA, 1998). Efeitos ecológicos adversos são

aqueles que alteram características importantes, estruturais ou funcionais, dos ecossistemas. Uma avaliação da adversidade ecológica causada pelo uso de agrotóxicos pode considerar o tipo, a intensidade e escala do efeito, bem como o potencial para recuperação (USEPA, 1998).

O processo de avaliação risco ambiental pode ser descrito em quatro etapas: 1. Coleta de informações; 2. Formulação do problema; 3. Análise de risco e 4. Caracterização do risco (Figura 2). O resultado deste processo pode levar a ações de gerenciamento/mitigação de risco para a garantia do uso seguro dos produtos agrotóxicos ou a não concessão do registro do produto (Figura 2). A avaliação de risco pode ser prospectiva ou retrospectiva e as descrições dos efeitos adversos podem variar de julgamentos qualitativos para probabilidades quantitativas. Os critérios usados para decidir sobre a aceitabilidade dos riscos ambientais causados pelos agrotóxicos, e os caminhos pelos quais os riscos são estimados variam largamente (OEPP, 2003). De uma forma geral, esta aceitabilidade é determinada pelos gestores de risco, e visa balancear os benefícios e os riscos do uso destes produtos.

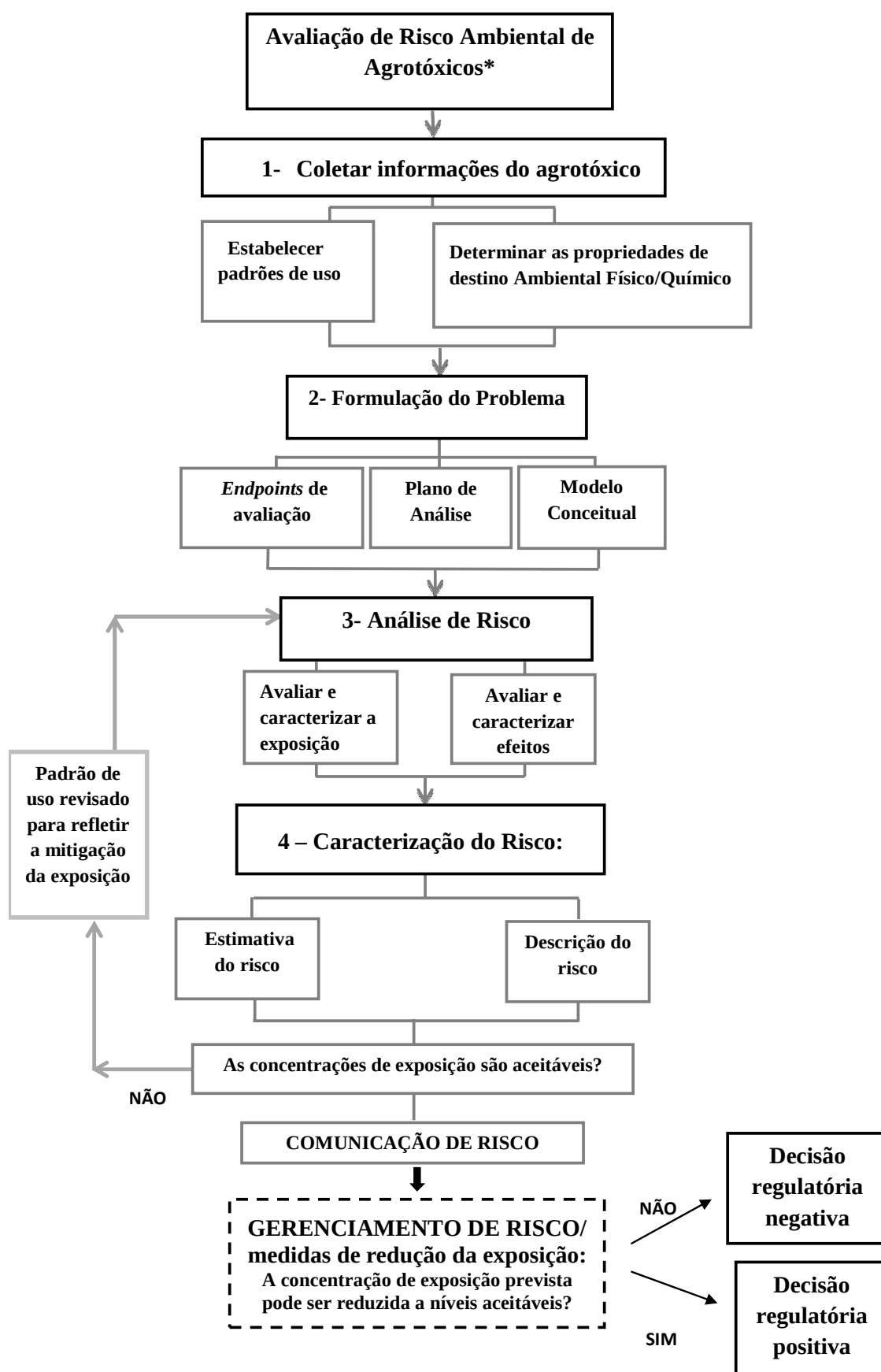


Figura 2. Componentes da avaliação de risco ambiental de agrotóxicos.

2.1.1. Coleta de informações

Na primeira etapa da avaliação de risco ambiental do uso de agrotóxicos (Figura 2), é feita a coleta de informações referentes aos potenciais usos do produto, instruções de uso no campo, propriedades físico-químicas do produto final e ingredientes ativos, bem como persistência ambiental, destino e transporte, e informações laboratoriais sobre efeitos ambientais, incluindo a toxicidade para organismos não alvos (Jones *et al.*, 2004). Estes dados podem ser obtidos da literatura, bases de dados e/ou a partir de resultados de testes laboratoriais exigidos pelas autoridades regulatórias para compor o dossiê do produto que se deseja registrar, conforme estabelecido em legislação específica.

No Brasil os estudos exigidos para avaliação ambiental de um produto agrotóxico estão definidos na Portaria IBAMA nº 84 de 15 de outubro de 1996 (IBAMA, 1996) recentemente modificada pela Portaria IBAMA nº 6 de 17 de maio de 2012 (IBAMA, 2012c). Segundo esta portaria, para cada produto agrotóxico a ser registrado, são exigidos 23 estudos físico-químicos para produto técnico¹ (8 podem ser apresentados na forma de informação) e 10 estudos físico-químicos para produto formulado² (4 podem ser apresentados na forma de informação). Para se avaliar a toxicidade para organismos não alvos, são exigidos nove estudos para produto técnico, e oito estudos para o produto formulado. Adicionalmente, são exigidos três estudos do comportamento do agrotóxico em solos nacionais e um de biodegradabilidade imediata. As principais exigências estão apresentadas no Quadro 1. A Tabela 1 apresenta algumas características físico-químicas e toxicidade aguda para organismos aquáticos de alguns agrotóxicos utilizados no país.

¹Produto técnico - produto obtido diretamente de matérias-primas por processo químico, físico ou biológico, destinado à obtenção de produtos formulados ou de pré-misturas e cuja composição contenha teor definido de ingrediente ativo e impurezas, podendo conter estabilizantes e produtos relacionados, tais como isômeros

²Produto formulado - agrotóxico ou afim obtido a partir de produto técnico ou de, pré-mistura, por intermédio de processo físico, ou diretamente de matérias-primas por meio de processos físicos, químicos ou biológicos;

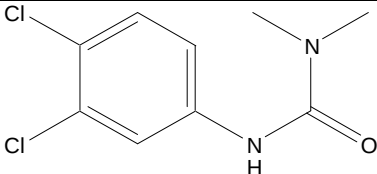
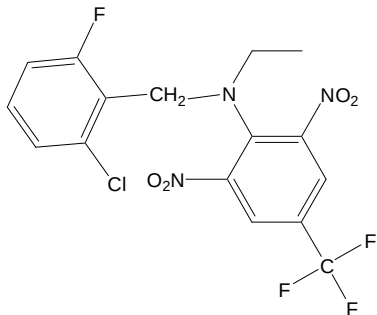
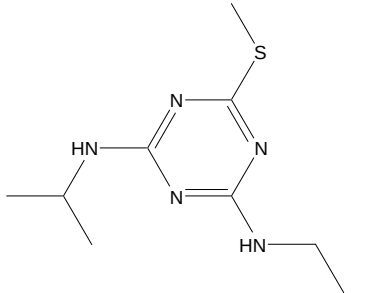
Quadro 1. Estudos requeridos pelo IBAMA para registro de produtos agrotóxicos no Brasil. (adaptado do Anexo IV da Portaria 84, IBAMA, 2012) (IBAMA, 2012a)

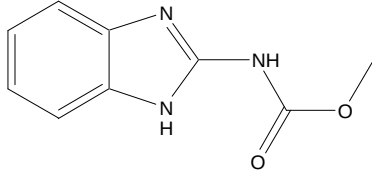
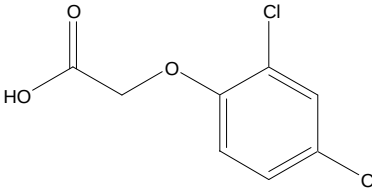
Protocolo	No. OECD / USEPA	Tipo	Requisito	Classificação
Caracterização físico-química (produto técnico e/ou formulado): estado físico, aspecto, cor e odor; identificação molecular; grau de pureza; impurezas metálicas; ponto/faixa de fusão e de ebulição; pH; constante de dissociação; constante de formação de complexo com metais; densidade; tensão superficial de soluções; viscosidade; distribuição de partículas por tamanho; corrosividade; estabilidade térmica e ao ar; ponto de fulgor; propriedades oxidantes; estudo de cinco bateladas				
Mobilidade-transporte				
Solubilidade em água	105 / 830.7840, 830.7860	PT e PF	R	Sim
Lixiviação ou mobilidade em solo	312 / 835.1230	PT ou i.a.	R	Sim
Adsorção/Dessorção em solo	106 / 835.1240	PT ou i.a.	R	Sim
Pressão de Vapor	104 / 830.7950	PT ou i.a.	R	Não
Volatilidade	- / 835.1410	PT	R	Não
Degradação abiótica – persistência				
Hidrólise	111 / 835.2120	PT ou i.a.	R	Sim
Fotólise na água	316 / 835.2240	PT ou i.a.	R	Sim
Degradação biótica – persistência				
Biodegradabilidade imediata	301 / 835.3110	PT ou i.a.	R	Não
Biodegradação em solos	307 / 835.4100, 835.4200	PT ou i.a.	R	Sim
Coeficiente de partição (n-octanol/água)	107 / 830.7560 117 / 830.7570	PT	R	Sim
Bioconcentração em peixes	305 / 850.1730	PT ou i.a.	CR	Sim
Toxicidade para organismos não-alvo				
Micro-organismos	216, 217 / 850.3200	PT e PF	R	Sim
Algas	201 / 850.4500	PT e PF	R	Sim
Organismos do solo	207, 222 / 850.6200	PT e PF	R	Sim
Abelhas (oral ou contato)	213, 214 / 850.3020	PT e PF	R	Sim
Microcrustáceos agudo	202 / 850.1010	PT e PF	R	Sim
Microcrustáceos crônico	211 / 850.1300	PT	R	Não
Peixes agudo	203 / 850.1075	PT e PF	R	Sim
Peixes crônico	210 / 850.1400	PT	R	Não
Aves (dose única)	223 / 850.2100	PT e PF	R	Sim
Aves (dieta)	205 / 850.2200	PT	CR	Não

Protocolo	No. OECD / USEPA	Tipo	Requisito	Classificação
Aves (reprodução)	206 / 850.2300	PT	CR	Não
Plantas não-alvo	208 / 850.4100 227 / 850.4150	PT ou PF	CR	Não
Oral aguda para ratos	420, 423, 425 / 870.1100	PT e PF	R	Sim
Potencial genotóxico, embriofetotóxico e carcinogênico				
Efeitos sobre reprodução e prole em duas gerações sucessivas	416 / 870.3800	PT	R	Não

PT= produto técnico; PF= produto formulado; i.a.= ingrediente ativo; R= registro; CR= Condicionalmente Requerido

Tabela 1. Características físico-químicas (FQ) e toxicidade aguda de alguns agrotóxicos relevantes para organismos aquáticos (IUPAC, 2013)

Identificação	Estrutura química	Propriedades FQ	Toxicidade aguda
Nome comum: diuron Nome químico: 3-(3,4-dichlorophenyl)-1,1-dimethylurea Grupo químico: Uréia / Feniluréia Nº CAS: 330-54-1		PM: 233,1 g/mol Sol_w, 20°C: 35,6 – 45 mg L⁻¹ Log k_{ow}: 2,87 pKa: ND K_{OC}: 468 – 1067 mL/g	Algas: CE₅₀ = 0,00084 – 17,9 mg/L Microcistáceos: CE₅₀ = 1 – 17 mg/L Peixes: CL₅₀ = 4,3-42 mg/L
Nome comum: flumetralina Nome químico: N-(2-chloro-6-fluorobenzyl)-N-ethyl-α,α,α-trifluoro-2,6-dinitro-p-toluidine Grupo químico: 2,6-dinitroanilina Nº CAS: 123001		PM: 421,7 g/mol Sol_w, 20°C: 5,85 µg/L Log k_{ow}: 5,45 pKa: ND K_{OC}: 100000 mL/g	Algas: CE₅₀ = 0,85 – 8,58 mg/L Microcistáceos: CE₅₀ = 0,0028 – 0,42 mg/L Peixes: CL₅₀ = 0,014 – 0,024 mg/L
Nome comum: ametrina Nome químico: N₂-ethyl-N₄-isopropyl-6-methylthio-1,3,5-triazine-2,4-diamine Grupo químico: triazina Nº CAS: 834-12-8		PM: 227,3 g/mol Sol_w, 20°C: 170 – 200 mg/L Log k_{ow}: 2,63 pKa: 4,07 K_{OC}: 170-390 mL/g	Algas: CE₅₀ = 3,6 – 4,06 µg/L Microcistáceos: CE₅₀ = 28 – 45,29 mg/L Peixes: CL₅₀ = 4,24 a 14,1 mg/L

Identificação	Estrutura química	Propriedades FQ	Toxicidade aguda
Nome comum: carbendazim Nome químico: Methyl benzimidazol-2-ylcarbamate Grupo químico: benzimidazol N° CAS: 10605-21-7		PM: 191,2 g/mol Sol _w , 20°C: 7,0 mg/L Log k _{ow} : 1,51 pKa: 4,30 K _{OC} : 200 mL/g	Algas: CE ₅₀ = 2,57 – 7,7 mg/L Microcústáceos: CE ₅₀ = 0,11 – 0,19 mg/L Peixes: CL ₅₀ = 0,36 – 5,5 mg/L
Nome comum: 2,4-D Nome químico: (2,4-dichlorophenoxy)acetic acid Grupo químico: Ácido ariloxialcanóico N° CAS: 94-75-7		PM: 221,0 g/mol Sol _w , 20°C: 23180 mg/L Log k _{ow} : -0.83 pKa: 2.87 K _{OC} : 88.4 mL/g	Algas: CE ₅₀ = 24,2 mg/L Microcústáceos: CE ₅₀ = 100 mg/L Peixes: CL ₅₀ = 63,4 mg/L

PM= Peso Molecular; Sol_w=Solubilidade; Log k_{ow}= Coeficiente de Partição n-Octanol/Água; pKa= constante de dissociação; K_{OC}= Coeficiente de adsorção de carbono orgânico; CE₅₀ = Concentração de efeito CL₅₀ = Concentração letal; ND= não disponível

Apesar destes estudos ainda não serem usados sistematicamente em processos de avaliação de risco ambiental de agrotóxico pelo IBAMA, eles são usados para a classificação do potencial de periculosidade ambiental. Os estudos devem ser conduzidos de acordo com os princípios de Boas Práticas de Laboratório (BPL) em laboratórios monitorados por autoridades reconhecidas, que no Brasil é o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) (Portaria Conjunta n° 1 de 29 de março de 2010) (IBAMA, 2010). Tal exigência é importante para garantir que as informações que serão usadas na avaliação de risco sejam precisas e rastreáveis. Sempre que possível estes estudos devem ser conduzidos em protocolos padrões internacionalmente aceitos, como aqueles definidos pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e pela USEPA.

2.1.2. Formulação do problema

Na etapa de formulação do problema, hipóteses preliminares sobre os efeitos ambientais que podem resultar do uso do agrotóxico são geradas e avaliadas. Esta etapa pode ser considerada de planejamento, onde os objetivos da avaliação de risco são definidos, avalia-se a natureza do problema, e é desenvolvido

um plano de análise de dados e de caracterização de risco (USEPA, 1998). Os principais produtos desta etapa são: *endpoints* de avaliação que refletem adequadamente as metas de gerenciamento e o ecossistema que eles representam, o plano de análise e o modelo conceitual, que descrevem relações chaves entre o agrotóxico e o *endpoint* de avaliação (Figura 2) (USEPA, 1999). Os *endpoints* de avaliação correspondem ao valor ambiental que se deseja proteger que podem ser operacionalmente definidos por uma entidade ecológica ou seus atributos. Uma entidade ecológica pode ser uma espécie, um grupo funcional de espécies, uma comunidade, um ecossistema ou outra entidade de importância ou preocupação. Um atributo é a característica da entidade que é importante para a proteção e está potencialmente em risco (USEPA, 1998). O modelo conceitual especifica as potenciais rotas de exposição, os organismos afetados e os *endpoints* de maior preocupação (USEPA, 2011).

2.1.3. Análise do risco

A etapa de análise do risco é guiada pelos resultados obtidos na formulação do problema, para determinar a probabilidade de exposição a agrotóxicos e os tipos de efeitos ecológicos potenciais que podem ser esperados desta exposição (USEPA, 1998). Esta etapa inclui a caracterização da exposição e a caracterização dos efeitos (Figura 2) (USEPA, 1998). A análise dos dados deve caracterizar a natureza da exposição e as respostas ecológicas dentro das circunstâncias definidas no modelo conceitual (USEPA, 1998).

Caracterização da exposição

A caracterização da exposição descreve as fontes do agrotóxico, sua distribuição no ambiente e seu contato ou co-ocorrência com os receptores ecológicos. Esta etapa pode envolver dados de monitoramento em campo e a utilização de modelos matemáticos, os quais apresentam limitações e incertezas. As incertezas dos dados de monitoramento estão relacionadas à seleção de locais de amostragem (que podem não representar os de maior exposição), à frequência de amostragem (que pode ser insuficiente para determinar as concentrações máximas) e possíveis erros relacionados à coleta. A variabilidade geográfica natural e espacial relacionada ao evento da aplicação do agrotóxico e seu posterior comportamento no

meio ambiente pode dificultar a coleta de dados de monitoramento. As incertezas envolvidas nos modelos matemáticos estão relacionadas à sua adequação à situação que se pretende avaliar, a sua sensibilidade e limitações para estimar a variabilidade temporal e espacial decorrentes da exposição ao agrotóxico. Apesar das limitações, estes modelos podem ser uma ferramenta poderosa para explorar as interações entre os diversos fatores relevantes e predizer os efeitos dos agrotóxicos sobre as populações de espécies não-alvo (USEPA, 1998).

De uma forma geral, os modelos estimam a concentração do agrotóxico no meio ambiente (água e solo) depois da aplicação no campo, para examinar potenciais efeitos adversos para as espécies ecológicas expostas. Pode-se usar um sistema de avaliação em fases para determinar o tipo de modelagem apropriado para o risco apresentado de maneira a otimizar os recursos a serem empregados na análise conforme a complexidade do problema e o risco potencial do produto. As fases iniciais são mais simples, conservadoras, usam modelos determinísticos para descrever um cenário único, enquanto que as fases de níveis mais altos são mais refinadas, incluem dados de campo em modelos probabilísticos para descrever vários cenários (Figura 3) (USEPA, 1998). As fases intermediárias podem incluir alguns refinamentos, como variáveis temporais e espaciais (Unsworth *et al*, 2013). Um modelo muito simples pode não trazer respostas adequadas para determinadas situações, e um muito complexo utilizado prematuramente pode levar a uma situação onde os dados disponíveis e o conhecimento não são suficientes para parametrizar precisamente o modelo. A compreensão do cenário que se pretende avaliar e da situação problema é fundamental para a escolha adequada do modelo a ser utilizado.

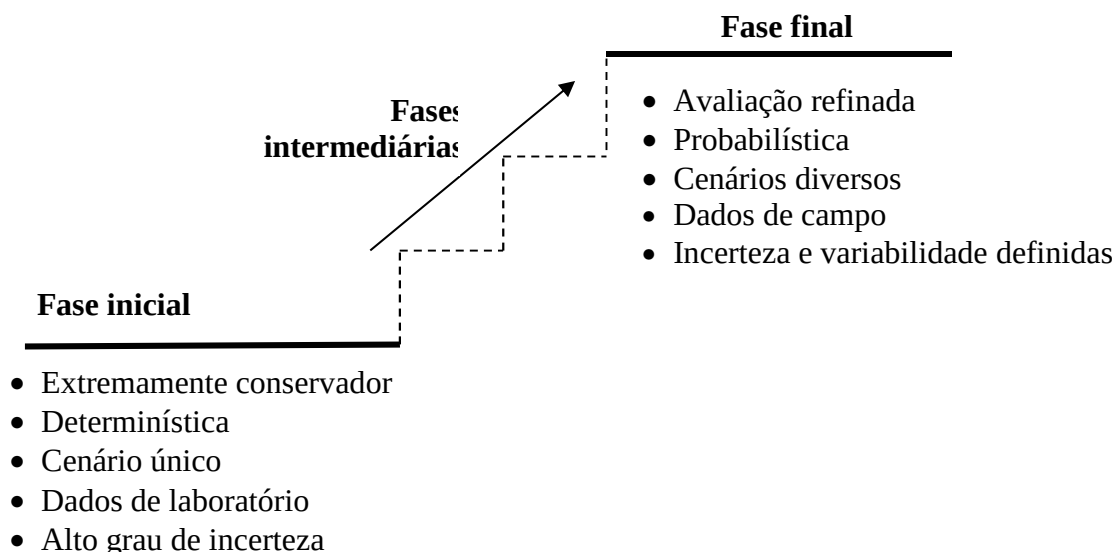


Figura 3. Estratégia de fases para avaliação de risco ambiental de agrotóxicos. Fonte: adaptado (Unsworth *et al*, 2013).

Alguns modelos para estimar as concentrações ambientais de exposição (CAE) para organismos aquáticos utilizados nos Estados Unidos e Europa estão descritos no Quadro 2. O GENEEC2 é um modelo computacional de Fase I que usa o coeficiente de partição solo/água do agrotóxico e os valores de meia-vida de degradação da substância para estimar o escoamento de um campo de 10 hectares em uma lagoa padrão de 2 metros de profundidade. O PRZM-3 é um modelo específico de campo com escala de tempo diária que pode ser usado para estimar o escoamento superficial, a lixiviação e o carreamento de contaminantes associados. O modelo permite entradas de variáveis do solo, coeficientes de degradação da substância em diferentes camadas de solo e fatores de cultivo com erosão do solo, e manejo no decorrer do tempo (Stephenson e Solomon, 2007). O simulador PEARL (versão 3.3) tem como objetivo principal simular a lixiviação dos agrotóxicos em solos através da integração de fatores que atuam de forma direta e indireta nesse tipo de transporte, como os atributos químicos e físicos do solo, o clima e as características físico-químicas dos agrotóxicos (USEPA, 1998).

Quadro 2. Exemplos de modelos disponíveis para avaliação de risco ambiental de agrotóxicos

Nome do Modelo	Desenvolvedor do Modelo	Características	Fase	Tipo
FIRST (<i>FQPA Index Reservoir Screening Tool</i>) (USEPA, 2008)	USEPA	Modelo de água superficial para consumo humano	I	Meta-modelo Equações diferenciais
MACRO (<i>Water and solute transport in a macroporous soil</i>) (E.U., 2010a)	Swedish University of Agricultural Sciences	Modelo numérico unidimensional do fluxo de água e transporte de solutos reativos em solos agrícolas (macro e microporos).	I e II	Equações diferenciais parciais (diferenças finitas, 1D)
GEENEC 2 (<i>GENeric Estimated Environmental Concentration</i>) (Parker e Rieder, 1995)	USEPA	Modelo de água superficial: organismos aquáticos e o ambiente.	I	Meta-modelo Equações diferenciais
PRZM (<i>Pesticide Root Zone Model</i>) (Suárez, 2005)	USEPA	Modelo de água superficial, unidimensional de diferenças finitas que representa o destino dos agrotóxicos e nitrogênio na zona da raiz das plantas.	II	Equações diferenciais parciais (elementos finitos, 1D)
PEARL (<i>Pesticide Emission Assessment at Regional and Local scales</i>) (E.U., 2010b)	Alterra e RIVM, Holanda	Modelo numérico, unidimensional do comportamento do agrotóxico no sistema solo-planta.	I e II	Equações diferenciais parciais (1D)
PELMO (<i>PEsticide Leaching MOdel</i>) (E.U., 2010c)	Fraunhofer Institute for Molecular Biology and Applied Ecology, Alemanha	Modelo unidimensional que simula o movimento vertical no solo por lixiviação cromatográfica.	I e II	Modelo compartimental, equações diferenciais ordinárias.

Caracterização dos efeitos

A caracterização dos efeitos ecológicos avalia a evidência de que a exposição a um dado agrotóxico causa a resposta observada. A caracterização se inicia pela avaliação dos dados para especificar os efeitos relevantes, verificando se eles são consistentes com os *endpoints* de avaliação e se as condições em que eles ocorrem são consistentes com o modelo conceitual definido na formulação do problema. As concentrações com efeitos específicos de curto e longo prazo para as espécies de interesse podem ser expressos em termos de CE50 (concentração efetiva que afeta 50% dos indivíduos), CL50 (concentração que causa morte em 50% dos animais testados) e NOAEC (*no observed adverse effect concentration*). A Tabela 1 mostra estes parâmetros para alguns agrotóxicos.

2.1.4. Caracterização de risco

A caracterização de risco é a fase final da avaliação de risco ambiental, e integra as informações de todas as etapas anteriores, incluindo as hipóteses, incertezas e limitações da análise. O produto final inclui uma interpretação das adversidades ecológicas/ ambientais esperadas e descrições das incertezas e linhas de evidência formando as bases sobre a qual as decisões da gestão de risco podem ser feitas. A caracterização de risco tipicamente inclui dois passos: estimativa e descrição do risco (Figura 2).

Estimativa do risco

Na estimativa do risco uma abordagem determinística é feita pelo cálculo do Quociente de Risco (QR), dividindo-se as estimativas de exposição (CAE) pelos valores agudos e crônicos de ecotoxicidade ($QR = \text{exposição/toxicidade}$). Estes QRs são comparados com os níveis de preocupação (Tabela 2), que são critérios definidos pela autoridade regulamentadora. O risco potencial a organismos não-alvo pode existir quando o QR ultrapassa o nível de preocupação, o que pode requerer uma ação regulatória. O QR fornece um meio eficiente e barato de identificar situações de alto ou baixo risco, e podem permitir que as decisões de gestão de risco sejam feitas sem a necessidade de mais informações. Porém, enquanto o quociente pode ser útil para responder quando os riscos são altos ou baixos, ele

pode não ser útil para um gerenciador de risco que exige uma quantificação incremental dos riscos. Além disso, o método do quociente de risco pode não ser o mais favorável para prever efeitos secundários (USEPA, 1998). Em situações onde esta predição é desejada, utiliza-se ferramentas computacionais para conduzir uma estimativa de risco probabilística.

Tabela 2. Parâmetros para caracterização de risco para organismos aquáticos. (USEPA, 2012).

Risco suposto	Quociente de risco	Nível de preocupação
Risco agudo alto	EEC/LC ₅₀ ou EC ₅₀	0.5
Risco agudo, uso restrito	EEC/LC ₅₀ or EC ₅₀	0.1
Risco agudo, espécies	EEC/LC ₅₀ or EC ₅₀	0.05
Risco crônico	EEC/NOAEC	1.0

A estimativa de risco probabilística é desenhada de maneira a combinar grupos de informações que são expressas em termos de distribuição probabilística, o que permite uma caracterização mais completa da variabilidade e incerteza da estimativa e a determinação dos principais fatores que afetam a exposição (USEPA, 2001). Esta avaliação produz uma distribuição probabilística ou intervalos de valores ao invés de um valor fixo do risco.

Descrição do risco

A descrição do risco corresponde a uma avaliação das linhas de evidência que suportam ou refutam a(s) estimativa(s) de risco, e uma interpretação da significância dos efeitos adversos nos *endpoints* de avaliação. Quando a caracterização do risco está completa, os avaliadores de risco devem ser capazes de estimar os riscos ecológicos, indicar o grau geral de confiança dos riscos estimados, citar as linhas de evidência que suportam as estimativas de risco, e interpretar as adversidades dos efeitos ecológicos.

2.1.5 Comunicação de Risco

Na caracterização de riscos, obtêm-se a base para comunicar os riscos ecológicos para o gestor do risco e outras partes interessadas, incluindo o público. Em geral, o documento final da avaliação de risco é disponibilizado nos sites das agências governamentais. Porém, a comunicação de risco desempenho é mais efetiva se houver uma audiência para explicar os detalhes da avaliação para o público interessado. Independente do formato escolhido, é importante descrever claramente as fontes e causas de risco ecológico, o seu valor, os custos monetários e os outros custos de proteção (e falha na proteção) dos recursos naturais. O grau de confiança na avaliação de risco, a justificativa para a decisão de gestão de risco e as opções para reduzir o risco também são importantes (USEPA, 1998).

Deve-se considerar que o processo de avaliação de risco é iterativo de forma que a compreensão de determinados aspectos da avaliação em etapas mais avançadas podem levar a uma reavaliação de etapas anteriores. Assim, um conhecimento adquirido na caracterização do risco pode levar a uma revisão da formulação do problema ou ao entendimento de que são necessários dados adicionais.

2.1.6 Gerenciamento de Risco

O gerenciamento de risco engloba todas as ações tomadas para eliminar ou reduzir os riscos identificados na avaliação de risco a um nível aceitável (Spadotto *et al.*, 2010). Adicionalmente, são considerados também outros fatores, tais como questões sociais, econômicas, políticas ou legais. No gerenciamento é importante considerar o grau de confiança da avaliação de risco, a justificativa para a decisão de gestão e as opções para reduzir o risco. A escolha por uma opção e seus riscos associados, custos e benefícios depende do conjunto de opções, consequências, valores e fatos avaliados no processo de tomada de decisão. Em diferentes situações, diferentes opções, valores e informações podem ser relevantes (USEPA, 1998).

Se a caracterização do risco indicar níveis de exposição de um dado organismo como aceitáveis, a autoridade regulatória poderá ter uma decisão positiva (aprovação do produto no que tange às questões ambientais) (Figura 2). Se a caracterização de risco indicar uma exposição em níveis inaceitáveis, o gestor de

risco pode decidir não registrar o produto ou implementar ações para diminuir a exposição e a análise de risco recomeça (Figura 2). Um exemplo de ação de gestão no Brasil foi a decisão do IBAMA de restringir a aplicação por pulverização aérea dos produtos à base de imidacloprido, tiametoxam, clotianidina e fipronil (IBAMA, 2012b). Posteriormente, este uso foi autorizado apenas nas culturas de arroz, cana-de-açúcar, soja e trigo até o dia 30 de junho de 2013 (MAPA, 2012). Estudos adicionais (inclusive de campo) poderão subsidiar outras decisões de gestão, como a manutenção das condições iniciais de registro, indicação de novas restrições, ou mesmo a proibição do uso destes ingredientes ativos no país.

2.2 Impacto do uso de agrotóxicos em organismos aquáticos no Brasil

2.2.1 Estudos de avaliação de risco ambiental

O número de pesquisas conduzidas sobre o tema no Brasil cresceu nos últimos anos, porém esta ainda é uma área que requer muitos avanços devido a sua complexidade inerente e multidisciplinariedade. Neste trabalho, buscou-se fazer uma síntese das publicações mais relevantes de estudos relacionados ao ambiente aquático nos últimos 10 anos. A revisão se iniciará pela avaliação de artigos que utilizaram inicialmente modelos mais simples, seguida de modelos mais complexos (conforme descrito na análise de fases) e finalmente culminando na discussão acerca da sensibilidade de organismos aquáticos regionais em comparação a organismos padrões.

Vários estudos avaliaram o potencial de contaminação de águas superficiais e subterrâneas por agrotóxicos utilizando modelos de lixiviação e escoamento superficial no solo. A grande maioria dos modelos utilizados é considerado de triagem, que requer menor número de dados e são utilizados como estágio inicial para indicar o potencial impacto dessas substâncias no ambiente (fase 1). Os modelos baseiam-se nas propriedades físico-químicas dos agrotóxicos e do solo onde serão aplicados e, para águas subterrâneas, utilizaram os critérios de triagem da USEPA, os índices de GUS (*Groundwater Ubiquity Score*), de LIX (*Leaching Index*) e TLPI (*Temperature Leaching Index*), e fatores de retardamento (RF) e de atenuação (AF). O método de GOSS propõe critérios para avaliar o potencial de contaminação de águas superficiais pela classificação dos compostos em dois

grupos: aqueles que podem ser transportados dissolvidos em água e aqueles que são transportados associados ao sedimento em suspensão (USEPA, 2011). O Quadro 3 resume as informações e os resultados de alguns estudos conduzidos em várias regiões do país. Informação sobre o tipo de solo não foi reportada em alguns casos, tendo em vista alguns modelos de triagem se limitar as propriedades físico-químicas da substância. A maior parte utilizou somente modelos para águas subterrâneas. Dentre as classes de agrotóxicos avaliadas, os herbicidas apresentaram maior potencial de contaminação, principalmente o 2,4 D (Tabela 1). As diferenças no potencial de contaminação encontradas nos estudos para uma mesma substância são atribuídas à complexidade e características dos dados usados para avaliação. Por exemplo, no estudo conduzido no Baixo Jaguaribe/CE, o cletodim, glifosato, mesotriona e parationa metílica foram classificados como contaminantes potenciais pelo método de triagem da EPA e com potencial de lixiviação nulo pelo índice de GUS (Milhome *et al.*, 2009).

Quadro 3. Estudos que avaliaram o potencial de contaminação de águas superficiais e subterrâneas por agrotóxicos utilizando modelos de lixiviação

Região	Agrotóxicos avaliados	Modelo: agrotóxicos com potencial de contaminação
Baixo Jaguaribe/CE (Milhome <i>et al.</i> , 2009)	Abamectina, acefato, acetamiprido, atrazina, azostroquina, carbosulfano, cartap, cipermetrina, cletodim, clorotanolil, clorpirifós, 2,4 D, difenoconazol, endossulfan, esfenvalato, espinosade, fenitrothion, fenprotrina, glifosato, imidacloprido, lambda cialotrina, lufenuron, mancozebe, mesotriona, metamidofós, metolaclo, metomil, nicosulfuron, paraquate, parationa metílica, piraclostroquina, piriproxim, propiconazole, teflubenzuron, tiametoxam, triazofós, trifloxistroquina.	<u>Águas subterrâneas</u> Triagem USEPA: atrazina, azostroquina, cletodim, 2,4-D, difenoconazol, metolaclo, nicosulfuron, paraquate, parationa metílica, propiconazole, tiametoxam, triazofós. Índice de GUS: azoxistroquina, 2,4-D, metamidofós, propiconazole e triazofós <u>Águas superficiais; método de GOSS</u> - Associado ao sedimento: alto potencial para cipermetrina, clorpirifós, difenoconazol, endossulfan, esfenvalato, paraquate, propiconazole e teflubenzuron - Pelo transporte em água: alto potencial para atrazina, azoxistroquina, clorpirifós, difenoconazole, paraquate, propiconazole, fenitrothion, imidacloprido, lambda-cialotrina, metolaclo, parationa metílica, tiametoxam, triazofós)
Tianguá/ CE (Canuto <i>et al.</i> ,	Atrazina, simazina e parationa metílica	<u>Águas subterrâneas</u> ; índice de GUS: atrazina e simazina.

Região	Agrotóxicos avaliados	Modelo: agrotóxicos com potencial de contaminação
2011)		<u>Águas superficiais</u> ; método de GOSS - Associado ao sedimento: potencial médio para as três substâncias. - Pelo transporte em água: alto potencial para atrazina e simazina.
Rio Poxim/ SE (Britto <i>et al.</i> , 2012)	Metribuzim, diuron, ametrina, atrazina, glifosato, Paraquate, hexazinona, trifloxissulfurom-sódico, halossulfurom-metílico, oxifluorfem, 2,4-D, picloram, MSMA, imazapir.	<u>Águas subterrâneas</u> Triagem USEPA: metribuzim e diuron Índice de GUS: metribuzim, diuron, atrazina, hexazinona, trifloxissulfurom-sódico, halossulfurom-metílico, 2,4-D, picloram e imazapir. <u>Águas superficiais</u> ; método de GOSS): - Associado ao sedimento: alto potencial para paraquate, glifosato, e MSMA - Pelo transporte em água: alto potencial para metribuzim, diuron, ametrina, atrazina, glifosato, paraquate, hexazinona, trifloxissulfurom-sódico, halossulfurom-metílico, diuron e glifosato
Dom Aquino/ MT (Mariot <i>et al.</i> , 2010)	Endossulfam, carbendazim, clorpirifós, diuron, metolocloro.	<u>Águas subterrâneas</u> Índice de LIX: diuron e metalocloro
São Gabriel do Oeste /MS (Barbosa <i>et al.</i> , 2011)	2,4-D, acifluorfen-sódico, alacloro, atrazina, bentazona, butoxidim, clorimuron-etílico, clomazona, cianazine, diclosulam, dimethenamid, diquat, fenoxaprop, fluazifop-p-butílico, flumetsulam, flumiclorac-pentílico, fomesafen, haloxifope, imazaquin, imazetapir, lactofen, linuron, metolacoloro, metribuzin, paraquate, pendimetalina, picloram, setoxidim, sulfentrazona, simazina e trifluralina.	<u>Águas subterrâneas</u> ; Índice de LIX: 13 agrotóxicos com alto potencial de lixiviação - Sulfentrazona, imazetapir, picloram, flumetsulam, fomesafen, atrazina, metribuzin, imazaquin, bentazona, 2,4-D, simazina, metolacoloro, clorimuron-etílico.
São Gabriel do Oeste/ MS (Coutinho <i>et al.</i> , 2008)	5 agrotóxicos: atrazina, diclosulam, fomesafen, imazetapir e sulfentrazona.	<u>Águas subterrâneas</u> ; modelo TLPI: imazetapir e sulfentrazona
Manhaçu/ MG (Soares <i>et al.</i> ,	280 produtos (estudo não especifica os	<u>Águas subterrâneas</u> ; índice de GUS: picloram, tiametoxam, ciproconazol e

Região	Agrotóxicos avaliados	Modelo: agrotóxicos com potencial de contaminação
2012)	ingredientes ativos)	flutriafol <u>Águas superficiais</u> ; método de GOSS: endossulfam, clorpirifós, epoxiconazole e diurom
Araraquara/ SP (Lourencetti <i>et al.</i> , 2005)	2,4-D, alacloro, atrazina, clomazona, fluazifop-p-butílico, metribuzim, picloram, simazina, etrifluralina.	<u>Águas subterrâneas</u> : Triagem da USEPA: 2,4-D, alaclor, atrazina, clomazona e metribuzim. Índice de GUS: atrazina, metribuzim, simazina Índice de LIX: 2,4-D, atrazina, metribuzim, simazina TLPI: atrazina, metribuzim e simazina AF e RF: todos com potencial nulo ou baixo de lixiviação.
Bacia do Rio Pardo/SP (De Campos <i>et al.</i> , 2012)	Atrazina, diuron, tebutiuron e hexazinona.	<u>Águas subterrâneas</u> ; índice de LIX: atrazina, diuron, tebutiuron e hexazinona.
Itajaí/ SC (de Carvalho <i>et al.</i> , 2007)	104 agrotóxicos de diferentes classes, incluindo 2,4-D, organofosforados, piretróides, carbamatos, triazóis, ditiocarbamatos, óxido de cobre e <i>Bacillus Thuringiensis</i>	<u>Águas subterrâneas</u> ; índice de Lix e índice de GUS: Com maior potencial: 2,4-D, iodosulfurom, cletodim, picloram, quincloraque, acefato, dimetoato, carbofurano, imidaclopride, fenitrotiom.

A espacialização de informações relativas à aplicação de modelos que integram o potencial de contaminação com a identificação de áreas de risco pode fornecer subsídios para tomadas de decisões mais rápidas e mais eficientes. No estudo conduzido em São Gabriel do Oeste/ MS (Quadro 3), a ferramenta ArcView 3.2 (ESRI) foi utilizada para espacializar as áreas de aplicação dos compostos que representavam os maiores riscos de contaminação de águas subterrâneas a partir do modelo TLPI (Coutinho *et al.*, 2008). Outros autores utilizaram estes mapas para representar classes de risco a partir dos resultados obtidos com a aplicação do modelo LIX (de Campos *et al.*, 2012)

Modelos para avaliar o risco ambiental de agrotóxicos também têm sido desenvolvidos no Brasil. O ACHA (Avaliação da Contaminação Hídrica por Agrotóxico) é uma ferramenta computacional para simulação da lixiviação de agrotóxicos em cenários agrícolas brasileiros (Scorza Junior *et al.*, 2010). Esta

ferramenta é capaz de simular perfis de umidade do solo e concentração do agrotóxico em função do tempo, porém ainda precisa ser validada. Outro grupo desenvolveu o sistema computacional ARAquá, baseado em um modelo matemático que estima a concentração do agrotóxico em águas subterrâneas considerando as condições edafoclimáticas brasileiras (Spadotto *et al.*, 2009). Este sistema foi utilizado em estudo conduzido na Bacia do Rio Pardo (SP) para o herbicida tebutiuron em diferentes lâminas de irrigação (0, 200 e 400 mm). Os mapas das estimativas de concentração do herbicida na água subterrânea feitas por krigagem, um método de regressão usado em geoestatística, indicaram concentrações abaixo do valor para o padrão de potabilidade (500 µg/L)(De Campos Moraes, Zimback e Spadotto, 2012). O IBAMA utiliza na avaliação de risco ambiental (fase I) o modelo ARAquá para água superficial (adjacente) e subterrânea, além do GENEEC (Quadro 2) para água superficial e SCI-GROW (*Triagem Concentration in GROUND Water*) para água subterrânea (IBAMA, 2012a).

Outros estudos no Brasil utilizaram modelos de avaliação mais complexos, alguns deles mostrados no Quadro 2. Num estudo conduzido na Bacia do Rio Dourados (MS), o simulador PEARL foi utilizado para avaliar a lixiviação dos principais agrotóxicos usados na região e identificar áreas com maior vulnerabilidade à contaminação de águas subterrâneas. Os agrotóxicos que apresentaram maior potencial de contaminação foram bentazona, imazetapir, fomesafen, 2,4-D, metamidofós, imazaquin, tiodicarbe e monocrotofós. O solo argissolo mostrou-se mais vulnerável à contaminação das águas subterrâneas quando comparado ao latossolo (Scorza Junior, 2006).

Outro estudo também utilizando o modelo PEARL avaliou o potencial de lixiviação do inseticida tiametoxam em solo na cultura de soja em Dourados (MS) no período de novembro de 2007 a abril de 2008 (Spadotto *et al.*, 2010). Como primeira alternativa de calibração do modelo usou-se os valores de meia-vida do tiametoxam utilizando-se as concentrações totais no perfil do solo conforme as datas de amostragem. Esse procedimento resultou em decréscimo no valor de meia-vida, que foi satisfatório para descrever a rápida dissipação desse agrotóxico logo após a aplicação, porém não foi coerente para descrever a taxa de degradação do tiametoxam observada no campo para as outras datas de amostragem. A alternativa encontrada foi assumir uma menor dose aplicada para compensar a rápida

dissipação, possivelmente devido à volatilização do produto, a qual não é prevista no modelo.

A lixiviação do tiametoxam também foi testada pelo simulador MACRO em duas classes de solo brasileiro, latossolo vermelho acriférrico típico (LVwf) e argissolo vermelho-amarelo distrófico típico (PVAd) (Castro *et al.*, 2007). As simulações foram comparadas a dados experimentais de lixiviação em lisímetro durante duas estações chuvosas. Houve uma superestimação da lixiviação para a profundidade de 0,45 m do LVwf entre 150 e 250 dias após a aplicação do produto (período seco) como consequência do maior fluxo de água simulado. O potencial de lixiviação foi subestimado para a profundidade de 0,9 m para os dois solos no primeiro período de chuva. De uma maneira geral, o desempenho do MACRO foi considerado satisfatório para os cenários avaliados.

Uma comparação entre as performances dos simuladores PEARL e MACRO foi conduzida com endossulfam e tiametoxam em Ponta Porã (MS), numa região de solo latossolo vermelho distrófico típico, de textura média (Scorza Junior, Rigitano e Franco, 2010). As amostras de solo foram coletadas entre 0 e 100 cm e de 0 a 125 dias após a aplicação do produto. Os simuladores indicaram a presença de endossulfam entre 0-20 cm de profundidade, enquanto que experimentalmente o composto estava presente somente até 10 cm de profundidade. O simulador PEARL superestimou a lixiviação do tiametoxam em todas as datas de amostragem, com picos de concentração em profundidades maiores que as observadas.

Os estudos relatados anteriormente avaliaram o potencial de contaminação dos recursos hídricos por agrotóxicos sem levar em conta o possível dano aos organismos aquáticos, como algas, peixes e microcrustáceos. Modelos de triagem como GENNEC e o SCIGROW para águas superficiais e subterrâneas, respectivamente, foram utilizados para avaliar os potenciais de sorção, lixiviação e dissipação de um herbicida em desenvolvimento da classe da sulfonamida-triazopirimidinas em quatro solos brasileiros. Os resultados obtidos foram comparados com os valores limites de EC_{50} e de NOEC para organismos representantes dos compartimentos ambientais com a concentração ambientalmente estimada (CAE). Apesar do herbicida inicialmente ter apresentado elevada toxicidade para algas, nenhum risco foi encontrado se o mesmo for usado de acordo com as recomendações do rótulo. Para *Daphnia magna*, o herbicida apresentou baixa toxicidade aguda e nenhum risco foi identificado. A mesma conclusão foi

encontrada na avaliação com resultados de estudos agudos e crônicos para peixes (PINTO, 2010).

Outro estudo avaliou os resíduos do herbicida quincloraque e seus efeitos sobre a comunidade de plâncton em sete bacias do estado de Santa Catarina, onde o arroz irrigado é cultivado, (Resgalla *et al.*, 2007). A análise de risco mais conservadora (usando o método determinístico) indicou efeitos nocivos do quincloraque sobre a comunidade de produtores primários, mas o método probabilístico não indicou situações de risco significativo, de acordo com o modelo de decisão recomendada pela USEPA (USEPA, 1999).

2.3 O modelo PRZM (*Pesticide Root Zone Model*)

O PRZM versão 3.12.3 é um modelo unidimensional, finito que avalia os agrotóxicos na zona radicular da cultura (Suárez, 2005). A versão PRZM 3.12.3 é a mais recente, e inclui a possibilidade de simular a temperatura do solo, volatilização e transporte na fase de vapor do solo, simulação de irrigação e transformação microbiana (Figura 4).

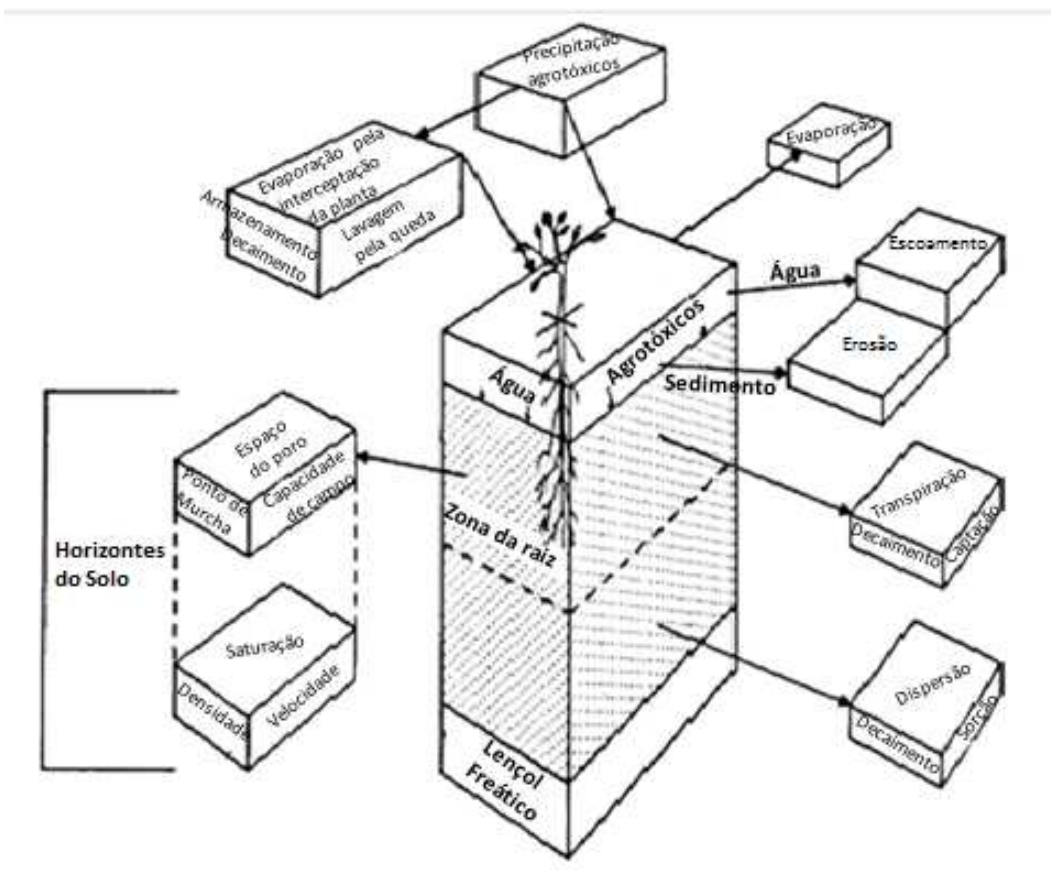


Figura 4. Componentes do PRZM. Fonte: Suárez (2005)

O PRZM possui dois componentes principais: hidrologia e transporte químico. O modelo usa o algoritmo do Método das Características (MOC) para eliminar a dispersão numérica e é capaz de simular o transporte e a transformação de um composto e até dois produtos de degradação. O modelo trabalha na linguagem DOS, é gratuito e está disponível para download do site da USEPA, junto com manual de uso e histórico de desenvolvimento. As predições realizadas pelo PRZM são feitas em bases diárias, mas os dados de saída podem ser sumarizados para períodos diários, mensais e anuais.

2.3.1 Componente hidrológico

O componente hidrológico do PRZM é usado para calcular o escoamento superficial e a erosão do solo, baseado no método empírico do número da curva, desenvolvido pelo Serviço de Conservação de Solos dos Estados Unidos, e a equação universal da perda de solo. A evapotranspiração é dividida entre a evaporação por interceptação da cultura, evaporação do solo e transpiração da cultura. O movimento da água é simulado pelo uso de parâmetros do solo generalizados como capacidade de campo, ponto de murcha e saturação do conteúdo de água (Suárez, 2005)

Os cálculos hidráulicos e hidrológicos são realizados no PRZM considerando a unidade de tempo diária, ainda que, para alguns dos processos envolvidos (evaporação, escoamento superficial e erosão) poderia ser utilizada uma unidade de tempo mais refinada para garantir maior realismo e precisão (Suárez, 2005).

A adição na versão atual de algoritmos para simular a volatilização foi um ganho para diminuir outra limitação, a representação hidráulica do solo. Anteriormente o PRZM apenas simulava o movimento advectivo para baixo da água e não levava em conta o movimento difusivo devido à presença de gradientes de água no solo. Isso quer dizer que o PRZM era incapaz de simular o movimento ascendente da água em resposta a gradientes induzidos pela evapotranspiração.

2.3.2 Componente de transporte químico

O componente de transporte químico do PRZM pode simular a aplicação de agrotóxicos orgânicos ou inorgânicos sobre o solo ou sobre a folhagem da planta (Suárez, 2005). A biodegradação pode ser modelada na zona da raiz. As concentrações no solo, dissolvidas, absorvidas e em fase de vapor são estimadas simultaneamente considerando os processos de captação dos agrotóxicos pela planta, escoamento superficial e erosão, decaimento/transformação, volatilização, lavagem foliar, advecção, dispersão e retardação/sorção (Figura 5). Para o nitrogênio, podem ser simuladas aplicações de superfície, deposição atmosférica e descarga de efluentes sépticos. Os processos incluem a absorção de nitrato e amônia do solo pelas plantas, a formação nas plantas de nitrogênio orgânico, denitrificação ou redução do nitrato-nitrito, imobilização do nitrato-nitrito e amônia, mineralização do nitrogênio orgânico, fixação do nitrogênio atmosférico, volatilização da amônia e adsorção/ dessorção da amônia e suas formas orgânicas (Suárez, 2005).

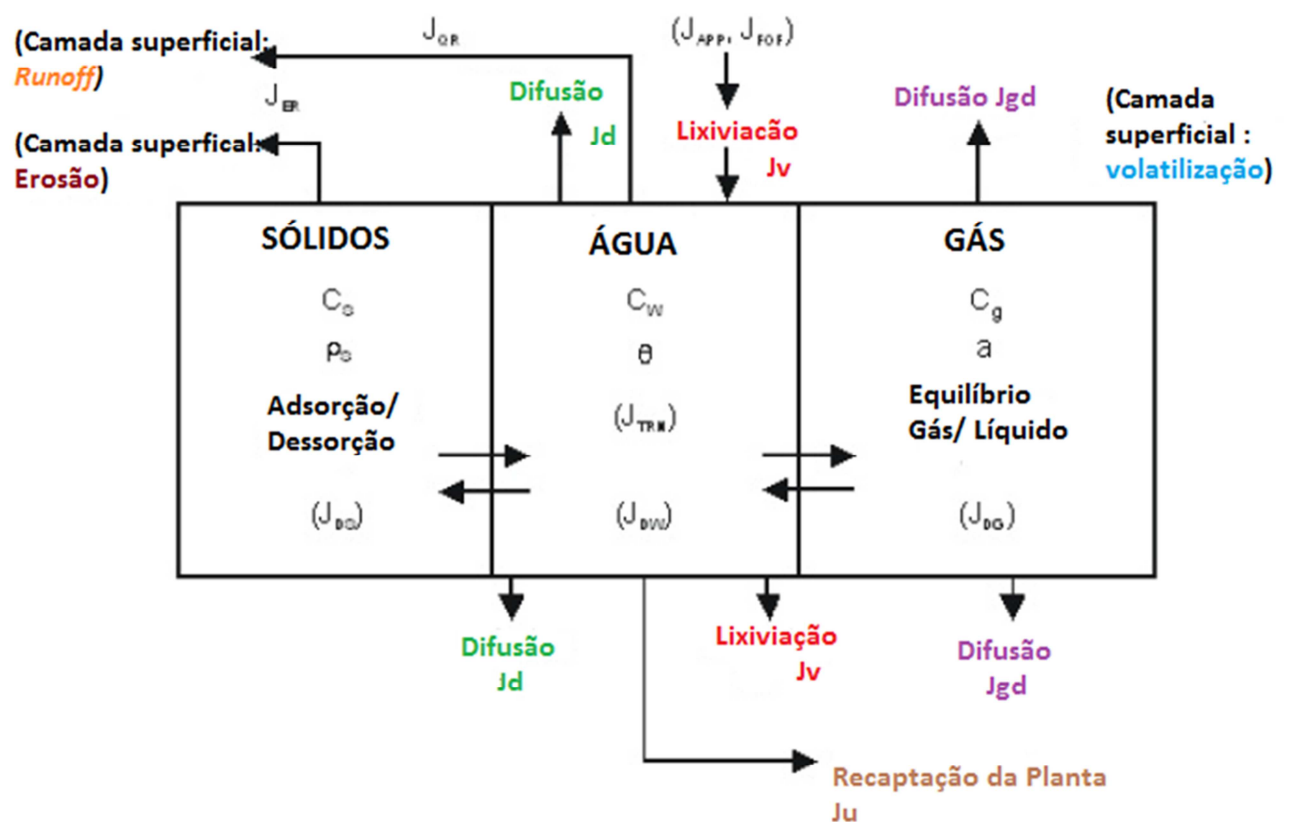


Figura 5. Equilíbrio de massa para as camadas superficiais e para as zonas sub-superficiais do modelo PRZM. Fonte: Suárez (2005).

Existem duas opções disponíveis para resolver as equações de transporte: pelo esquema de diferenças regressivas completamente implícitas, que pode produzir uma excessiva dispersão numérica pelos elevados números de Péclet, ou pelo Método das Características (MOC), que elimina a dispersão numérica, porém aumenta ligeiramente o tempo de execução do modelo.

Uma limitação da primeira versão do modelo era a aparente inadequação da equação de transporte de soluções em sistemas predominantemente advectivos. As diferenças na formulação dos termos de advecção tende a produzir um alto grau de dispersão numérica que resultam em uma superestimava das cargas da substância em águas subterrâneas. Para solucionar estes problemas, os termos advectivos foram desacoplados do resto da equação e resolvidos separadamente usando o MOC. O restante da equação é resolvido como anteriormente, usando o esquema implícito completo. Esta solução diminui a dispersão numérica e é responsável apenas por um pequeno incremento no tempo de análise computacional. Em sistemas com baixa advecção o uso do MOC reduz o esquema de solução original do PRZM que chega a velocidades próximas a zero (Suárez, 2005).

Código VADOFT

Na primeira versão do PRZM, o sistema hidráulico do solo era simples, a drenagem da água do campo era assumida para ocorrer em 1 dia. Na versão atual, o usuário passou a ter a alternativa de acoplamento do PRZM com o módulo VADOFT. O Módulo VADOFT é unidimensional, possui código de elementos finitos que resolve a equação de Richards (eq.1) que governa o escoamento da água em solos não saturado.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] \quad \text{eq-1}$$

Onde $K(\theta)$ refere-se à condutividade hidráulica (cm sec^{-1}) e θ o conteúdo de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

O PRZM é usado para representar a zona da raiz, enquanto o VADOFT, com uma representação mais rigorosa do fluxo insaturado, é usado para simular a zona vadosa (porção superficial do material geológico, situada entre a superfície do

terreno e o topo do aquífero; os poros estão ocupados pela água nas fases líquida e gasosa) como representado na Figura 6. Em distâncias curtas da superfície do solo para o lençol de água, o PRZM pode ser utilizado para representar a zona vadosa inteira sem necessitar do uso de VADOFT, desde que nenhuma camada que restrinja a drenagem esteja presente (Suárez, 2005).

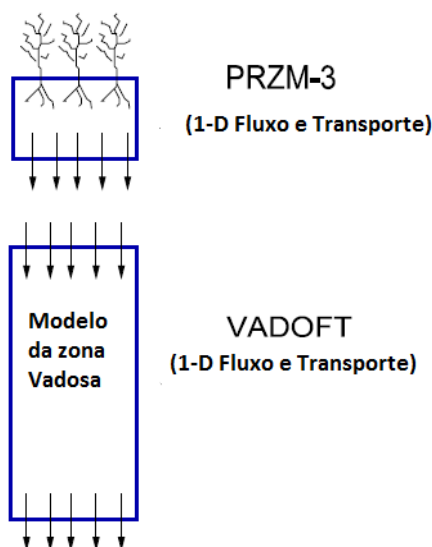


Figura 6. Configuração do sistema de ligação PRZM e VADOFT. Fonte: Suárez (2005)

O PRZM é capaz de simular múltiplas zonas, já que códigos do VADOFT estão ligados entre si com o auxílio de um supervisor de execução flexível, que permite ao usuário criar modelos de carga adaptadas às situações específicas do local do usuário.

Considerando os aspectos temporais, o PRZM é executado em uma unidade de tempo diária enquanto o VADOFT é dependente das propriedades dos solos e da magnitude do fluxo de água introduzido no topo da coluna. Para execução da equação de Richards, o VADOFT requer às vezes espaços de tempo na ordem de minutos. Assim para ligar o PRZM ao VADOFT, o VADOFT simula um valor de tempo marcador especificamente para o fim do dia. Os fluxos diários de água do PRZM são usados como dados de entrada e o VADOFT considera este fluxo como constante durante o dia e ajusta seu passo de tempo computacional interno de forma a convergir (Suárez, 2005).

Outro problema é a incompatibilidade entre o sistema hidráulico do PRZM e do VADOFT. Enquanto o VADOFT usa a equação de Richards para um fluxo de

água em um meio variavelmente saturado, o PRZM usa regras simples de drenagem para a infiltração da água através do perfil do solo. Devido a esta incompatibilidade, por vezes o PRZM produz muita água para o VADOFT acomodar em único dia, principalmente em solos agrícolas onde subsolos são tipicamente de menor permeabilidade do que a zona da raiz. Como consequência, a água presente na interface entre as camadas de solo nem seria do PRZM nem do VADOFT. A solução para este problema foi prescrever o fluxo do PRZM de modo que o VADOFT acomoda todo o débito de água por cada dia. Entretanto, esta alternativa força a presença de mais água na zona vadosa do que realmente pode acontecer em um sistema real para o mesmo conjunto de propriedades do solo e condições meteorológicas. A consequência é que água e soluto são forçados a se mover em uma velocidade mais elevada na porção superior da zona vadosa. Se a zona vadosa é profunda, isto provavelmente tem pouco impacto sobre a solução. Porém, se a zona for superficial pode ocorrer uma superestimativa de cargas para zonas subterrâneas, especialmente se as taxas de degradação química são mais baixas na zona vadosa do que na zona da raiz.

O PRZM-3 pode ser executado no modo Monte Carlo, de forma que as estimativas probabilísticas da carga de agrotóxicos para as zonas saturadas da área de origem podem ser feitas. O pré-processador de entrada permite ao usuário selecionar as distribuições para os parâmetros chave a partir de uma variedade de distribuições estatísticas. O processador Monte Carlo lê os dados dos conjuntos de entrada determinísticos para cada modelo e em seguida lê um arquivo de entrada que especifica os parâmetros autorizados a variar, suas distribuições, os parâmetros de distribuição e a matriz de correlação. O modelo então executa um número pré-especificado de simulações. O processador de saída é capaz de preparar as estatísticas das variáveis de saída especificadas, incluindo valores médios, máximos e quantis de distribuição. O processador de saída também pode tabular a frequência cumulativa em histogramas das variáveis de saída. A maior limitação deste módulo é que apenas um pequeno número de variáveis de entrada pode ser alterado de forma aleatória, invocando as rotinas de Monte Carlo. No entanto, não é difícil colocar variáveis adicionais.

Arquivos de entrada do PRZM

Arquivo Supervisor de Execução (PRZM3.RUN): determina quais módulos são escolhidos para a simulação, o número de zonas usadas em uma simulação, os nomes dos arquivos de entrada, saída e zero com instruções de caminho opcionais, a data de início e término de uma simulação, o número de produtos químicos, parâmetros de ponderação entre o PRZM e VADOFT e níveis de rastreamento durante a execução.

Arquivo de entrada de Parâmetros (PRZM): especifica as informações regionais climatológicas, hidrológicas e os parâmetros de erosão, as características da planta, incluindo datas de emergência e colheita, propriedades dos agrotóxicos e taxas de aplicação e características do solo.

Arquivos de Série Temporal: incluem os dados meteorológicos, deposição atmosférica de nitrogênio, e dados de efluentes sépticos. Apenas o arquivo de dados meteorológicos é necessário para todas as corridas PRZM. Informações sobre a precipitação diária, evaporação, temperatura, velocidade do vento e radiação solar estão incluídos em cada registro do arquivo meteorológico (Suárez, 2005). Tais informações são importantes, pois elas afetam diretamente a persistência, a tendência à movimentação e a estabilidade dos agrotóxicos no meio ambiente. Por exemplo, a temperatura e, principalmente, a umidade relativa do ar contribuem para a evaporação rápida das gotas. A presença de vento no momento da aplicação pode ocasionar a deriva do agrotóxico. No entanto, ausência de vento também pode ser prejudicial, pois as gotas muito finas podem ficar suspensas no ar devido à estabilidade atmosférica, dispersando-se até vários quilômetros do local de aplicação, sendo, muitas vezes, somente removidas da atmosfera pela ação da chuva (Spadotto, 2006).

Arquivo de entrada do Parâmetro VADOFT: contém o horizonte do solo e as propriedades químicas. Para tanto, é necessário que VADOFT esteja especificado como ON no arquivo supervisor de execução (PRZM3.RUN).

Arquivo de entrada Monte Carlo: necessário quando Monte Carlo estiver especificado como ON no arquivo supervisor de execução. O arquivo indica parâmetros de entrada, distribuições e correlações (Suárez, 2005).

3. OBJETIVOS

Geral

Desenvolver uma plataforma de dados para avaliação de risco ambiental a agrotóxicos no Brasil usando o *Pesticide Root Zone Model* (PRZM).

Específicos:

- Coletar dados de estações meteorológicas brasileiras de um período de 10 anos.
- Coletar dados de área cultivada das principais culturas no Brasil.
- Desenvolver uma plataforma de dados, a partir do *Express 1.03.02*, para conduzir avaliação de risco ambiental no Brasil usando o modelo *Pesticide Root Zone Model* (PRZM).
- Coletar informações relativas às características fenológicas da soja no Brasil e características dos solos onde a soja é cultivada.
- Comparar os resultados obtidos no PRZM para o cenário brasileiro e para o cenário americano padrão.

4. MÉTODOS

4.1 Banco de dados meteorológicos

Os dados necessários para o modelo PRZM 3.12.3 são: evaporação total diária, nebulosidade média diária, precipitação total diária, pressão atmosférica média diária, temperatura do ar média diária, temperatura do ar média anual, velocidade do vento média diária, velocidade do vento média anual, direção do vento predominante, aerossol e evapotranspiração FAO (ETO). Sendo que destas informações as consideradas essenciais para rodar o modelo PRZM são os dados de precipitação e temperatura.

Os dados foram obtidos da Coordenação Geral de Agrometeorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgão do MAPA representante nacional na Organização Meteorológica Mundial, responsável pelo estabelecimento, coordenação e operação das redes de observações meteorológicas e de transmissão de dados meteorológicos no Brasil, inclusive aquelas integradas à rede internacional (Vieira e Piculli, 2010). Foram fornecidas informações relativas a 289 estações climatológicas do INMET obtidas no período de 2002 e 2011 (o programa exige a entrada de dados relativos ao período mínimo de dez anos).

Cada planilha de dados trouxe a identificação da estação meteorológica, coordenada geográfica e altitude. Alguns campos das planilhas não estavam preenchidos devido a avarias nos equipamentos e/ou falhas de registro resultante da falta de observador. Os dados inexistentes foram identificados com a palavra “NULL”. As unidades fornecidas para alguns parâmetros eram distintas das usadas no modelo, sendo transformadas segundo a Tabela 3.

Tabela 3. Conversão de unidades de parâmetros meteorológicos

Parâmetro	Unidade Inicial	Unidade Final	Fator de Conversão
Vento (velocidade média diária)	m/s	cm/s	x 100
Radiação	MJ/m ²	Langley/dia	x 23,88
Pressão atmosférica média diária	hPa	kPa	x 0,1

Os dados relativos à direção dos ventos foram apresentados em planilhas separadas com medição da direção do vento obedecendo a um código numérico (0, 2, 5, 7, 9, 11, 14, 16, 18, 20). A medição da direção do vento foi feita em três horários (0:00, 12:00 e 18:00), e os dados foram convertidos para graus (Tabela 4).

Tabela 4 . Conversão de unidades direção dos ventos

Legenda da Direção do Vento a partir do código numérico do INMET			Graus
0	Calmo	C*	0
2	Norte - Nordeste	NNE	22,5
5	Nordeste	NE	45
7	Este - Nordeste	ENE	67,5
9	Leste	E	90
11	Este - Sudeste	ESE	112,5
14	Sudeste	SE*	135
16	Sul - Sudeste	SSE	157,5
18	Sul	S	180
20	Sul - Sudoeste	SSW	202,5
23	Sudoeste	SW	225
25	Oeste - Sudoeste	WSW	247,5
27	Oeste	W	270
29	Oeste - Noroeste	WNW	292,5
32	Noroeste	NW	315
34	Norte - Noroeste	NNW	337,5
36	Norte	N	0

Foi usado no resultado final de direção do vento predominante o dado do horário em que foi identificada maior presença de vento com maior número de medições (em alguns casos a coluna com maior presença de vento tinha várias falhas de medições e por esta razão foi substituída), visto que esta é uma situação que representa um cenário de pior caso.

Algumas estações tiveram períodos em que não foi feita a medição ou apresentaram por outro motivo ausência de dados. Nos casos de ausência dos

dados de temperatura e precipitação em quantidade superior a 30% estas estações foram excluídas do estudo. Nos casos em que as estações apresentaram ausência superior a 30% dos dados para mais de três parâmetros as estações foram igualmente excluídas do estudo.

Algumas estações apresentaram para um parâmetro específico ausência superior a 30%. Neste caso o dado daquele parâmetro foi substituído pelo dado da estação mais próxima. Para tanto foi usada a ferramenta de tabela de proximidade do programa ARCGIS 10 que calculou a menor distância (km) entre a estação com ausência do dado e a estação com os dados completos para o parâmetro estudado.

Nos casos de ausência de dados inferiores a percentual de 30% os dados foram estimados. Para uma estimativa mais adequada foram usados diferentes critérios conforme o caso em questão:

1 - No caso de um dado ausente, porém com presença de pelo menos dois dados ou anteriores ou posteriores foi calculada a média dos dados presentes (podendo ser de até quatro dados);

2- Caso a condição anterior não fosse atendida foi feito o cálculo considerando a média dos 15 dias anteriores e os 15 dias posteriores;

3- Se o dado ausente estivesse presente nos 15 primeiros ou 15 últimos dados da planilha adotou-se a média dos 30 dias posteriores ou anteriores respectivamente;

4 – No caso de referências circulares pelo fato de os dados requeridos para o cálculo da média também estarem ausentes adotou-se a média de 60 dias.

Dados de radiação, evapotranspiração de referência e aerossol não estavam disponíveis no banco de dados da Instituição. Os dados de aerossol foram coletados na base de dados obtida através da *Aerosol Robotic Network* (AERONET), uma rede de fotômetros solares que medem concentrações de aerossóis atmosféricos por radiômetros instalados pelo mundo. A AERONET é mantida pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e disponibilizada por outras instituições de pesquisa (Haag, 2012). Como dados diários para todas as estações não estavam disponíveis, repetiu-se para cada dia do mês o dado mensal, e na ausência de dados para a estação meteorológica específica usou-se os dados da estação meteorológica mais próxima.

A evapotranspiração é definida como o processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera por evaporação da água do solo e da vegetação úmida e por transpiração das plantas. A evapotranspiração de referência (ET_o) corresponde a taxa de evapotranspiração para uma superfície de referência, uma cobertura gramada de altura uniforme entre 8 e 15 cm, em crescimento ativo, sem restrição hídrica e área de bordadura. Neste caso a evapotranspiração depende apenas das variáveis meteorológicas (Allen *et al.*, 1998).

Dentre os diversos modelos existentes para estimativa da ET_o, o modelo conhecido por Penman-Monteith (Monteith, 1965) é considerado padrão (De Sousa, 2012) (Eq. 2) Este modelo usa parâmetros específicos conforme estabelecido na Figura 7.

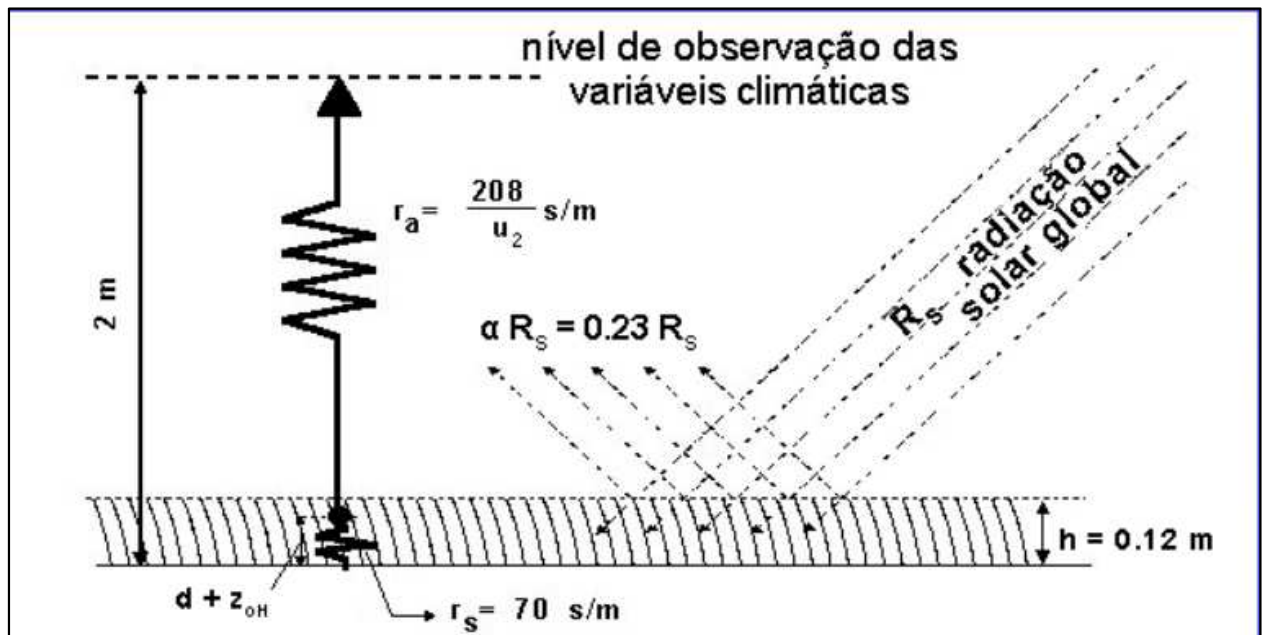


Figura 7. Condições específicas para evapotranspiração. Fonte: Allen *et al.* (1998).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Eq- 2

Onde:

ET_o – evapotranspiração de referência, mm dia⁻¹

Δ - declinação da curva de pressão de saturação kPa°C⁻¹

R_n – saldo de radiação a superfície, MJ m⁻² dia⁻¹

G – fluxo de calor no solo, MJ m⁻² dia⁻¹

γ - constante psicrométrica, kPa°C⁻¹

T – temperatura média a 2,00 m de altura, °C

U2 – velocidade do vento a 2,00 m de altura, m s⁻¹

es – pressão de saturação de vapor, Kpa

ea – pressão de vapor natural do ar, Kpa

Os dados fornecidos pelo INMET de latitude, altitude da estação (m), pressão atmosférica, data da medição, temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura média, umidade relativa, nebulosidade, insolação e velocidade do vento foram utilizados para estimar as variáveis utilizadas na equação 3.

Determinação da pressão local P (kPa), onde z = altitude local, m (Eq. 3)

$$P = 101.3 \cdot \left(\frac{293 - 0.0065 \cdot z}{293} \right)^{5.26}$$

Eq. 3

Constante psicrométrica do ar (γ), em kPa°C⁻¹ (Eq. 4)

$$\gamma = \frac{C_p}{\epsilon \cdot \lambda} \cdot P$$

Eq. 4

onde,

C_p – calor específico do ar seco a pressão constante, 1,013 x 10⁻³ MJ kg⁻¹°C⁻¹

ε – razão entre o peso molecular do vapor de água pelo ar seco, 0,622

λ – calor latente de vaporização, 2,45 MJ kg⁻¹

Pressão de saturação de vapor a dada temperatura (e⁰), em kPa (Eq. 5)

$$e^0(T_i) = 0,6108 \cdot \exp \left(\frac{17,27 \cdot T_i}{(T_i + 237,3)} \right)$$

Eq. 5

onde,

T_i – temperatura do ar (média), °C (Para o cálculo da ETo calcula-se e^0 a temperatura máxima, mínima e média)

Pressão de saturação do vapor (e_s) (Eq. 6) e pressão de vapor atual do ar (e_a) (Eq. 7) em kPa, respectivamente.

$$e_s = \frac{e^0(T_M) - e^0(T_m)}{2}$$

Eq. 6

$$e_a = e^0(T) \cdot \frac{UR}{100}$$

Eq. 7

onde,

$e^0(T_M)$, $e^0(T_m)$ e $e^0(T)$ – pressão de saturação de vapor a temperatura máxima, mínima e média, respectivamente, kPa

UR – umidade relativa do ar, %

Dia Juliano (J) foi utilizada a Eq. 8, a qual obedeceu a três critérios:

$$J^* = \left\{ \left(\text{inteiro} \left[\frac{275 \cdot M - 30 + D}{9} \right] \right) - 2 \right\}$$

$$J = J^* + 2 \quad \text{quando, } M < 3$$

$$J = J^* + 1 \quad \text{quando, } M \geq 3 \text{ para anos bissextos}$$

$$J = J^* \quad \text{quando, } M \geq 3 \text{ para anos normais}$$

Eq. 8

$$J = J^* + 2 \quad \text{quando, } M < 3$$

$$J = J^* + 1 \quad \text{quando, } M \geq 3 \text{ para anos bissextos}$$

$$J = J^* \quad \text{quando, } M \geq 3 \text{ para anos normais}$$

onde,

J^* – primeira estimativa do dia Juliano, adimensional

M – mês do ano

D – dia do ano

Declinação do sol (δ), em rad (Eq. 9)

$$\delta = 0,409 \cdot \left[\sin \frac{2 \pi \cdot J}{365} \right] - 1.39$$

Eq. 9

Distância relativa inversa terra-sol (dr) e ângulo de horário (ângulo da radiação do sol) (ω_s), ambos expressos em rad (Eq. 10 e 11)

$$dr = 1 + 0,033 \cdot \cos \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot J}{365} \right]$$

Eq. 10

$$\omega_s = \cos^{-1} [-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta)]$$

Eq.11

onde,

ϕ = latitude local, rad

Latitude local em rad (Eq. 12):

$$\phi = \frac{\pi \cdot \text{Latitude}}{180}$$

Eq.12

Determinação do fotoperíodo, h (Eq. 13), onde ω_s = ângulo horário do sol.

$$N = \frac{24}{\pi} \cdot \omega_s$$

Eq. 13

As variáveis radiação solar extraterrestre (R_a), radiação solar global (R_s), saldo de radiação solar de ondas curtas (R_{ns}), radiação solar em dias sem nuvens (R_{So}), saldo de radiação a superfície, em $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ estão calculadas segundo as equações 14-19.

$$Ra = \frac{24 \cdot 60}{\pi} \cdot Gsc \cdot dr [\omega s \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega s)] \quad \text{Eq. 14}$$

$$Rs = \left(as + bs \cdot \frac{n}{N} \right) Ra \quad \text{Eq. 15}$$

$$Rns = (1 - \alpha) \cdot Rs \quad \text{Eq. 16}$$

$$Rso = (as + bs) \cdot Ra \quad \text{Eq. 17}$$

$$Rnl = \sigma \left(\frac{(TM + 273.16)^4 + (Tm + 273.16)^4}{2} \right) \cdot (0.34 - 0.14 \cdot \sqrt{ea}) \cdot \left(1.35 \cdot \frac{Rs}{Rso} - 0.35 \right) \quad \text{Eq. 18}$$

$$Rn = Rns - Rnl \quad \text{Eq. 19}$$

em que,

Gsc - constante solar (0,082), MJ m⁻² min⁻¹

as e bs – coeficientes regionais que expressam a fração de radiação que chega a superfície da terra em dias nublados e sem nuvens, respectivamente, (na ausência de dados para o Brasil usar as = 0,25 e bs = 0,50) (De Sousa, 2012)

n – insolação, h

k – coeficiente de localização de Hargreaves; 0,16 (regiões interioranas) e 0,19 (litorânea).

C – nebulosidade, decimas de céu encoberto por nuvens (valor de 0 a 10)

α – albedo ou coeficiente de reflexão, adimensional

σ – constante de Stefan-Boltzmann (4,903 x 10⁻⁹) MJ K⁻⁴ m⁻² dia⁻¹

O dado de Radiação solar global calculado para obter a evapotranspiração de referência foi usado também como dado de entrada do arquivo de clima do programa PRZM.

Transformação da velocidade do vento para a altura de 2 m do solo (U_2), visto que o INMET mede este parâmetro a 10 m (Eq. X), onde V_v – Velocidade do vento, $m\ s^{-1}$, mensuração a altura Z_v , m, do solo (equação 20).

$$U_2 = V_v \cdot \frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot Z_v - 5,42)} \quad \text{Eq. 20}$$

4.2 Banco de dados de culturas

Os dados relativos às áreas cultivadas (em hectares) por cultura foram obtidos do Sistema IBGE de recuperação automática (SIDRA, <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=1612&z=p&o=28>), para o ano de 2011. Estes dados são obtidos pelo IBGE mediante consulta a entidades pública e privada, produtores, técnicos e órgãos ligados direta ou indiretamente aos setores da produção, comercialização, industrialização e fiscalização de produtos agrícolas (IBGE, 2010b).

As informações foram obtidas em arquivos no formato .csv, trabalhados no Excel e depois convertidos no programa LibreOffice Calc em .dbf. Estes arquivos foram inseridos no Arcgis, onde a tabela com os dados de área plantada foi ligada a tabela de municípios extraída do IBGE com os geocódigos específicos usando o recurso *join*. Assim foram gerados mapas para as culturas temporárias e permanentes além de mapas para grupos de culturas.

4.3 Banco de dados de solos

Os dados de solos foram classificados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da EMBRAPA (2005). Os dados também foram espacializados no Arcgis o que possibilitou o cruzamento com outras informações.

4.4 Cenário PRZM

Para a construção do cenário PRZM foi usada como referência um planilha desenvolvida pela Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA) que

especifica os itens e ordem necessária para o aporte de informações, conforme modelo do Anexo I.

A planilha é dividida em 40 grupos de registros onde as informações relevantes para o processo são corretamente identificadas. Os registros 1 e 2 são registros de identificação em que se dá o título ao cenário que será trabalhado e faz-se uma pequena descrição do arquivo.

A seguir tem-se um conjunto de informações que diz respeito aos parâmetros meteorológicos. O PFAC é o coeficiente de tanque e é um número adimensional usado para converter a evaporação pan diária na evapotranspiração potencial. Os valores do coeficiente de tanque variam com o tamanho e a característica de vegetação da bordadura onde está instalado o tanque, com a velocidade do vento e a umidade relativa. Geralmente os valores do coeficiente de tanque variam entre 0,6 a 0,8.

O SFAC é usado para calcular as taxas de degelo em relação à temperatura. A neve é considerada qualquer precipitação que ocorra quando a temperatura do ar estiver abaixo de 0 °C. Em áreas em que não ocorra a precipitação por neve este fator é considerado 0.

O IPEIND é um fator que é considerado 0 quando o dado da evaporação pan estiver pronta no arquivo meteorológico. Quando para este parâmetro se usa o valor 1, o dado de evaporação é calculado a partir das horas de luz do dia de acordo com a latitude. Quando este parâmetro está definido como 2 a evaporação é calculada tanto pelo arquivo meteorológico quanto pelas horas de luz do dia de acordo com a disponibilidade.

O ANETD representa a perda de umidade do solo pela evaporação durante um período de pousio, dormente. Assume-se inicialmente que a evaporação ocorre nos 10 cm superiores do solo com perdas de umidade restante que ocorrem abaixo de 10 cm até a profundidade máxima de enraizamento. Os valores de ANETD não são usados quando há crescimento da cultura. Isso porque a presença de plantas crescendo ocasiona interceptação da radiação solar incidente, ocasionado sombreamento do solo e consequente redução do nível de perda da umidade por evaporação. Para solos com drenagem limitada o ANETD deve ser definido em 10 cm. Os valores dos parâmetros de ANETD devem ser considerados como pontos de partida, apenas nos casos em que dados de campo estão disponíveis, ou seja, o

parâmetro ANETD é usado como um fator de calibração para combinar os resultados do modelo e as observações de campo.

Finalmente o DSN fecha este conjunto e é usado para definir o número de dados de precipitação, evaporação potencial, temperatura e velocidade do vento. Usualmente este parâmetro é deixado em branco.

Depois tem-se um conjunto de informações relativas à erosão e paisagem do cenário escolhido. O ERFLAG apresenta a opção para escolha da forma de cálculo da erosão. É possível escolher entre nenhum parâmetro (0), a equação Universal de Perdas de Solo Modificada (MUSLE = 2) como a desenvolvida por Williams (Suárez, 2005), além de duas outras modificações da equação universal de perda dos solos conhecida por MUST (3) o qual é um cálculo mais teórico e MUSS (4) (equação 21) que foi projetada especificamente para pequenas bacias hidrográficas (Suárez, 2005).

$$X_e = 0.79 (V_r, q_p)^{0.65} A^{0.009} K LS C P \quad \text{Eq. 21}$$

Onde:

X_e = perda de solo em tonelada por ha;

V_r = Volume de escoamento superficial (mm);

Q_p = Vaz) de escoamento superficial a;s da equauaoa;

A = Área de escoamento;

K = fator de erodibilidade do solo;

LS = fator topográfico;

C = forma de uso e manejo;

P = práticas conservacionistas usadas.

Todas estas equações na verdade são modificações da equação Universal de Perda de Solos (USLE) que exprime a ação dos principais fatores que sabidamente influenciam a erosão pela chuva.

A fórmula da USLE é dada pela multiplicação de coeficientes empíricos dos fatores influentes apresentados na equação 22:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad \text{Eq.22}$$

Onde:

A = perda média anual de solo em tonelada por ha;

R= fator de erosividade das chuvas;
K, LS, C e P = descritos na equação 21.

Abaixo discute-se os fatores da USLE utilizados na construção do cenário da soja. O fator K, expresso como parâmetro USLEK, significa a erodibilidade do solo a qual é diferente da erosão do solo. Este fator é descrito como o efeito integrado de processos que regulam a recepção da chuva e a resistência do solo para a desagregação de partículas e o transporte subsequente. É uma medida da suscetibilidade do solo ao desprendimento e translocamento de partículas influenciada pela textura, estabilidade estrutural, conteúdo de matéria orgânica, mineralogia de partículas e diferentes constituintes químicos do solo (Gomez, 2012). Assim o fator K representa o grau de resistência natural do solo a ser erodido. A erodibilidade se diferencia da erosão porque em muitos casos a erosão de uma área é mais influenciada pelo declive, características das chuvas, cobertura vegetal e manejo, do que pelas propriedades do solo (Bertoni e Lombardi Neto, 2012).

O fator LS, apresentado como parâmetro USLELS na construção do cenário diz respeito aos aspectos topográficos que é a influência que o relevo exerce sobre a erosão e sedimentação. Ele é formado pelo comprimento de rampa (L) e o grau de declividade da encosta (SLP). O L é considerado como a distância do ponto de origem do caimento da água até um canal definido. O grau de declividade da encosta (SLP) expresso em porcentagem é caracterizado como a tangente do ângulo ou índice da inclinação do terreno. O SLP também é um dos parâmetros usados na construção do cenário.

De uma forma geral, o fator LS precisa de dados de alta resolução e precisão e é usado com variáveis como a altitude média, contendo máximas e mínimas, ângulos de declive e comprimento da vertente (Gomez, 2012).

O parâmetro USLEP expressa o fator P de práticas conservacionistas. Este fator refere-se às práticas de manejo do solo direcionadas à sua conservação e está diretamente relacionado à declividade da área. As práticas conservacionistas mais comuns para as culturas anuais são: plantio em contorno, plantio em faixas de contorno, terraceamento e alternância de capinas (Bertoni e Lombardi Neto, 2012).

O parâmetro AFIELD expressa o parâmetro da parcela estudada em hectares. A área padrão definida pela USEPA é de 10 ha. O HL expressa o comprimento

hidráulico (m). Para uma parcela estudada de 10 ha circular esvaziar em uma lagoa de 1 ha utiliza-se HL padrão de 354 m (Suárez, 2005).

Depois dos dados relativos à erosão são inseridos no modelo os dados da cultura escolhida para estudo.

O INCRP, refere-se à cultura inicial, que indica se a data da simulação é antes da data de emergência (1 para sim e 2 para não). De uma forma geral, é padronizado o uso de 1. O ISCOND diz respeito à condição da superfície inicial da cultura, se aplicável. Utiliza-se 1 para pousio, 2 para corte e 3 para resíduo. O parâmetro NDC refere-se ao número de culturas utilizado na simulação. O NCPDS corresponde ao número de períodos de cultivo da cultura que ocorreram durante o período avaliado na simulação. Para este parâmetro é considerada a periodicidade da cultura e o intervalo de tempo de dados meteorológicos disponíveis.

O CINTCP corresponde à interceptação máxima de chuva pela cultura (cm). Este parâmetro estima a quantidade de chuva que é interceptada por um dossel totalmente desenvolvido e mantido na superfície da planta. O manual do PRZM apresenta uma tabela com os valores propostos por cultura conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Interceptação máxima de chuva pela cultura (Suárez, 2005)

Cultura	Densidade	CINTCP (cm)
Milho	Alta	0.25 – 0.3
Soja	Moderada	0.2 – 0.25
Trigo	Baixa	0.0 – 0.15
Aveia	Baixa	0.0 – 0.15
Cevada	Baixa	0.0 – 0.15
Batata	Baixa	0.0 – 0.15
Amendoim	Baixa	0.0 – 0.15
Algodão	Moderada	0.2 – 0.25
Tabaco	Moderado	0.2 – 0.25

O AMXDR diz respeito à profundidade máxima de enraizamento da cultura. O programa requer este parâmetro em centímetros para estimar a profundidade da raiz real a partir da superfície da terra.

O parâmetro COVMAX indica a cobertura máxima aérea da cultura (%), que é simulada pelo PRZM por interpolação linear entre as datas da emergência e

maturidade da cultura. Com o crescimento da planta, a área de cobertura aumenta influenciando a massa do agrotóxico que chega ao solo a partir de um evento de aplicação superficial. Para maioria das culturas, a cobertura máxima pode variar entre 80 a 100%.

O ICNAH diz respeito à condição da superfície do solo após a colheita. Três valores são permitidos: pousio, colheita e resíduo (no caso em que a folhagem permanece no chão).

Os parâmetros EMD, MAD e HAD se referem às datas de emergência, maturação e colheita (MAD), respectivamente.

O parâmetro WFMAX corresponde ao peso máximo da massa foliar seca, e é usado para estimar a distribuição do agrotóxico entre a planta e o solo. O HTMAX corresponde à altura máxima do dossel da cultura na maturação (em cm). Esta altura interfere no fluxo de agrotóxicos nos compartimentos da planta e varia de acordo com o clima, cultura e condições ambientais.

O parâmetro NUSLEC prepara o programa para os fatores C que serão inseridos. O fator C é a relação entre as perdas de solo de um terreno cultivado e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto e cultivado. A eficácia de reduzir a erosão depende tanto da quantidade de chuvas, da cultura e das práticas de manejo adotadas (Bertoni e Lombardi Neto, 2012).

O parâmetro MNG é o coeficiente de rugosidade do campo de Manning, e é usado para calcular a taxa de fluxo de escoamento superficial provocada pela precipitação.

O CN expressa o número da curva de escoamento superficial pelo método do Serviço de Conservação do Solo (SCS), que considera o tipo de solo e sua cobertura. O SCS reúne os solos dos Estados Unidos em quatro grande grupos: A- baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração; B - moderada taxa de infiltração; C - baixa taxa de infiltração; e D - alto potencial de escoamento, e taxa de infiltração muito baixa (Sartori *et al.*, 2005a). O PRZM considera todos os solos na condição de umidade ideal (umidade antecedente II – AMC II), que precederam uma enchente máxima anual (Sartori *et al.*, 2005b).

O CORED é a profundidade total do solo (cm), o NHORIZ corresponde ao número total de horizontes de solo para os quais se tem informações disponíveis e o THKNS refere-se à espessura do horizonte em cm. O BD refere-se à densidade do solo, sendo obrigatório nas equações de transporte e também para estimar os

valores de saturação da mistura. O THETO diz respeito ao conteúdo inicial de água no solo, que pode ser substituído pelo valor da capacidade de campo.

Finalmente o cenário traz um último grupo de informações relativas a características do solo da região estudada. O primeiro parâmetro deste bloco corresponde ao CORED que é a profundidade total do solo em cm que o PRZM simula o movimento vertical. Logo a seguir, o NHORIZ corresponde ao número total de horizontes de solo para os quais se tem informações disponíveis a serem colocadas no PRZM. O THKNS refere-se à espessura do horizonte em cm.

O BD refere-se à densidade do solo. Este valor é obrigatório nas equações químicas básicas de transporte do PRZM e também é usado para estimar os valores de saturação da mistura. O THETO diz respeito ao conteúdo inicial de água no solo. No caso de indisponibilidade deste dado pode-se usar o valor da capacidade de campo.

O DPN refere-se à espessura do compartimento no horizonte. Em geral, um menor valor de DPN gera resultados mais precisos e fornece maior resolução espacial, porém consome mais tempo de análise. O DPN menor melhora a estimativa do fluxo de volatilização a partir da superfície do solo e também permite uma melhor representação da simulação química da substância aplicada. Os valores de 0,1 cm são recomendados para os primeiros 10 cm do perfil do solo e onde a volatilização é um mecanismo de grande perda. O DPN pode ser aumentado gradualmente, com a profundidade (isto é, 1,0 cm para 2,5 cm para 5,0 cm nos horizontes mais profundos). Para horizontes mais profundos é possível usar valores de DPN na ordem de 5,0 a 30,0 centímetros, dependendo da resolução espacial necessária nessas profundidades.

Os parâmetros THEFC e THEWP expressam a capacidade de campo e ponto de murcha permanente, respectivamente. Geralmente estes dados estão disponíveis em bancos de dados, porém caso não seja possível acessá-los é possível estimá-los. Um dos métodos recomendados no próprio manual do PRZM pode ser reapresentado pela equação 23.

$$\Theta_x = a + b \cdot \%Areia + c \cdot \%Argila + d \cdot \%Matéria_Orgânica + e \cdot densidade \quad \text{Eq. 23}$$

Onde Θ_x = retenção da água para um determinado potencial matricial $\text{cm}^{-3}\text{cm}^{-3}$ (capacidade de campo = -0,33 bar e ponto de murcha = 0)

a e e = coeficientes de regressão

Finalmente o OC refere-se ao conteúdo de carbono orgânico no solo.

4.5 Propriedades físico químicas e de destino ambiental da substância estudada.

São necessárias tanto informações específicas do agrotóxico aplicado quanto dos seus metabólitos na planta e/ou produtos de degradação. A maioria das informações solicitadas faz parte do conjunto de exigências de estudos solicitados no âmbito da Portaria 84 IBAMA (IBAMA, 1996) para avaliação do potencial de periculosidade ambiental do produto. Estas informações incluem ponto de ebulição, solubilidade, coeficiente de partição (K_{oc}), meia vida aeróbica no solo, pressão de vapor e meia vida aeróbica e anaeróbica na coluna de água.

Algumas informações necessárias nesta etapa podem ser consideradas padrão para todas as substâncias. Entre elas temos o fator de absorção da planta (0), a meia vida na folha (0 dias), o coeficiente de lavagem foliar (0,5), o coeficiente de difusão no ar (4300 cm²/dia) e entalpia de vaporização (20 kcal/mol).

4.6 Uso do agrotóxico no campo

Este conjunto de informações inclui a(s) data(s) da aplicação do agrotóxico, método de aplicação e dose utilizada. Dez métodos de aplicação são padronizados pelo modelo (CAM 1 a 10) considerando que o agrotóxico é aplicado ao solo ou na folhagem. No modelo testado neste estudo, foi selecionado o CAM = 2 que diz respeito a aplicações foliares. A interceptação foliar aumenta linearmente como o desenvolvimento da copa. O agrotóxico não interceptado é aplicado da mesma forma que o CAM = 1. A substância resultante após o carreamento é distribuída uniformemente em uma profundidade de 2 cm.

As formas de aplicação consideradas são aérea, pulverizador, turbo atomizador e outros equipamentos. Neste estudo foi considerada a aplicação por pulverizador, que está relacionado a 1% de deriva para lagoa e 6,4 % no reservatório, e 99% de eficiência da aplicação.

4.7 Versão do EXPRESS em português

A interface EXPRESS foi desenvolvida pela EPA para facilitar uma avaliação rápida e consistente da exposição aos agrotóxicos no meio aquático em uma variedade de culturas. Esta interface facilita a execução de uma série de modelos de

avaliação de risco, entre eles o modelo PRZM. Nesta interface estão disponíveis apenas cenários americanos.

A primeira etapa no processo de gerar este programa em português é a alteração do código fonte, que é disponibilizado pela EPA. O código fonte está na linguagem Fortran 90, escrita para produzir quatro programas executáveis:

MainShell.pdf que contém o código para o programa principal do EXPRESS;

InputDataProgram.pdf que contém o código para o programa de entrada de dados;

OutputGraphics.pdf que contém o código para a produção de tabelas de saída;

MakeHEDFiles.pdf que contém o código para preparar os arquivos de séries temporais para uso em outros programas.

Para gerar um novo programa com alteração dos bancos de dados e os rótulos em português foi utilizada a mesma ferramenta aplicada ao seu desenvolvimento, Winteracter versão 9.0 para Windows 32 bits, associado a um compilador compatível, o Lahey/Fujitsu Fortran 95 v 6.2 (LF 95). Este compilador foi escolhido por apresentar entre as suas funcionalidades a biblioteca matemática SSL2. Esta biblioteca é fundamental para o módulo de entrada de dados onde o código fonte do programa chama suas operações matemáticas para gerar os cálculos necessários.

Os quatro arquivos que possuem o código fonte do programa foram recompilados individualmente. Adicionalmente uma nova estrutura física do programa foi construída para suportar o aporte de novas informações respeitando os códigos numéricos e as funções descritas no módulo *resource* de cada programa. Este módulo identifica cada tela do programa e botão ou função por um código numérico e um nome. Também foram usadas as mesmas funções disponíveis para o programa inicial sendo assim possível incluir novos cenários e dados meteorológicos

Para validação da versão em português do Express foram construídos dois cenários no EXPRESS 1.03.02 baseados nos ingredientes ativos tiametoxam e forchlorfenuron e os resultados finais comparados. Os arquivos de saída foram comparados usando a ferramenta compare do programa NotePad++. Os resultados gráficos também foram comparados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dados meteorológicos do INMET

Os arquivos de dados meteorológicos americanos contêm medições feitas em 237 estações meteorológicas localizadas nos Estados Unidos por um período que se estende de 1961-1990. As datas exatas de coleta de dados variam de acordo com estação meteorológica. A Figura 8 mostra a localização das estações meteorológicas americanas.

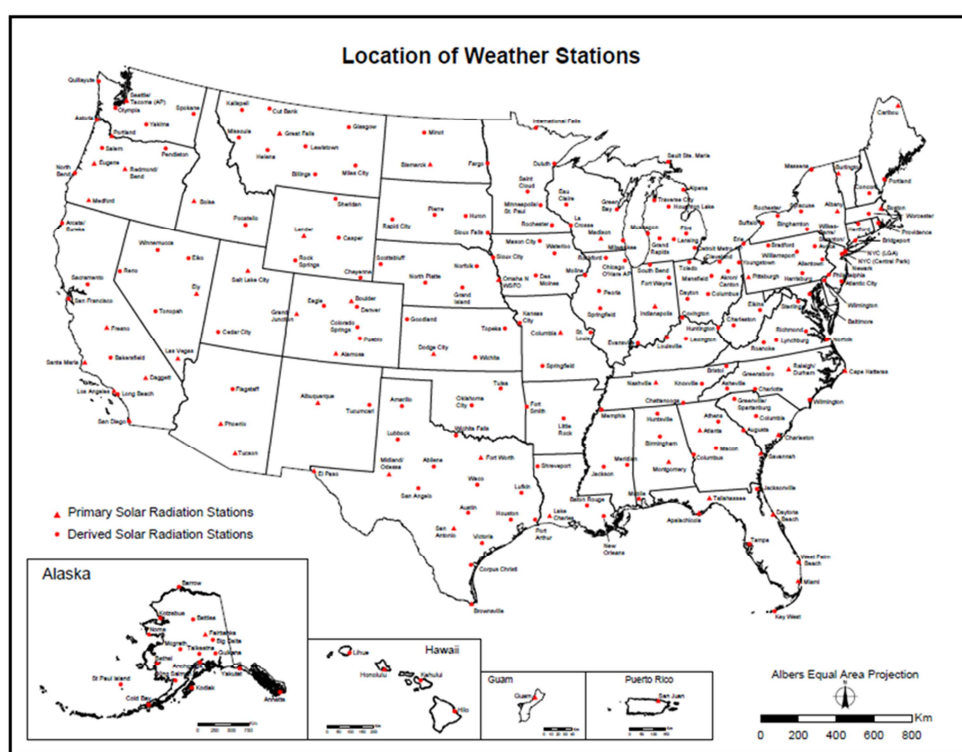


Figura 8. Localização das estações meteorológicas americanas. Fonte: (USEPA, 2013)

O INMET forneceu dados de 289 estações meteorológicas para o período entre 2002 e 2011. Destas, 26 (8,9%) foram excluídas do estudo, principalmente por não apresentar dado de temperatura (20 estações). Seis estações não apresentavam 3 tipos de dados relevantes para este estudo. A Figura 9 representa a espacialização das estações meteorológicas cujos dados foram considerados neste estudo.

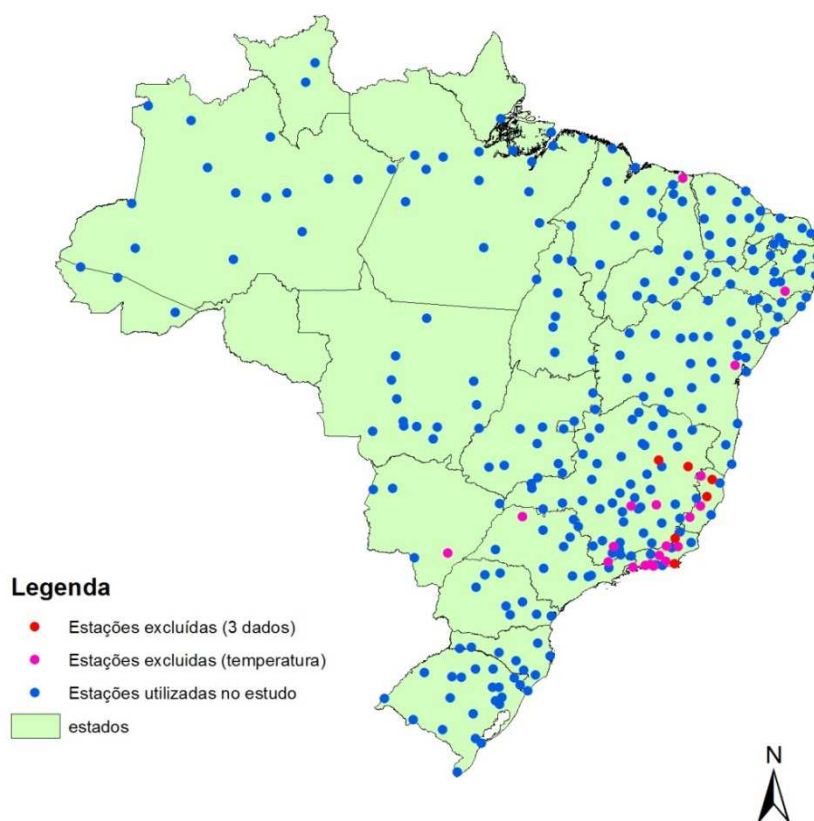


Figura 9. Localização das estações meteorológicas brasileiras monitoradas pelo INMET

Dez estações apresentaram dados inadequados de velocidade do vento (Figura 10). A análise da distância entre as estações com insuficiência de dados e as estações com dados que foram considerados adequados foi realizada no ARCGIS. O resultado desta avaliação está mostrado na Tabela 1 do Anexo II.

Apenas duas estações tiveram seus dados de direção do vento substituídos, uma no Espírito Santo e outra no Rio de Janeiro (Figura 11). O Anexo II, Tabela 2, mostra as estações cujos dados foram utilizados em substituição aos dados insuficientes.

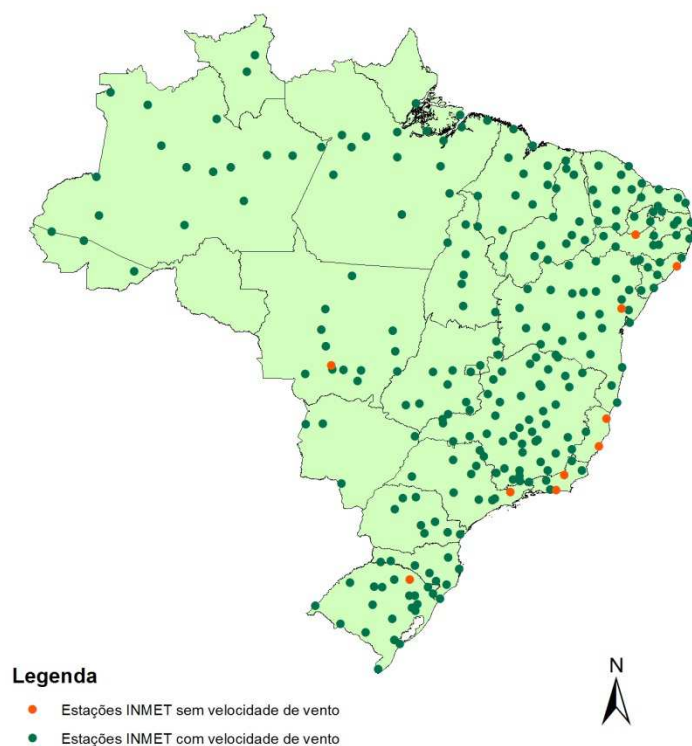


Figura 10. Estações monitoradas pelo INMET com informação de velocidade do vento.

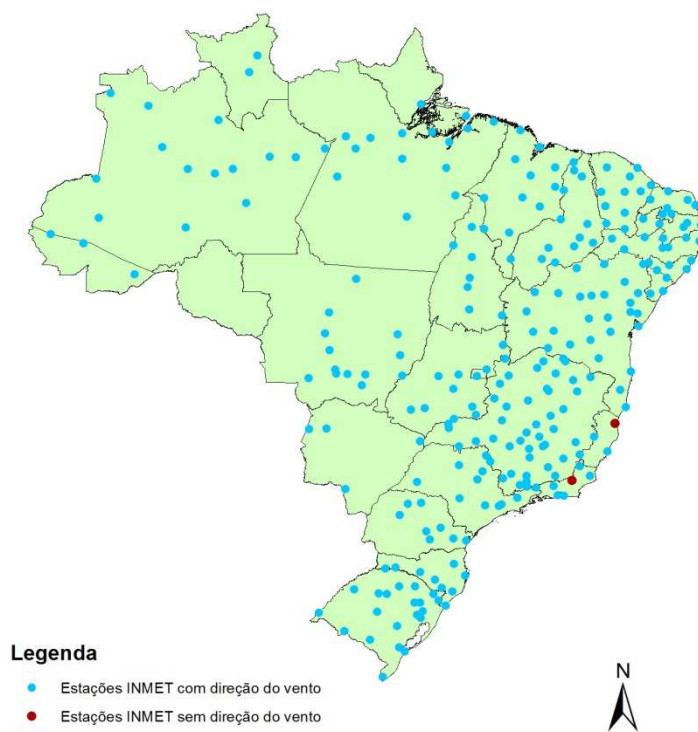


Figura 11. Estações monitoradas pelo INMET com informação de direção do vento.

Quatro estações apresentaram dados considerados insuficientes para o parâmetro umidade do ar (Figura 12; Anexo II- Tabela 9).

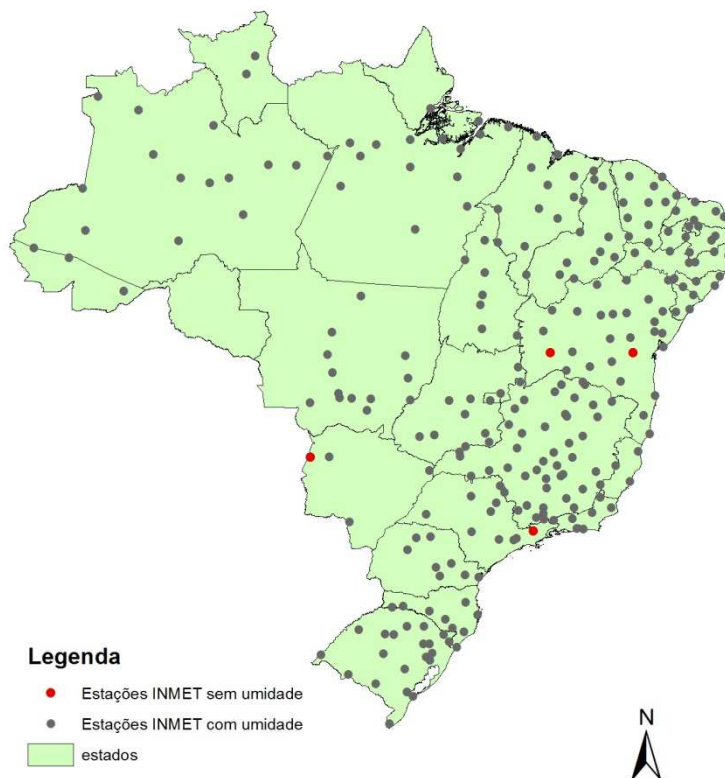


Figura 12. Estações monitoradas pelo INMET com informação de umidade do ar

Sete estações na Bahia e Sergipe apresentaram insuficiência de dados em relação à evaporação (Figura 13). O resultado da comparação apresentando as estações mais próximas está apresentado na Tabela 3 (Anexo II).

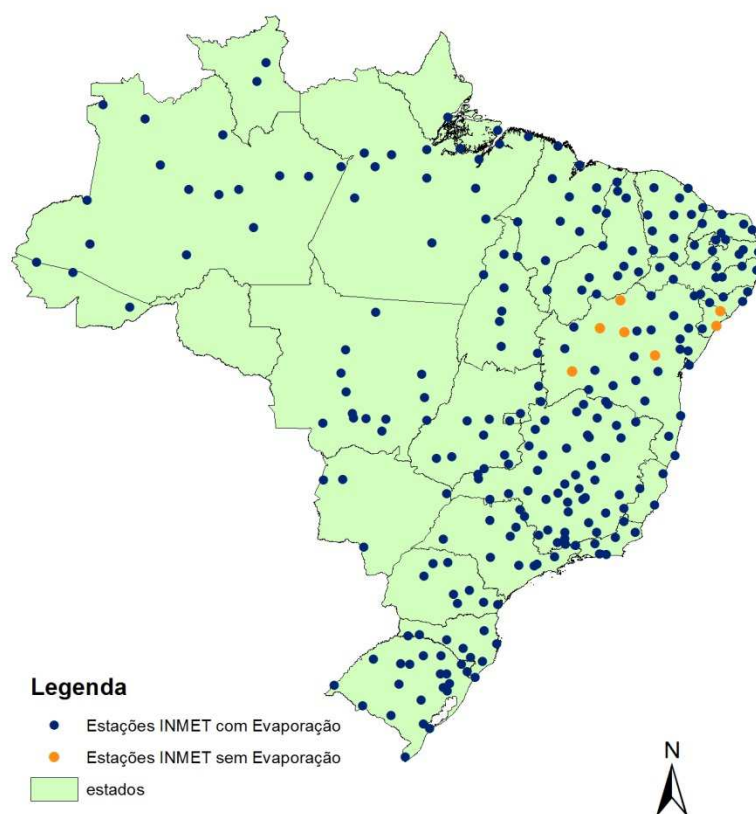


Figura 13. Estações monitoradas pelo INMET com informação de evaporação

No total, 44 estações apresentaram deficiência de informação em relação à pressão atmosférica (Figura 14). Elas estão representadas no mapa na cor azul claro. A Tabela 4 no Anexo II apresenta dados da comparação do parâmetro pressão atmosférica no ARCGIS.

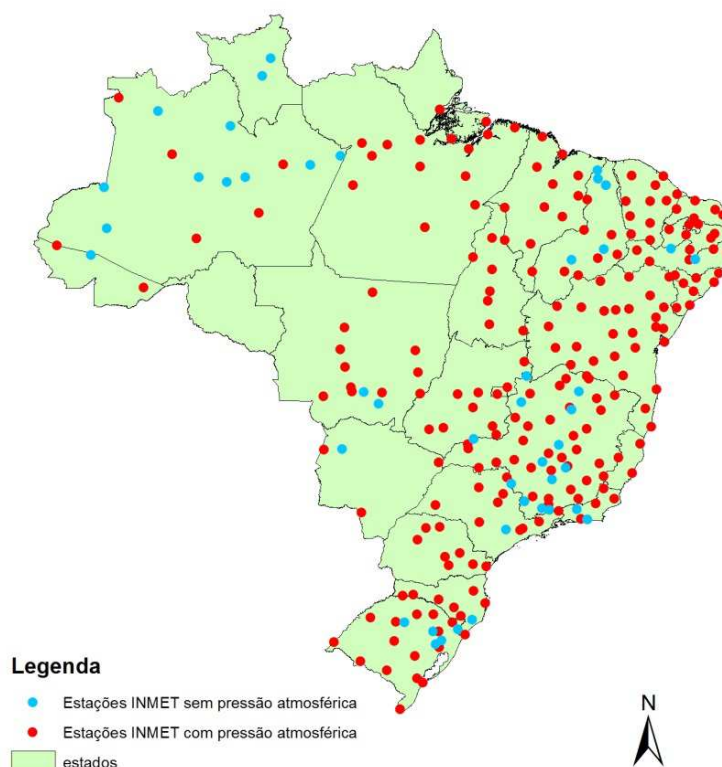


Figura 14. Estações monitoradas pelo INMET com informação de pressão atmosférica.

5.2. Aerosol

O parâmetro aerossol é o dado com maior deficiência de informações, e os dados utilizados neste estudo foram obtidos da base de dados AERONE. Apenas quatro estações meteorológicas nesta base possuíam dados disponíveis para o período de tempo desejado, duas no estado do Mato Grosso, uma no Acre e uma em São Paulo. A Tabela 5 do Anexo II apresenta a comparação realizada pelo programa ARCGIS para o parâmetro aerossol entre as estações do INMET e as estações AERONET. Apesar da pouca disponibilidade de informação este parâmetro não tem grande influência nas funções utilizadas pelo programa.

5.3 Evapotranspiração

A evapotranspiração de referência foi calculada de acordo com as fórmulas apresentadas na seção de metodologia. Para validar os cálculos realizados na

planilha Excel foi usado como referência o programa PROCAL_ETo (de Sousa, 2012) desenvolvido para a determinação da ETo pelo modelo de Penman-Monteith (Figura 15).

PROCAL_ETo: PROGRAMA PARA CÁLCULO DA ETo
UTILIZANDO O MODELO DE PENMAN-MONTEITH
 IFSertão-PE / Campus Petrolina ZR
 Autor: José Sebastião Costa de Sousa
 M.Sc. Engenharia Agrícola

DADOS DE ENTRADA

Coordenadas Geográficas

	Graus	Minutos	Segundos	Hemisfério
Latitude	6	22	0	Sul
**Longitude			0	Oeste
Altitude (m)	212.70			
Pressão (hPa)	987.40			

Data

Dia	7
Mês	1
Ano	2002

Dados Especiais

as	
bs	
α	0.23
G (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	

CONVERSOR

DADOS DE SAÍDA

Evapotranspiração de Referência

ETo	3.46 mm dia ⁻¹
-----	---------------------------

Dados importantes

J	7
Nascer do sol	5h:49min *4h:59min
Pôr do sol	18h:11min *19h:1min
N	12.35 h
δ	-22.38 °
Δ	0.2146 kPa °C ⁻¹
es - ea	0.9772 kPa
Rs	12.83 MJ m ⁻² dia ⁻¹
Rn	8.81 MJ m ⁻² dia ⁻¹

TUTORIAL

Figura 15. Tela do Programa PROCAL_ETo, com dados dados da estação meteorológica Iguatu/ CE.

Foram escolhidos três conjuntos de parâmetros de cinco diferentes estações para se comparar o resultado da evapotranspiração obtido na planilha Excel elaborada em conjunto com os dados fornecidos pelo INMET e o programa PROCAL_ETo. As Tabelas 6-7 representam as entradas dos dados utilizados nos cálculos e a comparação dos resultados obtidos.

Tabela 6. Dados de entrada para o cálculo da Evapotranspiração

Estação INMET Testada	Latitude	Altitude (m)	Pressão Atmosférica (hPa)	T máx (°C)	T med (°C)	T min (°C)	Umidade Relativa (%)	Nebulosidade Média diária (décimos)	Dia Juliano	Velocidade do vento 10 m m/s	Insolação total diária (hs)
Coari (1)	04°05'S	46	1003,5	33	27,9	24,4	82	6	01 ¹	0	12
Coari (2)	04°05'S	46	1004,7	27,5	25,9	24,6	92	10	302 ²	1,9	0,4
Coari (3)	04°05'S	46	1006,8	29	24,4	21,2	88	7	178 ³	2	4,9
Aimorés (1)	19°29'S	82,7	1007,5	33	26,1	22	66	6	285 ⁴	1,4	5,9
Aimorés (2)	19°29'S	82,7	1012	27	19,3	11,5	57	7	243 ⁵	1,7	11
Aimorés (3)	19°29'S	82,7	1005,6	36	29,2	23,2	72	5	10 ⁶	1,4	10,2
Goiânia (1)	16°40'S	741,48	928,6	31,3	25	20,4	73	9	51 ⁷	1,1	6,6
Goiânia (2)	16°40'S	741,48	929,5	31,2	24,2	19,7	80	7	64 ⁸	1,2	4
Goiânia (3)	16°40'S	741,48	930,6	31,4	23,1	20,2	77	9	352 ⁹	1,9	2,3
Porto Alegre (1)	30°03'S	46,97	1010,6	31,2	25,5	21,8	80	5	69 ¹⁰	1	9,4
Porto Alegre (2)	30°03'S	46,97	1003,8	37	28,5	20,6	56	1	76 ¹¹	0,9	10,4
Porto Alegre (3)	30°03'S	46,97	998,2	33,7	27,1	22,7	75	2	362 ¹²	1,6	11,9
Iguatu (1)	06°22'S	212,7	987,4	30,8	27,5	24,6	76	6	5 ¹³	2,3	2,1
Iguatu (2)	06°22'S	212,7	992,9	29,8	24,6	18,9	62	9	208 ¹⁴	5,3	5,2
Iguatu (3)	06°22'S	212,7	986,3	36,5	29,3	22,9	44	2	306 ¹⁵	2,5	11,3

1 – 01/01/02; 2 – 28/10/04; 3 – 26/06/08; 4 -12/10/02; 5- 31/08/06; 6 – 10/01/2010; 7 – 20/02/02; 8 – 04/03/04; 9 – 18/12/2009; 10 – 09/03/04; 11- 17/03/06; 12 – 28/12/2009; 13 - 07/01/02; 14 – 26/06/04; 15 – 01/11/08

Tabela 7. Comparação dos resultados obtidos para a evapotranspiração.

Estação	Pro-Eto (mm dia⁻¹)	Planilha Excel (mm dia⁻¹)	Erro relativo (%)
Coari (1)	2,47	2,46	-0,004
Coari (2)	2,28	2,29	0,004
Coari (3)	3,02	3,04	0,007
Aimorés (1)	4,1	4,13	0,007
Aimorés (2)	4,42	4,42	0,000
Aimorés (3)	6,03	6,04	0,002
Goiânia (1)	4,38	4,49	0,025
Goiânia (2)	3,61	3,58	-0,008
Goiânia (3)	3,84	3,83	-0,003
Porto Alegre (1)	4,4	4,4	0,000
Porto Alegre (2)	4,81	4,83	0,004
Porto Alegre (3)	6,4	6,4	0,000
Iguatu (1)	3,46	3,48	0,006
Iguatu (2)	4,82	4,98	0,033
Iguatu (3)	7,09	7,1	0,001

A Tabela 9 mostra que os valores obtidos na planilha de Excel construída neste estudo se aproximam daqueles estimados pelo Pro-Eto (ER máximo de 0,03%). A planilha foi considerada validada e os dados obtidos foram utilizados como entrada do programa PRZM.

5.4 Dados de cultivo

Foram elaborados 58 mapas de culturas individuais. Destas, 27 culturas são permanentes e 31 temporárias. A Tabela 8 mostra as culturas trabalhadas e suas respectivas áreas de cultivo (ha).

Tabela 8. Relação de culturas e suas respectivas áreas de cultivo. Fonte: IBGE, SIDRA

Cultura	Tipo	Área Colhida (ha)
Abacate	Permanente	10753
Abacaxi (Mil frutos)	Temporária	62481
Algodão arbóreo (em caroço)	Permanente	351
Algodão herbáceo (em caroço)	Temporária	1405135
Alho	Temporária	12928
Amendoim (em casca)	Temporária	106644
Arroz (em casca)	Temporária	2709796
Aveia (em grão)	Temporária	172127
Azeitona	Permanente	43
Banana (cachos)	Permanente	503354
Batata-doce	Temporária	43843
Batata-inglesa	Temporária	149212
Borracha (látex coagulado)	Permanente	134947
Cacau (em amêndoa)	Permanente	680484
Café (em grão)	Permanente	2148775
Cana-de-açúcar	Temporária	9601316
Caqui	Permanente	8349
Castanha de caju	Permanente	764472
Cebola	Temporária	63481
Centeio (em grão)	Temporária	2341
Cevada (em grão)	Temporária	88236
Dendê (cachos de coco)	Permanente	109080
Ervilha (em grão)	Temporária	1538
Fava (em grão)	Temporária	37132
Feijão (em grão)	Temporária	3673162
Fumo (em folha)	Temporária	454501
Girassol (em grão)	Temporária	62535
Goiaba	Permanente	15917
Guaraná (semente)	Permanente	10989
Juta (fibra)	Temporária	855
Laranja	Permanente	817292
Limão	Permanente	47267
Linho (semente)	Temporária	11190
Maçã	Permanente	38077
Malva (fibra)	Temporária	11263
Mamão	Permanente	35531
Mamona (baga)	Temporária	208476
Mandioca	Temporária	1733513
Manga	Permanente	76383
Maracujá	Permanente	61631
Melancia	Temporária	97718

Cultura	Tipo	Área Colhida (ha)
Melão	Temporária	19695
Milho (em grão)	Temporária	13218904
Pera	Permanente	1750
Pêssego	Permanente	20148
Rami (fibra)	Temporária	369
Soja (em grão)	Temporária	23968663
Sorgo (em grão)	Temporária	757410
Tangerina	Permanente	53244
Tomate	Temporária	71473
Trigo (em grão)	Temporária	2138916
Triticale (em grão)	Temporária	39628
Uva	Permanente	84338
Coco-da-baía	Permanente	270541
Urucum (semente)	Permanente	11614
Figo	Permanente	3041
Noz (fruto seco)	Permanente	2435
Erva-mate (folha verde)	Permanente	71185

Devido às diferenças na dimensão da área plantada, os mapas das culturas inseridos no programa EXPRESS BRA 1.0 foram distribuídos em cinco grupos de cores de legenda: colorido, verde, rosa, azul e vermelho. Sendo que os mapas com a legenda colorida representam as culturas com menor área plantada e os mapas com a legenda em vermelho representam as culturas com maior área plantada. O critério para distribuição destes grupos obedeceu à escala logarítmica e a composição dos grupos está descrita na Tabela 9.

Tabela 9. Distribuição dos grupos de cores de acordo com a área plantada.

Legenda	Número de Mapas	Mínimo (ha)	Máximo (ha)
Colorido	3	43	369
Verde	7	855	8349
Rosa	28	10753	109080
Azul	12	134947	1405135
Vermelho	8	1733513	23968663

Um exemplo dos mapas que podem ser gerados no EXPRESS BRA 1.0 está exemplificado na Figura 16 para a cultura soja. Atualmente a soja é responsável por

mais de $\frac{1}{3}$ da área cultivada no país (IBGE, 2010a), concentrada principalmente nas regiões sul e centro oeste.

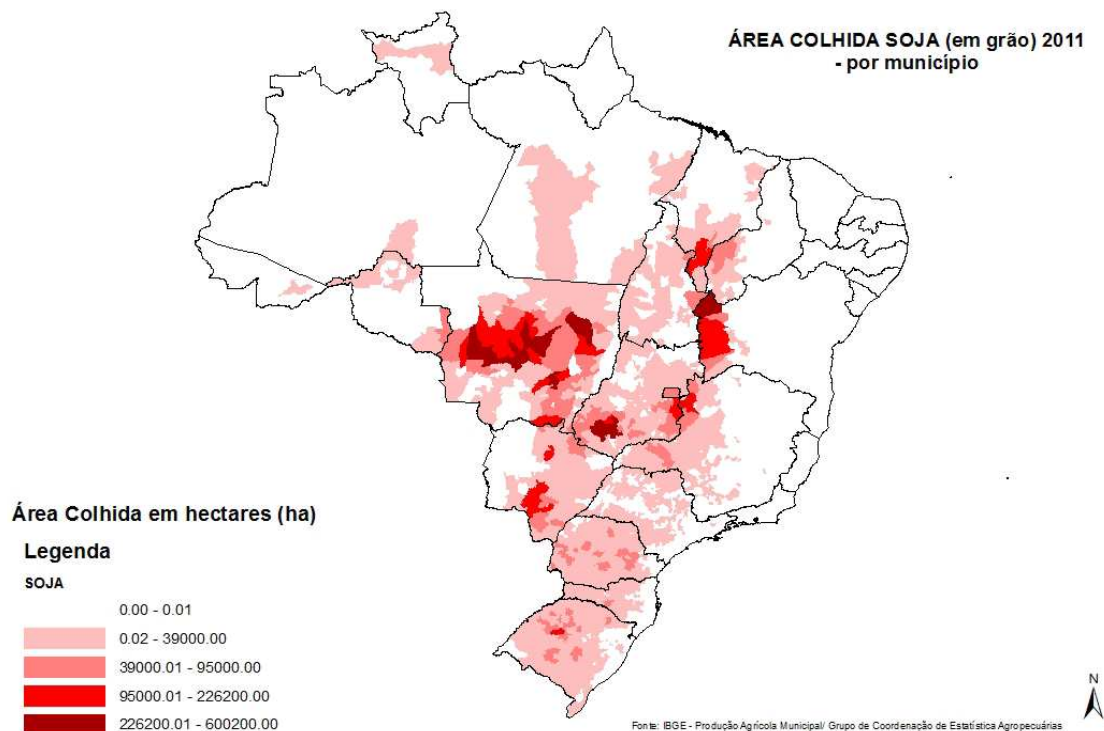


Figura 16. Espacialização da cultura de soja no ano de 2011 no Brasil.

5.5 Versão do programa EXPRESS em português

A versão do programa EXPRESS construída em português foi nomeada EXPRESS BRA 1.0 e apresenta as mesmas funcionalidades do EXPRESS original.

As Figuras 17 a 20 mostram as telas elaboradas para cada módulo do programa (*MainShell*, *InputDataProgram*, *OutputGraphics*, *MakeHEDFiles*). O *MakeHEDFiles* funciona apenas internamente e não possui em sua estrutura um arcabouço físico relacionado (módulo *resource*).

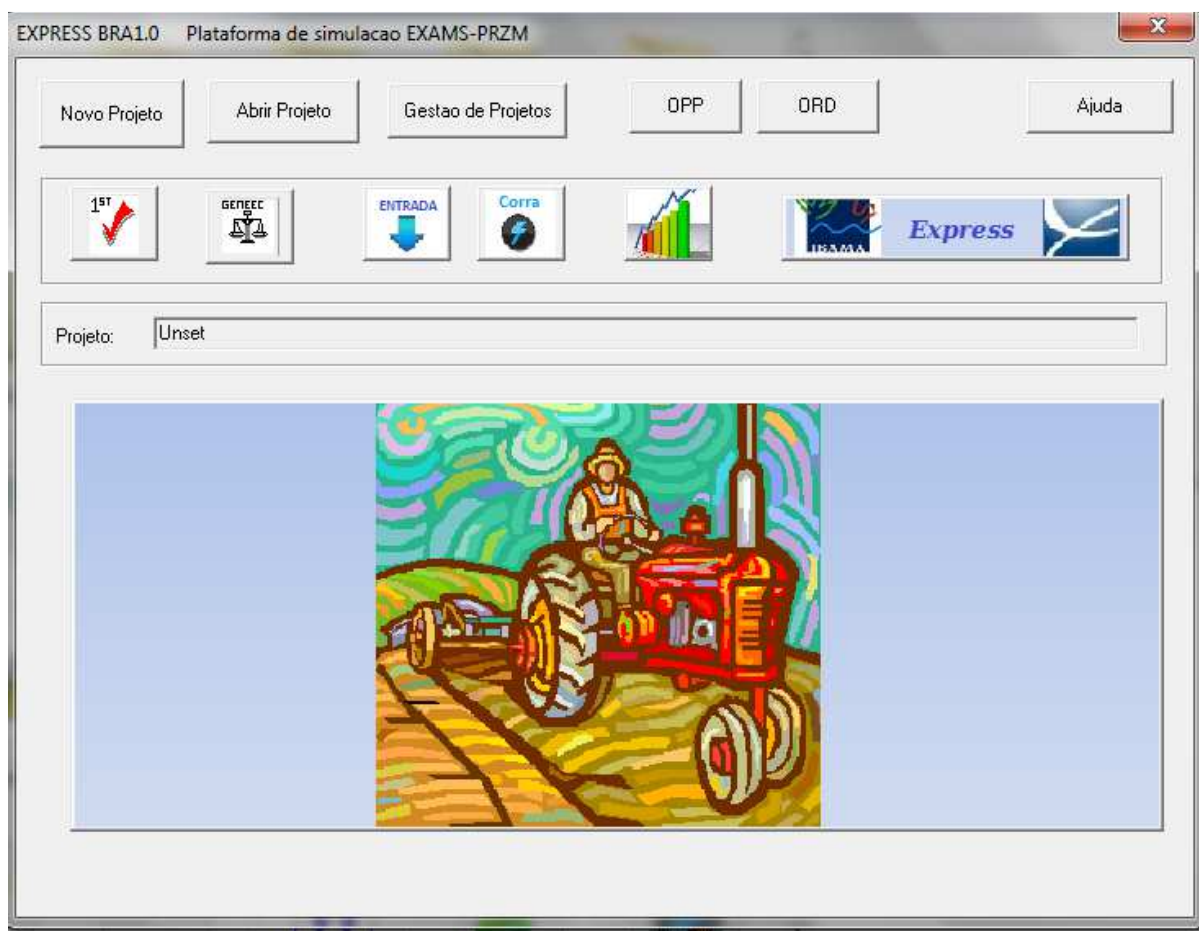


Figura 17.Tela de abertura do Express BRA1.0



Figura 18.Tela do Módulo de Entrada de Dados do Express BRA1.0

Entrada dos Parametros Quimicos

Substancia 1 | Substancia 2 | Substancia 3

Analise Padrao PRZM Fase II

Nome Quimico: Tiametoxam

Peso Molecular: 297.10

Solubilidade (mg/L): 4100.0

Metodo coeficiente de particao: Koc solo

Valor do coeficiente de particao: 56.200

Meia Vida aerobica solo (dias): 50.000

☐ Entre como dados especificos de processos foliares

Fator de recaptacao da planta: 1.0000

Meia vida foliar (dias): 0.0000

Coeficiente de lavagem foliar: 0.10000

Volatilizacao do solo

Pressao de Vapor: 0.66000E-05

Unidades de Pressao de vapor: milIPascal

☐ Entre com dados quimicos especificos

Coeficiente de difusao do ar (cm2/dia): 4300.0

Entalpia da Vaporizacao: 20.000

OK Cancelar

Figura 19. Tela de entrada dos parâmetros PRZM no Express BRA1.0

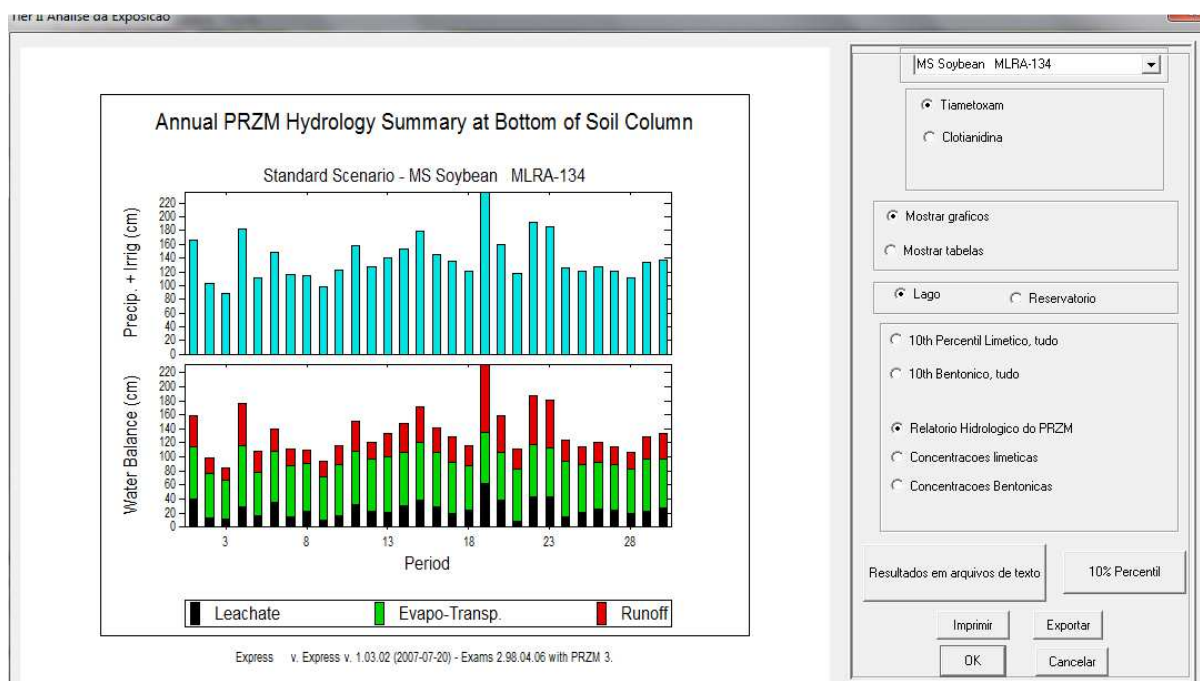


Figura 20. Tela do módulo de apresentação dos resultados do Express BRA1.0

O banco de dados de culturas está disponível para consulta imediata (Figura 21), obtendo os mapas de cultivo do Brasil espacializados no ARCGIS (Figura 16). Da mesma forma, é possível acessar a espacialização dos dados meteorológicos mostrados na Figura 10.

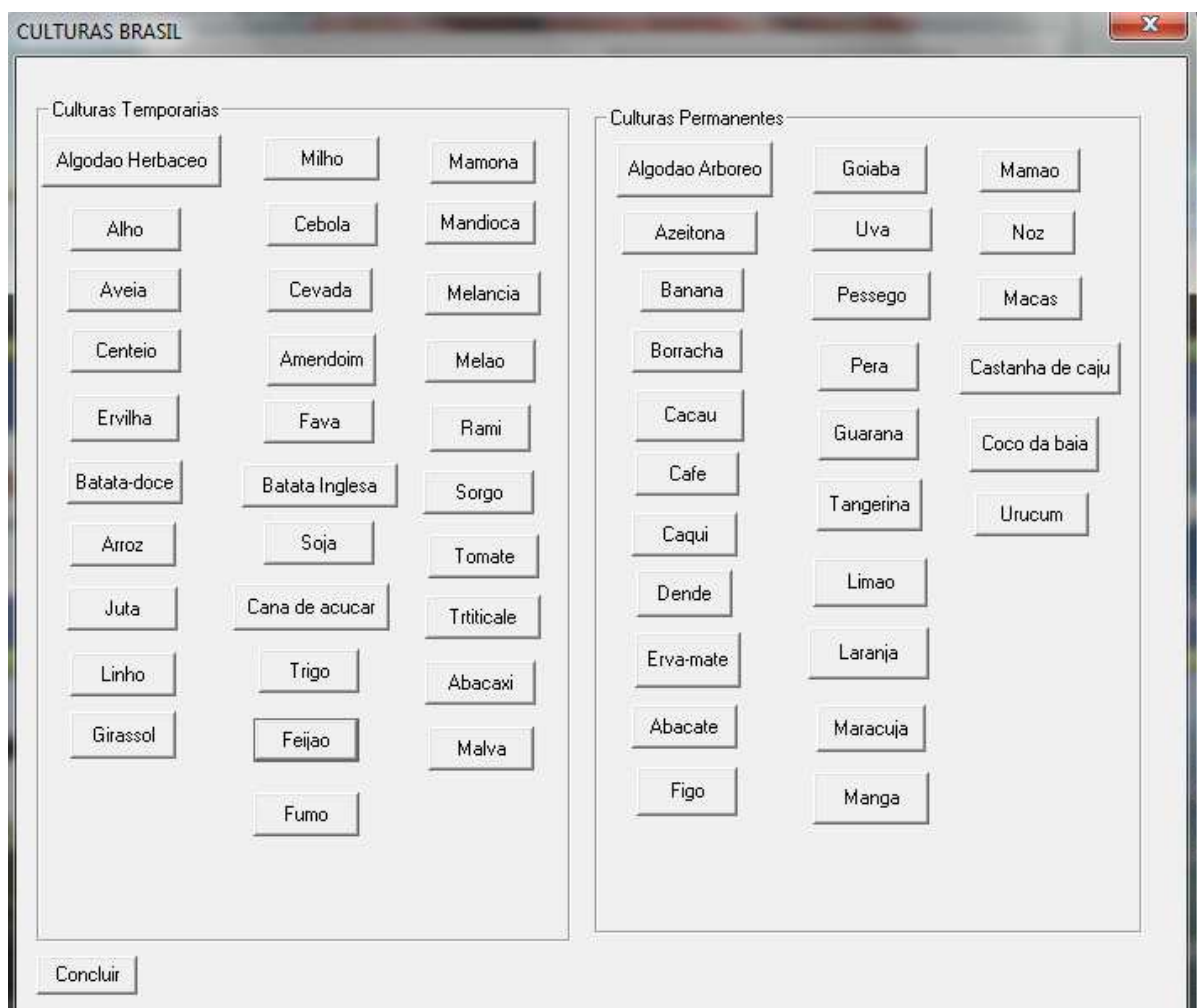


Figura 21. Acesso aos mapas das culturas brasileiras espacializadas.

O módulo de início do programa e o módulo de saída de informações foram validados para dois cenários teóricos para os ingredientes ativos tiametoxam e forchlofenuron no Express em inglês e no Express BRA 1.0, obtendo os mesmos resultados.

5.6 Cenário soja

Dentro do Express, funcionam vários programas de avaliação de risco ambiental, sendo o PRZM o foco deste trabalho. Para testar os resultados do

modelo PRZM usando a plataforma Express, foi construído um cenário baseado no plantio de soja na fazenda experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, em Ponta Porã, (22° 33' 13,4" S; 55° 38' 53,3" O) em uma área de 900 m², cujas características relativas ao plantio e dados do solo foram publicados no Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento n° 57 da EMBRAPA (Scorza Junior *et al.*, 2010). O solo da fazenda experimental é um latossolo vermelho distrófico típico de textura média (Scorza Junior *et al.*, 2010).

O cenário construído utilizou parâmetros meteorológicos da estação de Ponta Porã (22° 53' S; 55° 32' O) a 650 m do nível do mar (Tabela 10).

Tabela 10. Resumo dos parâmetros meteorológicos da estação de Ponta Porã/MS (E83702).

Ano	Prec.	Evap.	T (C)	V.v.	Rad.	Eto	P.A.	Umid.	Neb.	Aerosol
2002	96,3	211	22,39	322,18	431,31	4,50	93,83	69,81	6,28	0,24
2003	178,3	153	21,25	302,45	448,19	4,30	93,87	71,10	6,09	0,26
2004	169,7	174	21,28	292,17	441,01	4,25	93,79	70,90	6,18	0,27
2005	139,8	170	21,38	281,30	434,40	4,16	93,77	72,22	6,34	0,31
2006	160,2	167	24,01	259,00	436,88	3,98	93,77	71,63	6,36	0,25
2007	167,6	185	22,02	287,41	441,50	4,26	93,80	70,91	6,25	0,28
2008	191,9	183	21,66	230,83	440,81	4,08	93,76	70,60	6,27	0,18
2009	184,6	216	21,65	243,91	415,19	3,86	93,74	74,93	6,94	0,13
2010	180,5	232	21,16	219,04	420,35	3,88	93,76	71,80	6,68	0,33
2011	137	250	21,2	219,00	420,40	3,90	93,80	71,80	6,70	0,30

Prec. = precipitação anual (cm), Evap. = Pan evaporação anual (cm), T = temperatura média anual do ar, V.v. = velocidade do vento (m/s), Radiação (ly/dia), ETo = Evapotranspiração potencial (cm), P.A. = pressão atmosférica (kPa), Umid. = umidade relativa do ar (%), nebulosidade diária (décimos), Aerosol (densidade óptica).

A Tabela 11 apresenta uma síntese do conjunto de parâmetros meteorológicos inseridos no modelo, além do próprio arquivo meteorológico da referida estação.

Tabela 11. Parâmetros meteorológicos inseridos no modelo PRZM

Parâmetro	Valor	Fonte/ Observações
Data inicial	01/01/02	
Data final	31/12/12	
PFAC (adimensional)	0,7	(Brouwer e Heibloem, 1986)
SFAC (cm/°C)	0	
IPEIND	0	Dado meteorológico pronto
ANETD (cm)	10	solos com drenagem limitada (Suárez, 2005).
DSN	--	Dado meteorológico pronto

PFAC= Fator de pan evaporação, SFAC = Fator neve, IPEIND = Parâmetro evaporação pan, ANETD = Profundidade mínima de evaporação, DSN = Define o número de dados de precipitação

A Tabela 12 mostra os parâmetros relacionados ao processo de erosão do solo.

Tabela 12. Parâmetros de erosão e terreno para a cultura de soja em Dourados, MS

Parâmetro	Valor	Fonte/ Observações
ERFLAG	4	0 = nenhuma, 2 = MUSLE, 3 = MUST, 4 = MUSS
USLEK	0,02	da Silva <i>et al.</i> (2011)
USLELS	0,3	da Silva <i>et al.</i> (2011)
USLEP	0,5	Galdino <i>et al.</i> (2003)
AFIELD, ha	10	Padronização USEPA (2005)
IREG	3	
SLP, %	2,39	da Silva <i>et al.</i> (2011)
HL, m	600	

ERFLAG = Parâmetro erosão, USLEK = Fator K, USLELS = Fator LS, USLEP = Fator P, AFIELD = Área do campo, IREG = Região de distribuição das chuvas pelo método SCS, SLP = Valor da declividade, HL = Comprimento hidráulico.

Foi escolhida a equação MUSS, projetada para pequenas bacias hidrográficas para o cálculo relativo à erosão, e é utilizada pela USEPA como a opção padrão de escolha em simulações (Suárez, 2005). Os parâmetros USLEK, USLELS e SLP foram extraídos do estudo de (Da Silva, Alvares e Watanabe, 2011), e foram estimados a partir do sistema de informações geográficas (SIG) para o todo

o Brasil. Os autores estimaram o fator LS por meio do algoritmo de Wischmeier e Smith (Equação 23) (Da Silva, Alvares e Watanabe, 2011):

$$LS = (\lambda^*/22.1)^m * (0.065 + 0.045 \theta + 0.0065 \theta^2) \quad \text{Eq. 23}$$

Onde:

λ^* = distância ao longo da qual se processa o escoamento superficial (m);

θ = declividade (%); e

m = 0,5 se o percentual de declividade for 5% ou mais, 0,4 para declividade entre 3,5 e 4,5 %, 0,3 para declividade entre 1 a 3 % e 0,2 em terrenos uniformes ou com declividade inferior a 1%.

Os valores de λ e θ foram derivados do modelo de elevação DEM produzido a partir de imagens de satélite e outras fontes de informação. Para determinação de λ foi usado o método proposto por Moore & Burch (Eq. 24) (Da Silva, Alvares e Watanabe, 2011).

$$\lambda = (\text{Acumulação de fluxo} * \text{tamanho da célula}) \quad \text{Eq. 24}$$

Onde:

Acumulação de fluxo = grade de acumulação de fluxo expressa como número de células da grade (prontamente derivada de etapas de processamento delimitação de bacias hidrográficas)

Tamanho da célula = comprimento da célula (m)

O valor da declividade (%) conforme citado acima também foi usado para construção do cenário no que diz respeito ao fator SLP. O resultado extraído do mapa elaborado para a região estudada foi de 2,39%.

A partir do mapa gerado para o Brasil foi obtido o valor de LS específico para coordenada geográfica do cenário trabalhado. Neste caso o LS obtido foi 0,3. Este dado está dentro do intervalo de LS no qual está mais da metade do território brasileiro, conforme Tabela 13.

Tabela 13. Percentual de ocorrência de cada classe de LS no território brasileiro.
Fonte: da Silva *et al*, 2011.

Intervalo de LS	Percentual (%)
< 1	53.6
1	13.5
1 -10	23.6
10 - 50	7.8
50 - 100	1.1
> 100	0.4

O fator de erodibilidade do solo (fator K) também foi extraído do mesmo estudo. Para a camada K, os autores consideraram o mapa do solo digital do IBGE (2001 e 2007). Além disso, usaram uma base de dados de perfil do solo organizada por (Cooper *et al.*, 2005) para todo o território brasileiro. A erodibilidade (Fator k) foi calculada indiretamente através do método proposto por Bouyoucos (1935) (Eq.25):

$$\text{Fator K} = ((\text{areia} + \text{silte}) / (\text{argila}))/100 \quad \text{Eq. 25}$$

Onde a erodibilidade é expressa em $\text{thMJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ e os atributos de textura do solo são expressos em g/kg (Da Silva, Alvares e Watanabe, 2011).

O fator K obtido para a região estudada foi de 0,02. A Figura 22 apresenta a distribuição do fator de erodibilidade no Brasil, que pode ser dividida em 5 classes (Tabela 14). O solo utilizado no estudo é classificado como fortemente erodível tendo a mesma classificação de cerca de 20% dos solos brasileiros. O fator USLEP foi padronizado em 0,5 conforme proposto por (Galdino *et al.*, 2003) para a cultura de soja em região da bacia do Alto Taquari, MS.

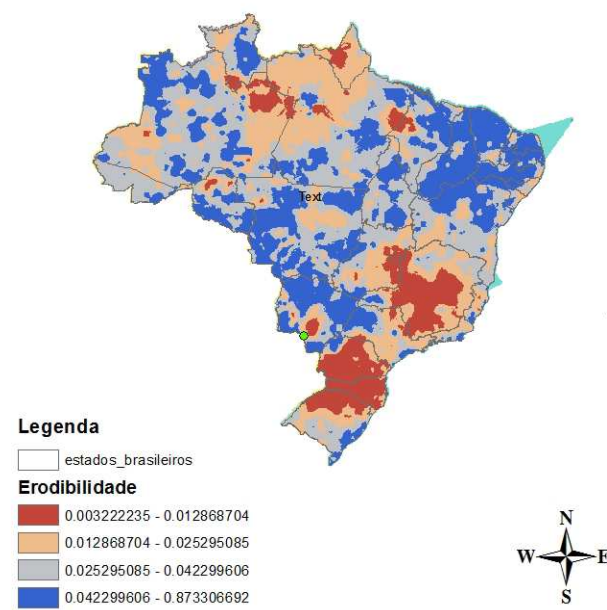


Figura 22. Fator K Erodibilidade Fonte: adaptado (da Silva *et al.*, 2011)

Tabela 14. Classes de erodibilidade do solo (da Silva *et al.*, 2011)

Classes Erodibilidade	%
Nula	6
Fraca	18
Moderada	23
Forte	20
Muito Forte	33

Para os parâmetros AFIELD e HL utilizou-se os valores padronizados nos cenários desenvolvidos pela USEPA, 10 para AFIELD e 354 para HL.

A tabela 15 apresenta os principais parâmetros da cultura escolhida para testar o modelo, no caso específico a soja.

Tabela 15. Parâmetros específicos da cultura soja, Dourados MS.

Parâmetro	Valor	Fonte/ Observações
INICRP	1	Simulação inicia antes da data de emergência da soja
ISCOND	3	3 = resíduo.
NDC	1	soja
NCPDS	10	Soja: cultura anual; período de 10 anos
CINTCP	0,2	Suárez, 2005
AMXDR	30	Embrapa, 2004
COVMAX	100	
ICNAH	3	3 = resíduo
EMD	15/12	
HAM	01/03	
MAD	14/04	
WFMAX	0	Não necessário para CAM=2 (aplicação foliar)
HTMAX	80	
NUSLEC	5	Bertoni e Lombardi Neto, 2012

INICRP = Cultura inicial, ISCOND = Condição inicial da superfície da cultura, NDC = Número de culturas na simulação, NCPDS = Número de períodos de cultura, CINTCP = Capacidade máxima de interceptação da cultura, AMXDR = Comprimento máximo da raiz (cm), COVMAX = Máximo de cobertura aérea do dossel (%), ICNAH = Condição da cultura depois da data de colheita, EMD = Data da emergência, HAM = Data da maturação, MAD = Data da colheita, WFMAX = Peso seco máximo do dossel, HTMAX = Altura máxima do dossel (cm), NUSLEC= Número de fatores C.

O solo da fazenda experimental é um latossolo vermelho distrófico típico de textura média, que pode ser classificado como grupo A (Sartori *et al*, 2005a), o que indica um valor de CN igual a 77 (Manual do PRZM) (Tabela 16).

Tabela 16. Parâmetros sincronizados com as datas da cultura soja (preparo do solo, plantio, desenvolvimento e colheita).

Parâmetro	Data				
	11/10	11/12	11/01	11/02	14/04
CN	77	77	77	77	77
USLEC	0,012	0,010	0,0420	0,042	0,022
MNGN	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

CN= número da curva de escoamento superficial; USLEC= fator C; MNGN= Coeficiente de rugosidade de *Manning*

O último bloco de informações diz respeito às características do solo latossolo vermelho distrófico. Esses solos são derivados de siltitos e argilitos do Grupo Bambuí, com influência de arenitos da Formação Urucuia. São solos de textura média, quase arenosa, com baixo grau de flocculação nos horizontes mais superficiais, a fração areia na maioria das amostras é superior a 700 g/kg, havendo predomínio de areia fina nesses solos, conjunto de características que os torna susceptíveis à erosão, mesmo em relevo plano e suave ondulado. Em geral, esses solos são acentuadamente drenados (EMBRAPA, 2013). Os dados específicos deste tipo de solo utilizados na construção do cenário PRZM, Tabela 17, foram retirados do Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento da EMBRAPA Meio Ambiente n°52 (Pessoa *et al.*, 2009). O valor do conteúdo inicial de água adotado foi o mesmo da capacidade de campo, recomendação do programa no caso de indisponibilidade deste dado.

Tabela 17. Dados de latassolo vermelho distrófico usados na construção do cenário soja para os 6 horizontes previstos. CORED= 120 cm (Pessoa *et al.*, 2009).

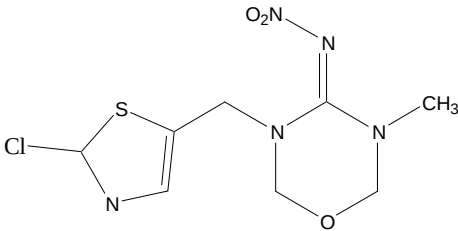
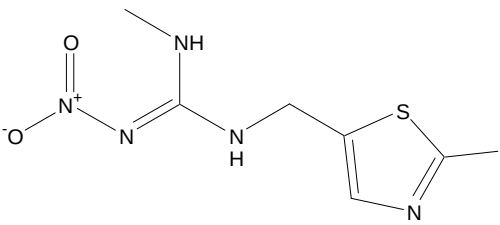
Parâmetro	H1	H2	H3	H4	H5	H6
THKNS, cm	20	20	20	20	20	20
BD, g/cm ³	1,28	1,44	1,25	1,13	1,12	1,04
THETO, cm ³ /cm ³	0,268	0,204	0,198	0,197	0,210	0,172
DPN, cm	1	2	2	2	3	5
THEFC, cm ³ /cm ³	0,268	0,204	0,198	0,197	0,210	0,187
THEWP, cm ³ /cm ³	0,155	0,167	0,173	0,175	0,169	0,172
OC, %	0,94	0,85	0,65	0,6	0,5	0,45

THKNS= Espessura do horizonte (cm); Densidade (BD); Conteúdo inicial de água no solo (THETO); Espessura do compartimento no horizonte (DPN); Capacidade de campo (THEFC); Ponto de murcha (THEWP); Conteúdo de carbono orgânico (OC) (%); CORED=Profundidade total do solo

5.7 Propriedades físico-químicas e de destino ambiental da substância estudada

O ingrediente ativo escolhido para o estudo foi o tiametoxam, um inseticida do grupo químico dos neocotinóides, sub-classe tiacotinil, da família nitroguanidina. Possui ação sistêmica e de contato de amplo espectro no inseto, sendo considerado como um produto perigoso ao meio ambiente (Classe III) de acordo com a classificação do IBAMA. Atualmente este ingrediente ativo está sendo reavaliado pelo IBAMA devido a sua toxicidade para abelhas. O tiametoxam produz no solo a clotianidina (0356%), também um inseticida neocotinóide. Os parâmetros físico-químicos e outras informações relevantes sobre estes compostos estão mostrados na Tabela 18.

Tabela 18. Parâmetros físico-químicos e de destino ambiental do tiametoxam e clodianidina

	Tiametoxam (IUPAC, 2013)	Clotianidina (Usepa, 2010)
	 PM=291.71	 PM=249.7
Nome IUPAC	(EZ)-3-(2-chloro-1,3-thiazol-5-ylmethyl)-5-methyl-1,3,5-oxadiazinan-4-ylidene(nitro)amine	(E)-1-(2-chloro-1,3-thiazol-5-ylmethyl)-3-methyl-2-nitroguanidine
Ponto de ebulição	147 °C	--
Solubilidade	4100 mg/L	327 mg/L
Pressão de vapor	$6,6 \times 10^{-6}$ mPa	$2,8 \times 10^{-8}$ mPa
Meia vida aeróbica solos	50 dias	745 dias
Koc solo	56,2 mL/g	160 mL/g
Metabolismo aeróbico*	8 – 16 dias	662 dias
Meia vida anaeróbico*	24 – 44 dias	81 dias
Hidrólise	Estável a pH 5 e 7 11,5 dias a pH 9	Estável a pH 5, 7 e 9
Fotólise aquática	2,7 dias	341 dias

*Coluna de água

5.8 Método de Aplicação do tiametoxam em soja

Foi considerada aplicação por pulverização (CAM2) de tiametoxam na soja na dose 0,282 kg i.a./ha, parâmetros utilizados no estudo conduzido na fazenda experimental da EMBRAPA por Scorza Junior *et al.* (2010) para estudar o potencial de lixiviação do composto no solo. É importante ressaltar que esta dose é muito maior que a dose mais crítica indicada para o tiametoxam na soja (2 aplicações de 0,027 kg i.a./ha, 30 dias de intervalo) (MAPA, 2013).

5.9 Cenário Americano de tiametoxam em soja

O cenário americano usado para comparar aos dados brasileiros está disponível na plataforma EXPRESS (MS soybean MLRA 134), com dados de 1981 a 1990, da estação meteorológica WBAN03940 na cidade Jackson, capital do estado de Mississippi (32°19' N 90°5' W, 94 m acima do nível do mar). Apenas dados dos últimos 10 anos foram utilizados neste estudo. A Tabela 19 apresenta um resumo das características meteorológicas da estação.

Tabela 19. Resumo das características meteorológicas estação WBAN03940.

Ano	Prec.	Evap.	T (°C)	V.v.	Rad.	Eto	P.A.	Umid.	Neb.	Aerosol
1981	118,4	165,2	17,9	3,3	404,3	127,2	100,6	62,6	4,6	1,20E-01
1982	192,2	153,2	18,4	3,7	382,8	120,2	100,6	67,5	5,1	1,61E-01
1983	186,2	148,9	16,9	3,6	385,3	117,2	100,5	66,4	4,8	1,91E-01
1984	126,4	158,7	17,9	3,6	396,0	123,5	100,6	64,7	4,7	1,50E-01
1985	120,3	153,4	17,5	3,6	391,0	120,6	100,6	66,1	5,0	1,28E-01
1986	127,0	161,4	18,4	3,4	400,6	126,4	100,6	64,1	4,9	1,30E-01
1987	120,1	160,0	17,8	3,2	405,2	127,0	100,5	62,0	4,5	1,22E-01
1988	111,8	161,8	17,8	3,3	403,3	127,1	100,7	62,3	4,7	1,21E-01
1989	133,5	137,3	17,5	3,4	372,9	111,9	100,7	67,9	5,5	1,27E-01
1990	137,3	158,0	18,8	3,2	403,0	126,2	100,7	64,5	4,8	1,23E-01

Prec. = precipitação anual (cm), Evap. = Pan evaporação anual (cm), T = temperatura média anual do ar, V.v. = velocidade do vento (m/s), Radiação (ly/dia), ETo = Evapotranspiração potencial (cm), P.A. = pressão atmosférica (kPa), Umid. = umidade relativa do ar (%), nebulosidade diária (décimos), Aerosol (densidade óptica).

No cenário americano, o perfil do solo é constituído de 6 horizontes, semelhante ao brasileiro, porém o cenário americano apresentou maior número de informações no que diz respeito ao fator C e coeficiente de rugosidade de *manning* sincronizados às datas de desenvolvimento das culturas.

5.10 Arquivo supervisor de Execução do PRZM

Os arquivos de supervisão do PRZM são gerados para indicar que módulos serão usados na avaliação, o número de substâncias avaliadas, o nome do arquivo contemplando o cenário usado e a estação meteorológica, entre outras funcionalidades. Os arquivos de supervisão foram gerados para o cenário brasileiro e o cenário americano. Os dados químicos usados em ambos os cenários foram baseados nos mesmos resultados de estudo.

A Figura 23 mostra os dados usados na simulação brasileira a título de exemplificação.

```

1 PRZM ON
2 VADOFT OFF
3 MONTE CARLO OFF
4 TRANSPORT ON
5 ***
6 *** Express PRZM 3.12.2 Zones
7 PRZM ZONES 1
8 ENDRUN
9 ***
10 *** Input files
11 METEOROLOGY 1 E83702.DVF
12 PRZM INPUT 1 Douradossoja.INP
13 ***
14 *** Output files
15 TIME SERIES 1 Douradossoja.ZTS
16 PRZM OUTPUT 1 Douradossoja.OUT
17 ***
18 *** Scratch files
19 PRZM RESTART RESTART.PRZ
20 ENDFILES
21 ***
22 *** Global records
23 START DATE 010102
24 END DATE 311211
25 NUMBER OF CHEMICALS 2
26 PARENT OF 2 1
27 ENDDATA
28 ***
29 *** Display records
30 ECHO 6
31 TRACE OFF

```

Figura 23. Arquivo de supervisão de execução do PRZM para o cenário brasileiro.

5.11 Simulações PRZM

Foram simulados no programa PRZM quatro conjuntos de dados: cenário americano completo MRLRA-134 (dados dos EUA), cenário brasileiro completo (dados do Brasil), cenário brasileiro parcial (do solo e da soja do Brasil e

meteorológicos americano), e cenário americano parcial (do solo e da soja dos EUA e meteorológicos brasileiros). Os resultados destas simulações foram avaliados em termos do balanço hidrológico e das concentrações estimadas no solo.

O balanço hidrológico considerou a precipitação como a variável de entrada e lixiviação, evapotranspiração e escoamento superficial como as variáveis de saída. É importante considerar que para os cenários que usam o mesmo conjunto de dados meteorológicos, como cenário americano completo e cenário brasileiro parcial, a variável de entrada precipitação apresenta o mesmo resultado. Os resultados da precipitação nos cenários avaliados estão representados nas Figuras 24 e 25.

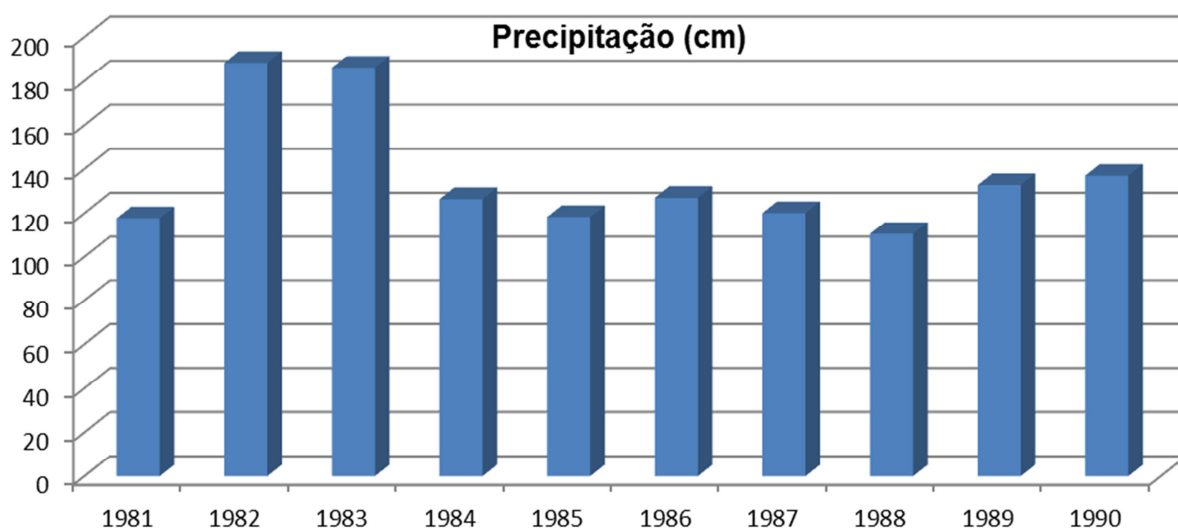


Figura 24. Entrada do balanço hídrico dados meteorológicos americanos.

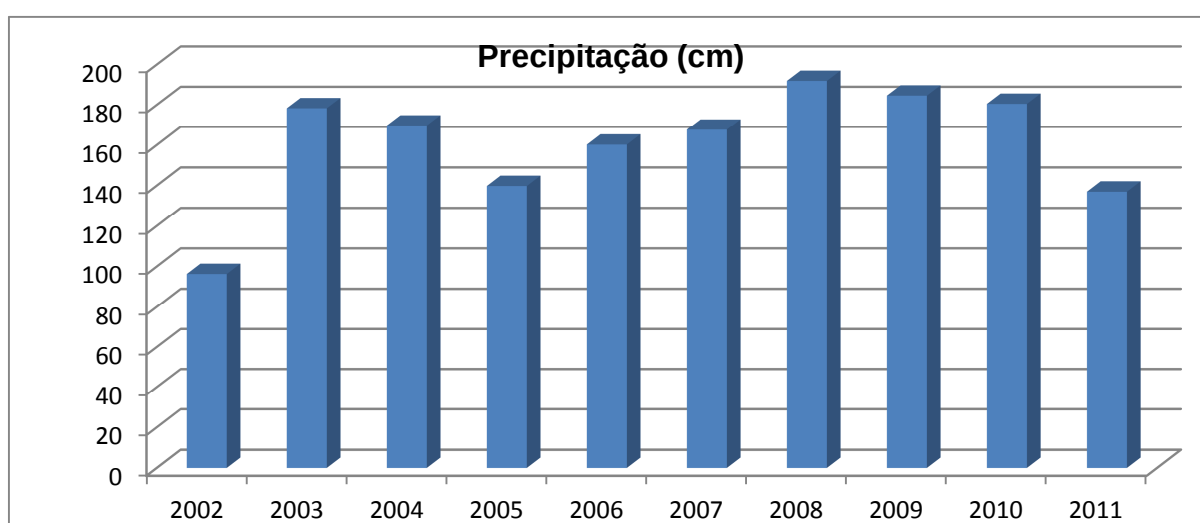


Figura 25. Entrada do balanço hídrico dados meteorológicos brasileiros.

Observa-se que os cenários que utilizaram os dados meteorológicos brasileiros apresentaram maior quantidade de entrada de água quando comparado aos cenários que usaram os dados meteorológicos americanos.

Os dados de saída do balanço hídrico são formados pelo conjunto de informações a partir do lixiviado na coluna do solo, evapotranspirado e do escoamento superficial. Neste caso será apresentado um resultado para cada cenário, pois ao contrário da variável de entrada, vários aspectos influenciam os resultados obtidos. As Figuras 26 a 29 apresentam os resultados de cada cenário avaliado.

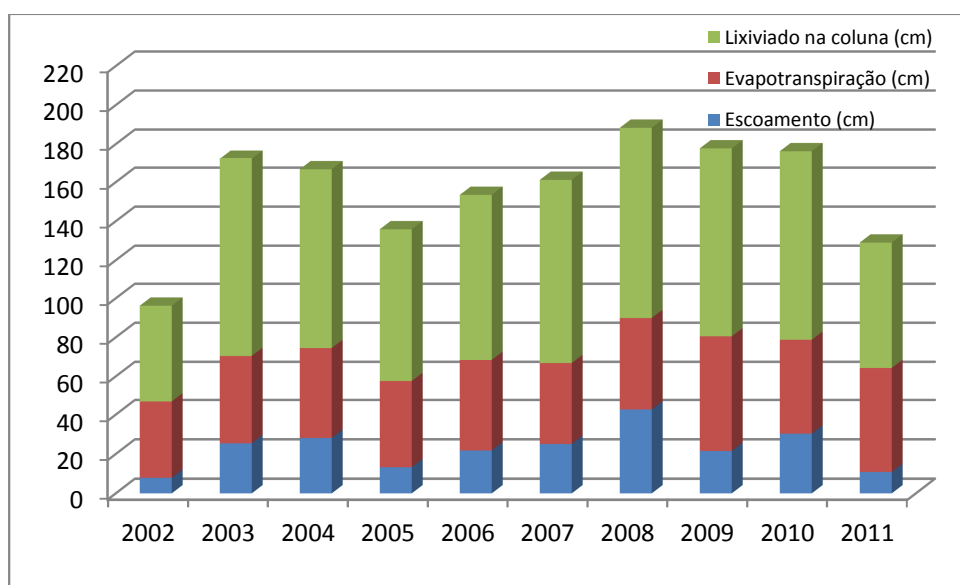


Figura 26. Saída do balanço hídrico do cenário brasileiro completo, na cultura de soja em Dourados/MS tratada com o agrotóxico tiametoxam.

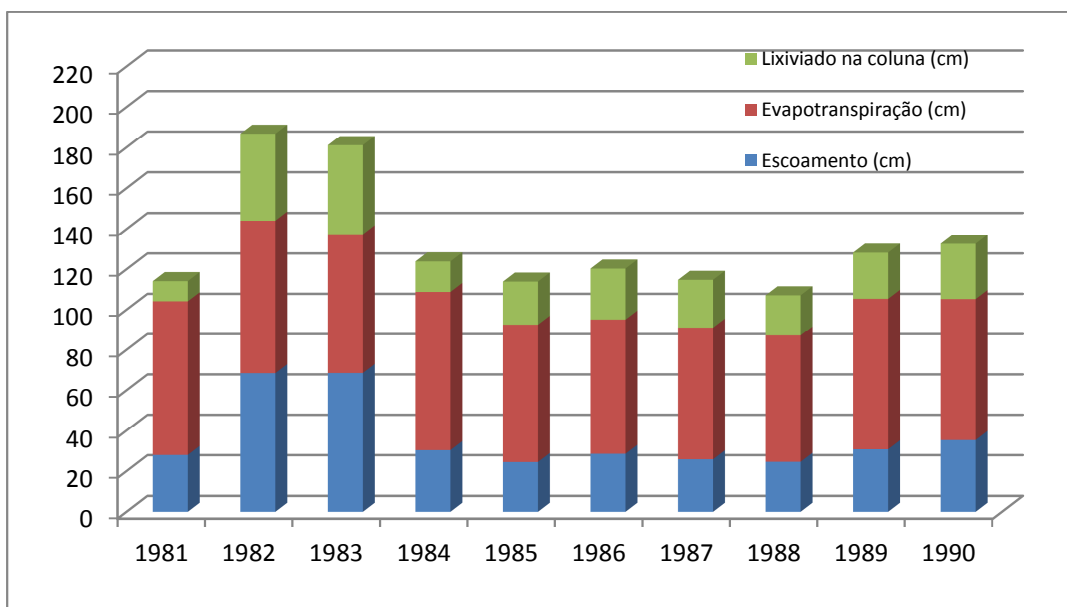


Figura 27. Saída do balanço hídrico do cenário americano completo, na cultura de soja no Mississippi tratada com o agrotóxico tiametoxam.

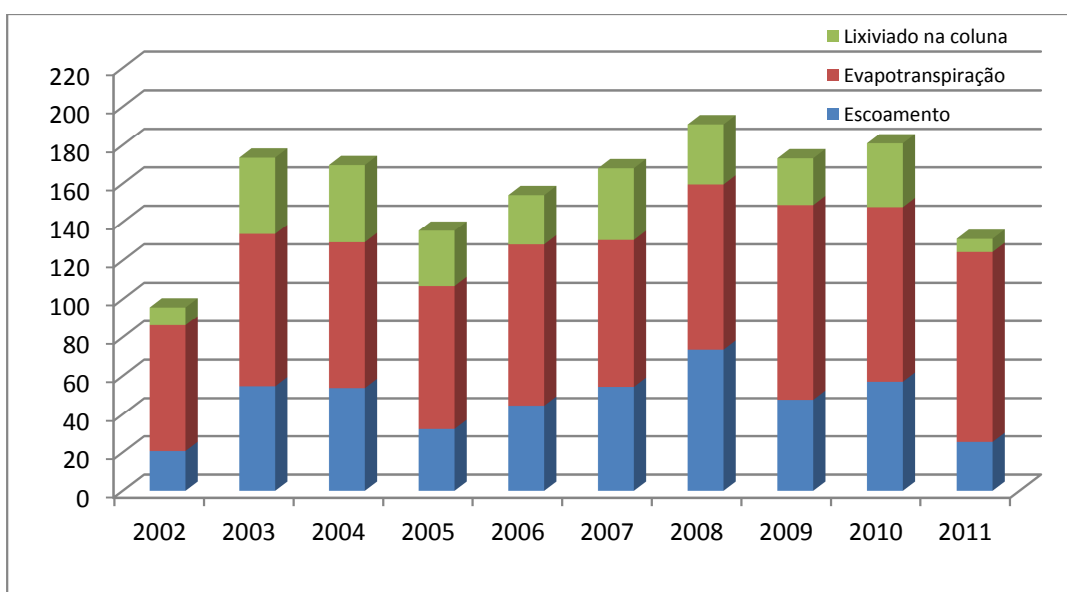


Figura 28. Saída do balanço hídrico do cenário americano parcial, na cultura de soja no Mississippi, com dados meteorológicos brasileiros tratada com o agrotóxico tiametoxam.

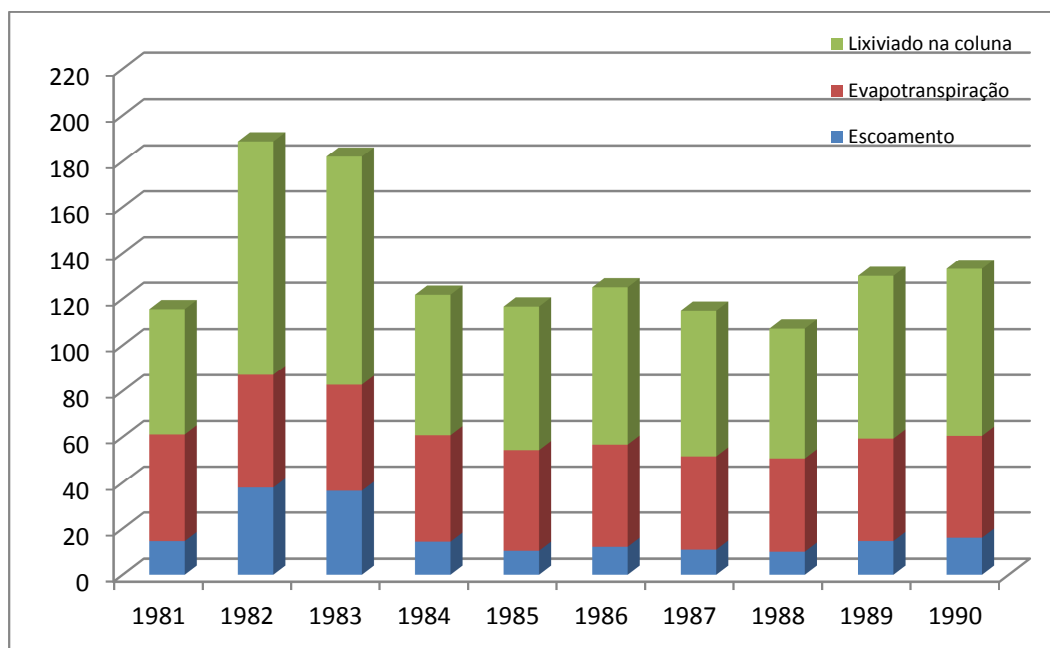


Figura 29. Saída do balanço hídrico cenário brasileiro parcial, na cultura soja em Dourados/MS, com dados meteorológicos brasileiros tratada com o agrotóxico tiametoxam.

Os cenários que usaram os dados da cultura soja e de solo do Brasil apresentaram maior contribuição da variável de saída lixiviação na coluna de solo. Esta característica influenciará diretamente a concentração final do agrotóxico lixiviado, tendendo a ser maior nestes cenários. Nos cenários que usaram os dados meteorológicos americanos, a evapotranspiração e escoamento superficial para o balanço hidrológico são mais preponderantes.

A Tabela 20 apresenta a comparação entre os resultados obtidos para as concentrações de tiametoxam em duas regiões do solo abaixo da zona da raiz (que em todos os casos corresponde a 30 cm) e abaixo do CORED definido no cenário (120 cm para o cenário brasileiro e 155 cm para o americano) (Figura 30) durante todo o período da simulação.

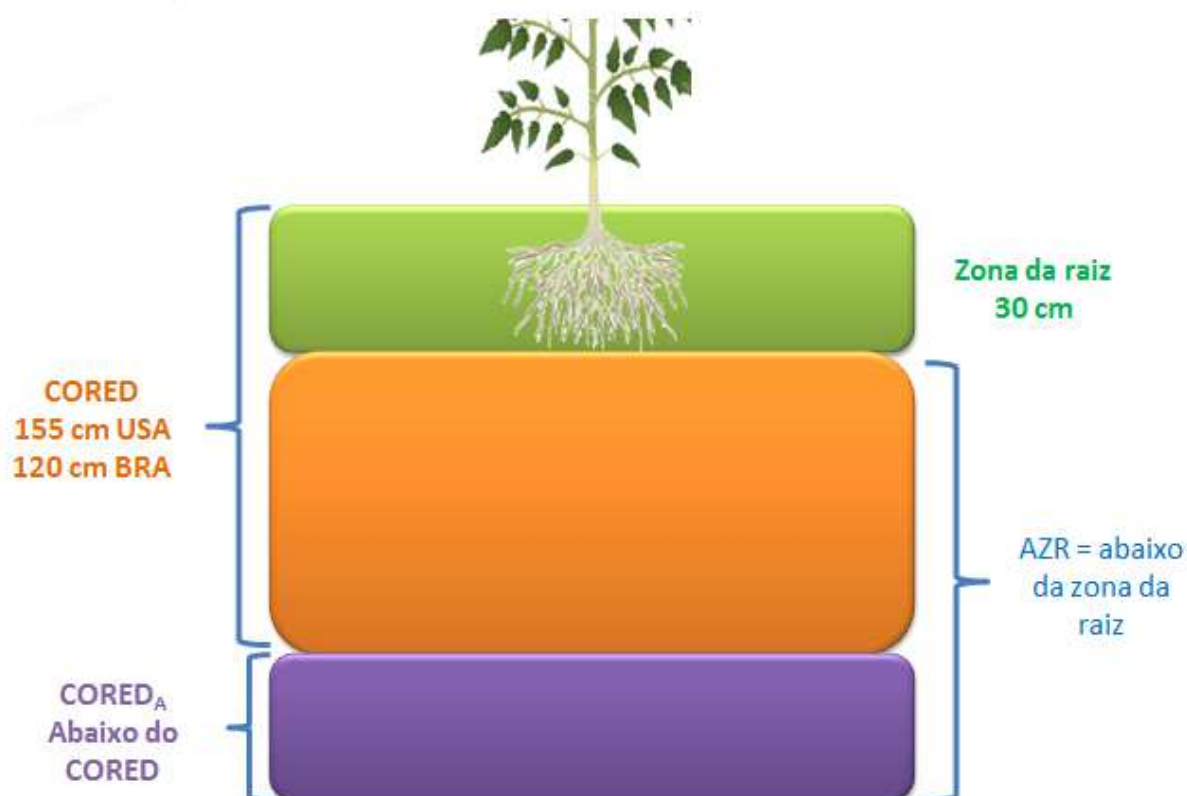


Figura 30. Esquema exemplificando as zonas onde foram determinadas as concentrações no PRZM.

As condições meteorológicas afetam pouco a taxa de lixiviação quando comparados às características do solo e desenvolvimento da cultura. O cenário brasileiro completo foi responsável pelas concentrações mais elevadas de tiametoxam abaixo da zona da raiz (> 30 cm da superfície do solo) (4.5 a $17.7 \mu\text{g/L}$). Estas concentrações diminuem consideravelmente quando se avalia os dados de concentração abaixo dos horizontes estudados (> 120 cm) (0 a $8,47\text{E-}05 \mu\text{g/L}$). O cenário brasileiro parcial, que usou dados climáticos americanos, foi o segundo a apresentar valores mais elevados. O estudo conduzido na fazenda experimental da EMBRAPA (Scorza Junior *et al*, 2010), demonstrou concentração do tiametoxam diminuir significativamente entre 0 e 30 cm (63.4 a $1.3 \mu\text{g/kg}$), não sendo mais detectado abaixo de 30 cm ($<0.1 \mu\text{g/kg}$) em duas das três datas avaliadas em 2009, enquanto a simulação mostrou presença de tiametoxam nesta região.

Tabela 20. Total do lixiviado ($\mu\text{g/L}$) de tiametoxam nos diversos cenários por ano simulado.

Ano	Americano completo		Brasileiro completo		Americano parcial		Brasileiro parcial	
	AZR	CORED _A	AZR	CORED _A	AZR	CORED _A	AZR	CORED _A
1	6,97E-01	2,58E-11	1,74E-05	0,00E+00	1,34E-04	0,00E+00	1,87E-02	2,24E-17
2	4,66E+00	1,75E-03	1,42E+01	2,61E-06	1,81E+00	4,84E-04	5,84E+00	3,32E-06
3	1,31E+00	1,36E-01	5,60E+00	4,41E-05	2,44E+01	6,37E-03	1,34E+01	9,97E-05
4	3,56E+00	3,13E-03	5,65E+00	1,79E-05	4,78E+00	6,97E-03	5,56E+00	2,99E-05
5	3,13E+00	1,36E-04	1,12E+01	1,21E-05	9,10E-01	5,41E-03	6,84E+00	4,80E-06
6	5,38E+00	8,60E-05	1,77E+01	7,62E-05	1,53E+00	2,71E-02	2,82E+00	6,43E-07
7	2,58E-01	1,83E-02	1,24E+01	8,47E-05	3,23E+00	3,42E-03	1,30E+01	3,86E-06
8	1,62E+00	1,19E-03	4,55E+00	3,31E-05	9,02E+00	1,53E-04	7,02E+00	8,66E-07
9	1,41E+00	1,04E-03	1,22E+01	6,06E-05	2,9E+00	1,44E-02	7,11E+00	1,26E-06
10	1,88E+00	3,56E-03	8,34E+00	3,18E-05	2,25E+00	3,99E-03	1,77E+01	9,96E-06

AZR. = Abaixo da zona da raiz (> 30 cm), CORED_A= Abaixo do CORED (> 120 cm no Brasil e >155 cm nos EUA)

As quantidades de tiametoxam relacionadas ao processo de erosão e ao escoamento superficial são mais concordantes entre os cenários do que os valores obtidos para lixiviação (Tabela 21). Os resultados das concentrações de tiametoxam disponíveis para erosão na maioria dos casos tende a zero. No cenário americano completo foi encontrada a maior concentração do agrotóxico tiametoxam disponível para erosão, o que representou 0,04% da dose aplicada. Da mesma forma, o cenário americano completo se obteve 5,87% da dose aplicada do agrotóxico disponível para o escoamento superficial. No cenário brasileiro completo, as concentrações de tiametoxam disponíveis para o escoamento variam entre 0,01 e 1,52% da dose aplicada. Os dados de lixiviação e de massa de tiametoxam disponível para erosão e escoamento foram também estimados para o metabólito

clotiadina nos cenários avaliados. Os valores obtidos foram muito baixos ($<1,0\text{E-}8$), e seu impacto no ambiente pode ser considerado nulo.

As quantidades de tiametoxam relacionadas ao processo de erosão e ao escoamento superficial podem ser usadas pelo EXAMS (Exposure Analysis Modeling System) para obtenção das concentrações na coluna de água que poderão afetar organismos liméticos e bentônicos.

Tabela 21. Massa total (kg/ha) de tiametoxam disponíveis para erosão e escoamento superficial por ano simulado.

Ano	Americano completo		Brasileiro completo		Americano parcial		Brasileiro parcial	
	Erosão	Esco.	Erosão	Esco.	Erosão	Esco.	Erosão	Esco.
1	3,73E-07	3,49E-04	9,97E-08	1,26E-04	3,68E-06	1,85E-03	7,65E-07	9,53E-04
2	1,01E-04	1,66E-02	1,51E-06	1,47E-03	1,66E-06	1,58E-03	2,32E-06	2,48E-03
3	1,22E-06	1,89E-03	5,29E-06	4,30E-03	4,17E-05	1,03E-02	2,29E-06	2,31E-03
4	5,87E-07	1,61E-03	2,89E-06	3,19E-03	7,48E-06	4,69E-03	8,78E-09	1,95E-05
5	3,09E-06	1,24E-03	1,97E-06	2,12E-03	6,68E-06	2,36E-03	4,65E-08	8,12E-05
6	6,51E-07	7,69E-04	7,23E-07	8,23E-04	5,80E-07	1,13E-03	3,82E-07	5,23E-04
7	4,32E-06	1,26E-03	1,50E-06	1,53E-03	1,45E-05	4,68E-03	1,63E-06	1,79E-03
8	4,41E-05	9,12E-05	3,57E-06	3,23E-03	8,44E-07	9,01E-04	1,37E-06	1,54E-03
9	4,41E-05	9,12E-03	1,35E-08	2,35E-05	5,82E-06	3,98E-03	1,65E-07	2,26E-04
10	1,05E-05	5,92E-03	1,24E-06	1,59E-03	3,60E-07	1,28E-03	2,32E-07	3,45E-04

Esco. = Escoamento

6. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

Os processos que contribuem para a distribuição dos agrotóxicos no meio ambiente, como escoamento superficial, lixiviação, sorção e degradação, são críticos para determinar o nível destas substâncias nos diversos compartimentos ambientais. A aplicação de modelos matemáticos e ferramentas informatizadas são importantes para subsidiar a tomada de uma decisão cientificamente embasada para o registro de um produto, e identificar a necessidade de aprofundamento do conhecimento sobre o comportamento ambiental dos agrotóxicos.

O PRZM foi escolhido para avaliação de cenários brasileiros por se tratar de um modelo fundamental para o desenvolvimento de análises voltadas para o ambiente hídrico. Apesar de não simular as concentrações bentônicas e liméticas na coluna de água, ele simula o transporte do agrotóxico na zona da raiz dado que prepara as futuras simulações relacionadas a estes aspectos.

A construção de bancos de dados com informações meteorológicas, bancos de cultura e dados relativos a solo é fundamental para o desenvolvimento deste processo. No que diz respeito aos aspectos meteorológicos os dados informados pelo INMET permitiu a construção de um banco de informações praticamente completo e de boa qualidade. A ausência de dados para determinados períodos foi contornada, seja pela estimativa de valores usando dados próximos ao período da mesma estação ou pela substituição do dado de uma estação pelo de outra mais próxima. O dado com a pior qualidade de informações diz respeito ao dado de aerossol, que não estava disponível na base de dados do INMET, sendo necessário o uso da base de dados da NASA. Porém, este parâmetro estava disponível para poucas estações, e com periodicidade mensal e não diária como necessária para modelo. Porém tal limitação não trouxe consequências significativas aos resultados finais.

O desenvolvimento da plataforma EXPRESS BRA 1.0 facilita a inserção de dados e interpretação de resultados dos cenários de avaliação de risco do modelo PRZM. O conjunto de informações relativas às áreas de cultivo e os dados meteorológicos já estão disponíveis no programa. Dados adicionais para os cenários com informações de solo e desenvolvimento das culturas no Brasil devem ser elaborados para ampliar sua aplicação e de forma a possibilitar a sua aplicação em avaliação de risco ambiental para registro de agrotóxicos no Brasil. As informações

especializadas relativas às culturas facilitam o acesso à informação e a visualização dos dados a serem trabalhados.

Alguns trabalhos classificam os solos brasileiros de acordo com o método de número da curva (SCS), além de *shapes* com informações especializadas relativas a equação universal da perda de solos. Estes parâmetros estão disponíveis para todo o Brasil, o que facilita a construção dos cenários. Informações relativas ao padrão de desenvolvimento das culturas podem ser encontradas nas bases de dados da EMBRAPA, porém informações caracterizando os horizontes de todos os solos brasileiros não estão disponíveis. Além disso, os dados de coeficiente de rugosidade de *manning* e fator C estão disponíveis para poucos períodos de desenvolvimento da cultura. A comparação da simulação entre os dados do cenário soja contemplando as condições específicas do Brasil quando comparada ao cenário padrão americano demonstraram que o Brasil apresenta maior entrada de fluxo de água a partir da precipitação, e maior lixiviação do tiametoxam. As características do solo e os dados da cultura foram considerados fundamentais nesta estimativa. O PRZM também estima as concentrações do ingrediente ativo disponíveis para a erosão e escoamento superficial. Estes valores podem ser usados como dados de entrada no programa EXAMS que estima as concentrações liméticas e bentônicas na coluna de água.

Este projeto permitiu a construção de uma plataforma de dados para a condução de avaliação de risco ambiental usando o PRZM. É essencial que o Express BRA 1.0 seja alimentado com dados adicionais que permitam a simulação de cenários diversos de modo a auxiliar no processo de registro de agrotóxicos no Brasil.

Uma análise de sensibilidade do modelo PRZM também deve ser considerada como uma perspectiva futura para implementação do modelo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBINATI, A. C. L.; MOREIRA, E. L. T.; ALBINATI, R. C. B.; CARVALHO, J. V.; SANTOS, G. B.; LIRA, A. D. Toxicidade aguda do herbicida roundup® para piauçu ("*Leporinus macrocephalus*"). **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 8, n. 3, 2007. ISSN 1519-9940. Disponível em: <<https://desenvrepositorio.ufba.br/ri/bitstream/123456789/1938/1/877-3465-2-PB.pdf>>. Acesso em: 20 junho 2013.
- ALLEN, R. G. ; PEREIRA, L. S. ; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration- Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **FAO, Rome**, v. 300, p. 6541, 1998. Disponível em: <<http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/fao56.pdf>>. Acesso em: 16 junho 2013.
- BARBOSA, R. B. F.; GABAS, S. G.; LASTORI G.; CAVAZZANA, G. H.; DE SOUZA, A. Determinação do potencial de lixiviação (índice LIX) de herbicidas empregados em culturas no município de São Gabriel do Oeste-MS. **Águas Subterrâneas**, 2011. ISSN 2179-9784. Disponível em: <<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23131/15246>>. Acesso em: 10 junho 2013.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8 ed. São Paulo: Ícone, 2012. 355 p.
- BRASIL. **Lei nº 7802, de 11 de julho de 1989**. Dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a propaganda comercial, a utilização, a importação, a exportação, o destino final de resíduos e embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 1989. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L7802.htm>. Acesso em: 25 maio 2013.
- BRASIL. **Decreto nº 4074, de 4 de janeiro de 2002**. Regulamenta a Lei no 7.802, de 11 de julho de 1989, que dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a propaganda comercial, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 2002. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4074.htm>. Acesso em: 5 maio 2013.

BRITTO, F. B.; DO VASCO, A. N.; PEREIRA, A. P. S.; MÉLLO, A. V. Herbicidas no alto Rio Poxim, Sergipe e os riscos de contaminação dos recursos hídricos. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 2, p. 390-398, 2012. Disponível em: <<http://www.ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/1725/697>>. Acesso em: 12 jul. 2013.

BRITTO, J. **A aplicação da avaliação do risco como ferramenta para o registro, a autorização e gerenciamento do uso de agrotóxicos no Brasil**. 2009. (Especialização). Gestão de Agronegócios, Universidade de Brasília, Brasília.

BROUWER, C.; HEIBLOEM, M. Irrigation water management: Irrigation water needs. **Training manual**, v. 3, 1986. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/s2022e/s2022e00.HTM>>. Acesso em: 15 maio 2013.

CANUTO, T. G; GAMA, A. F.; SÁ BARRETO, F. M.; ALENCAR NETO, M. F. Estimativa do risco potencial de contaminação por pesticidas de águas superficiais e subterrâneas do município de Tianguá-CE, com aplicação do método de goss e índice de GUS. **Águas Subterrâneas**, 2011. ISSN 2179-9784. Disponível em: <<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23083/15198>>. Acesso em: 17 junho 2013.

CASTRO, N. R. A.; RIGITANO, R. L. O.; SCORZA JÚNIOR, R. P. Avaliação do simulador MACRO (versão 5.0) para predição da lixiviação do inseticida tiametoxam em duas classes de solos. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 16, 2007. ISSN 0103-7277. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/pesticidas/article/view/7474/5475>>. Acesso em: 10 junho 2013.

COOPER, M.; MENDES, L. M. S.; SILVA, W. L. C.; & SPAROVEK, G. A national soil profile database for Brazil available to international scientists. **Soil**

- Science Society of America Journal**, v. 69, n. 3, p. 649-652, 2005. ISSN 1435-0661.
- COUTINHO, H. L. C., LEITE, A. A. S., L.C., P., CERDEIRA, A. L., FILIZOLA, H. F., SILVA, E. F., & GOMES, M. A. F. **Análise espacial do potencial de lixiviação de herbicidas em áreas de afloramento do Aquífero Guarani na Alta Bacia do Rio Taquari, MS.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica: 195 a 214 p. 2008. Disponível em: <<http://www.riosvivos.org.br/arquivos/1934241170.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2013.
- DA SILVA, A. M.; ALVARES, C. A.; WATANABE, C. H. **Natural Potential for Erosion for Brazilian Territory.** 2011. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/soil-erosion-studies/natural-potential-for-erosion-for-brazilian-territory>>. Acesso em: 18 março 2013.
- DE CAMPOS MORAES, D. A.; ZIMBACK, C. R. L.; SPADOTTO, C. A. Espacialização das Estimativas de Contaminação de Águas Subterrâneas por Tebuthiuron. **Irriga**, v. 17, n. 3, 2012. ISSN 1808-8546. Disponível em: <http://www.sgte.embrapa.br/institucional/publicacao/201208_Irriga.pdf>. Acesso em: 15 maio, 2013.
- DE CARVALHO ROSA, F.; PINHEIRO, A.; DA SILVA, M. R. **Avaliação do potencial de lixiviação de agroquímicos na bacia do Itajaí.** XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos: 1-18 p. 2007. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/f7f8c4bc6c27e1b7c5a2aed3cf114fcd_2054c5205dd0131c2bbc34975eb1f5f5.pdf>. Acesso em: 17 julho 2013.
- DE SOUSA, J. S. C. PROCAL_ETO: Programa computacional para cálculo da ETo pelo método de penman-monteith. **Irriga**, v. 1, n. 01, 2012. ISSN 1808-8546. Disponível em: <<http://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/460/257>>. Acesso em: 16 julho 2013.
- EUROPEAN UNION - EU About Macro. 2010a. Disponível em: <<http://focus.jrc.ec.europa.eu/gw/index.html>>. Acesso em: 10 maio 2013.
- EUROPEAN UNION - EU About Pearl. 2010b. Disponível em: <<http://focus.jrc.ec.europa.eu/gw/index.html>>. Acesso em: 10 maio 2013.

- EUROPEAN UNION - EU About PELMO. 2010c. Disponível em: <<http://focus.jrc.ec.europa.eu/gw/index.html>>. Acesso em: 10 maio 2013.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual Irriga LP – TIGRE**. 2004.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA Latossolos vermelhos distróficos com textura média., 2013. Disponível em: <<http://www.bndes.cnpm.embrapa.br/textos/latossolos3.htm>>. Acesso em: 15 junho 2013.
- FEDERAL INSETICIDE, FUNGICIDE AND RODENDICIDE ACT - FIFRA. **40 CFR Parts 152 and 158 pesticides; Data requirement for conventional chemicals**, 2005.FUNCTIONAL TOOLS FOR PESTICIDE RISK ASSESSMENT AND MANAGEMENT –FOOTPRINT.**State-of-the-art review on approaches to environmental risk assessment for pesticides** 2006. Disponível em: <http://www.eu-footprint.org/downloads/FOOTPRINT_DL3.pdf> . Acesso em: 10 maio 2013.
- FINZIO, A., CALLIERA, M. and VIGHI, M. Rating System for Pesticide Risk Classification on Different Ecosystems, **Ecotoxicol. Environ. Saf.**,v. 49 (3), 262-274, 2001. Disponível em: <<http://www.mesadeoleaginosos.org.uy/infoInteres/07julio/material/Rating%20Systems%20for%20Pesticide%20Risk%20Classification.pdf>>. Acesso em: 10 junho 2013.
- GALDINO, S.;RISSO, A.; SORIANO, B. M. A.; VIEIRA, L. M.; PADOVANI, C. R.; POTT, A.; MELO, E. C.;ALMEIDA JÚNIOR, N. Perdas de solo na Bacia do Alto Taquari. **Embrapa Pantanal. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 44, 2003. Disponível em: <<http://www.cpap.embrapa.br/publicacoes/online/BP44.pdf>>. Acesso em: 15 abril 2013.
- GOMEZ, J. D. P. **Estimativa de erosão pela Equação Universal de Perda de Solo (USLE) e transferência de sedimentos para todo território Brasileiro**. 2012. 90f (Mestrado). Solos e Nutrição das Plantas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-25102012-150933/pt-br.php>>. Acesso em: 16 março 2013.

HAAG, R. **Estimativa da distribuição espectral da radiação solar sobre o território brasileiro através de análise multiinstrumental**. 2012. 155 f (Doutorado em Engenharia Mecânica) Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/56588>>. Acesso em: 5 junho 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA **Portaria Normativa nº 84, de 15/10/1996**. Diário Oficial da República Federal do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 1996. Disponível em: <http://servicos.ibama.gov.br/ctf/manual/html/Portaria_84.pdf>. Acesso em: 15 março 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA **Portaria Conjunta nº1 de 29 de março de 2010**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF,, 2010. Disponível em:<<http://www.jusbrasil.com.br/diarios/1592872/pg-90-secao-1-diario-oficial-da-uniao-dou-de-08-04-2010>>. Acesso em: 10 junho 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Avaliação de risco ambiental de agrotóxicos no Ibama**. DIQUA/CGASQ, Brasília, IBAMA, 2012a. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/qualidade-ambiental/avaliacao-de-risco-ambiental-de-agrotoxicos-no-ibama>>. Acesso em: 5 março, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Comunicado**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, p.112, 2012b. Disponível em: <<http://www.in.gov.br/visualiza/index.jsp?data=19/07/2012&jornal=3&pagina=112&totalArquivos=196>>. Acesso em: 24 abril 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA **Portaria nº 6 de 17 de maio de 2012**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 2012c. Disponível em:

<<http://www.in.gov.br/visualiza/index.jsp?data=23/05/2012&jornal=1&pagina=75&totalArquivos=120>>. Acesso em: 15 março 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável – Brasil** 2010a. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/ids/ids2010.pdf>>. Acesso em: 14 julho 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção Agrícola Municipal – Culturas Temporárias e Permanentes – Brasil** 2010b. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2010/PAM2010_Publicacao_completa.pdf>. Acesso em: 14 julho 2013.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY - IUPAC. Benjing, ERA Presentations. 2012. Disponível em: <http://agrochemicals.iupac.org/index.php?option=com_sobi2&sobi2Task=sobi2Details&catid=11&sobi2Id=44>. Acesso em: 01 abril 2013.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY - IUPAC Footprint Pesticides Properties Database. 2013. Disponível em: <<http://sitem.herts.ac.uk/aeru/iupac/373.htm>>. Acesso em: 01 abril 2013.

JEREZ B. J.; PERALTA A. J. M.; B. ALEJANDRO JEREZ M.; TAPIA, F. F.; MEJIAS, B. J.; JEREZ, M. A; ENCINA T. F. **Estudio de las metodologias para la evaluación del riesgo ambiental de plaguicidas.** MINISTERIO DE AGRICULTURA, S. A. Y. G. Santiago, Chile, 2006.

JONES; R., LEAHY; J., MAHONEY, M.; MURRAY, L.; ODENKIRCHEN, E.; PETRIE, R.; STANGEL, C.; SUNZENAUE, I.; VAITUZIS, Z.; WILLIAMS, A. J. **Overview of the Ecological Risk Assessment Process in the Office of Pesticide Programs, U.S. Environmental Protection Agency.** OFFICE OF PREVENTION, Washington, D.C.: 92 p. 2004. Disponível em: <<http://www.epa.gov/espp/consultation/ecorisk-overview.pdf>>. Acesso em: 05 maio 2013.

LOURENCETTI, C.; SPADOTTO, C. A.; SILVA, M. S.; RIBEIRO, M. L. Avaliação do potencial de contaminação de águas subterrâneas por agrotóxicos: comparação entre métodos de previsão de lixiviação. **Agrotóxicos: revista ecotoxicologia e meio ambiente**, v. 15, 2005. Disponível em:

<<http://www.scielo.br/pdf/esa/v14n3/v14n3a10.pdf>>. Acesso em: 07 junho 2013.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA. E ABASTECIMENTO (MAPA).

Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários (AGROFIT). 2013.

Disponível em: <http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principais_agrofit_cons>. Acesso em: 19 maio 2013.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA **Ato no 1, de 2 outubro de 2012.** AGROPECUÁRIA, S. D. D. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 2012. Disponível em: <http://www.lex.com.br/legis_23820822_ATO_N_1_DE_2_DE_OUTUBRO_DE_2012.aspx>. Acesso em: 15 junho 2013.

MARIOT, E.; WEBER, O. L. S.; SPADOTTO, C. A.; CARVALHO DORES, E. F. G. Uso do índice lix na previsão de lixiviação dos pesticidas metolaclo, endossulfam, clorpirifós, carbendazim e diuron. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 19, 2010. ISSN 0103-7277. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/pesticidas/article/view/16555/11039>>. Acesso em: 4 março 2013.

MILHOME, M. A. L., SOUSA, D. O. B., LIMA, F. A. F., NASCIMENTO, R. F. Avaliação do potencial de contaminação de águas superficiais e subterrâneas por pesticidas aplicados na agricultura do Baixo Jaguaribe, CE. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 03, p. 363-372, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v14n3/v14n3a10.pdf>>. Acesso em: 10 julho 2013.

MONTEITH, J. L. **Evaporation and environment.** London: Symposium of the Society for Experimental Biology. 19: 205 - 234 p. 1965. Disponível em: <<http://www.unc.edu/courses/2007fall/geog/801/001/www/ET/Monteith65.pdf>>. Acesso em: 5 abril 2013.

EUROPEAN AND MEDITERRANEAN PLANT PROTECTION ORGANIZATION - OEPP. **Environmental Risk assessment scheme for plant protection products.** Bulletin 33 2003. Disponível em: <<http://archives.eppo.int/EPPOStandards/era.htm>>. Acesso em: 16 março 2013.

- PARKER, R. D.; RIEDER, P. D. **GENEEC (The Generic Expected Environmental Concentration Program): Users Manual**, 1995. Disponível em: < <https://www.msu.edu/course/zol/814/GENEEC-Manual.PDF>>. Acesso em: 23 junho 2013.
- PINTO, O. B. Avaliação de risco ambiental em solos brasileiros de um herbicida em desenvolvimento para campos de cereais. 2010. 65 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/64/64135/tde-16122010-103537/fr.php>>. Acesso em: 6 maio 2013.
- PESSOA, M.; QUEIROZ, S. C. D. N.; FERRACINI, V. L.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. Movimento vertical do herbicida hexazinone em latossolo vermelho distrófico do córrego Espraiado, Ribeirão Preto, SP, cultivado com cana-de-açúcar-simulações considerando dados local e default. **Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 52, 2009. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/83063/1/boletim52.pdf>>. Acesso em: 23 abril 2013.
- RESGALLA, C.; NOLDIN, J. A.; TAMANAHA, M. S.; DESCHAMPS, F. C.; EBERHARDT, D. S.; RÖRIG, L. R. Risk analysis of herbicide quinclorac residues in irrigated rice areas, Santa Catarina, Brazil. **Ecotoxicology**, v. 16, n. 8, p. 565-571, 2007.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos. Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005a.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos. Parte 2: Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 19-29, 2005b.
- SCORZA JUNIOR, R. P.; NÉVOLA, F. A.; AYELO, V. S. ACHA: Avaliação da Contaminação Hídrica por Agrotóxico. **Embrapa Agropecuária Oeste**.

Boletim de pesquisa e desenvolvimento, v. 58, p. 31, 2010. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/880316/1/BP201058.pdf>>. Acesso em: 13 abril 2013.

SCORZA JUNIOR, R. P.; RIGITANO, R. L. D. O.; FRANCO, A. A. **Comportamento Ambiental de dois inseticidas em um solo de Mato Grosso do Sul: Experimentação e Modelagem Matemática.** Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 57. Dourados: embrapa agropecuária oeste: 36 p. 2010a. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/880300/1/BP201057.pdf>>. Acesso em: 15 abril 2013.

SCORZA, R. P. J. **Avaliação do Potencial de Contaminação dos Recursos Hídricos por pesticidas na Bacia do Rio Dourado, MS.** SILVA, J. P. Dourados MS: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. 36 p., 2006. Disponível em: <<http://www.cpaio.embrapa.br/publicacoes/online/zip/BP200636.pdf>>. Acesso em: 17 abril 2013.

SOARES, A. F. S.; LEÃO, M.; VIANNA NETO, M. R.; OLIVEIRA, S. M. A. C. Risk estimate of water contamination by pesticides used in coffee crops. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 4, p. 425-432, 2012. ISSN 1415-4366. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1415-43662012000400013&script=sci_arttext>. Acesso em: 6 maio 2013.

SPADOTTO, C. A. **Influência das condições meteorológicas no transporte de agrotóxicos no ambiente.** Rio de Janeiro: Boletim SBMET. 30: 15-20 p. 2006. Disponível em: <http://www.sbmet.org.br/portal2013/publisher/uploads/publicacoes/6_2006_Volume_30_No_1.pdf>. Acesso em: 13 julho 2013.

SPADOTTO, C. A.; MORAES, D. A. D. C. M.; BALLARIN, A. W.; LAPERUTA FILHO, J.; COLENCI, R. A. **ARAquá: software para avaliação de risco ambiental de agrotóxico.** Campinas, SP: Embrapa Monitoramento por Satélite. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 7: 15 p. 2009. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/662332/1/boletim6A_TUAL.pdf>. Acesso em: 10 julho 2013.

- SPADOTTO, C. A. ; SCORZA JUNIOR, R. P.; DORES, E. F. G. de C.; GEBLER, L. ; MORAES, D. A. de C. **Fundamentos e aplicações da modelagem ambiental de agrotóxicos.** Embrapa Monitoramento por Satélite. Documentos. Campinas, SP. 78: 46 p. 2010. Disponível em: <http://www.cnpem.embrapa.br/publica/download/doc_78.pdf>. Acesso em: 5 junho 2013.
- STEPHENSON, G. R.; SOLOMON, K. R. **Pesticides and the Environment.** Canadian Network of Toxicology Centres Press Guelph, Ontario, Canada, 2007. ISBN 0980884705.
- SUÁREZ, L. A. PRZM-3, a model for predicting pesticide and nitrogen fate in the crop root and unsaturated soil zones: users manual for release 3.12.2. **US Environmental Protection Agency (EPA), Washington, DC,** 2005. Disponível em: <<http://www.epa.gov/athens/publications/reports/Suarez600R05111PRZM3.pdf>>. Acesso em: 3 maio 2013.
- TANAKA, H.; KATAGI, T. Ecotoxicological Risk Assessment of Pesticides in Aquatic Ecosystems. **R&D Report**, v. I, p. 1-18, 2008. Disponível em: <http://www.sumitomo-chem.co.jp/english/rd/report/theses/docs/20080102_tnf.pdf>. Acesso em: 5 julho 2013.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM – UNEP. **Existing sources and approaches to risk assessment and management of pesticides, particular needs of developing countries and countries with economies in transition.** 95 p. 2009. Disponível em: <http://www.chem.unep.ch/Pesticides/RiskAssessmentWorkshop/MeetingDocs/Risk%20assessment%20and%20risk%20management%20of%20pesticides_Resource%20document_Final.pdf>. Acesso em: 10 junho 2013.
- UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY - USEPA. **Guidelines for ecological Risk Assessment.** FORUM, R. A. Washington, DC 1998. Disponível em: <<http://www.epa.gov/raf/publications/pdfs/ECOTXTBX.PDF>>. Acesso em: 15 maio 2013.
- UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY - USEPA. **ECOFRAM Aquatic Report** 1999.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY - USEPA. **Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume III - Part A, Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment** 2001. Disponível em: <<http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/rags3adt/>>. Acesso em: 15 julho 2013.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY – USEPA. **Location of weather Stations** 2013. Disponível em <<http://www2.epa.gov/exposure-assessment-models/location-weather-stations>>. Acesso em: 23 junho 2013.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY - USEPA. **FIRST - (F)QPA (I)NDEX (R)ESERVOIR (S)CREENING (T)OOL Version 1.1.1.** Washington 2008. Disponível em: <http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDIQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.epa.gov%2Foppefed1%2Fmodels%2Fwater%2Ffirst_v1_1_1_description.doc&ei=-Bn7UfWVKI2m9qT-7oCoAw&usq=AFQjCNH6jcfuoePvZrV8Paf4L8uKVodqQg&sig2=CL6MOZk-HejhemKs6bsnWw>. Acesso em: 27 maio 2013.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY - USEPA. **Clothianidin Registration of Prosper T400 Seed Treatment on Mustard Seed (Oilseed and Condiment) and Poncho/Votivo Seed Treatment on Cotton.** PREVENTION, O. O. C. S. A. P. 2010. Disponível em: <http://www.epa.gov/pesticides/chem_search/cleared_reviews/csr_PC-044309_2-Nov-10_b.pdf>. Acesso em: 20 julho 2013.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY - USEPA. **Guidance for the Development of Conceptual Models for a Problem Formulation Developed for Registration Review.** Washington 2011. Disponível em: <http://www.epa.gov/pesticides/science/efed/policy_guidance/team_authors/endangered_species_reregistration_workgroup/esa_conceptual_model_pf.htm>. Acesso em: 17 junho 2013.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY - USEPA. **Technical Overview of Ecological Risk Assessment, Risk**

Characterization 2012. Disponível em:
 <http://www.epa.gov/oppefed1/ecorisk_ders/>. Acesso: 27 maio, 2013.

UNSWORTH, J. B.; LINDERS, J. B. H. J.; COBB, G.; VOLZ, D.; PARKER, R.; CHEN, W.; DUTRA CALDAS, E.; REBELO, R.; CARAZO, E., CESIO, V; MIGLIORANZA, K. **Global Framework for Implementing Consistent Ecological Risk Assessment of Pesticides for Sustainable Agriculture** : International Union of Pure and Applied Chemistry 2013.

VIEIRA, L.; PICULLI, M. F. J. **Meteorologia e Climatologia Agrícola** 2010. Disponível em: <www.dea.uem.br/disciplinas/meteorologia/meteorologiaagricola.pdf>. Acesso em: 15 julho 2013.

ANEXOS

Anexo I

Modelo planilha de construção de cenário EPA

PRZM INPUTS.XLS - PRZM Data Inputs for Various Crop Scenarios				
PR ZM Rec ord #	Varia ble Nam e	V al ue	Parameter Name and Guidance	Source
1	TITL E		Title of input file	
2	HTIT LE		Short description of file	
3	PFA C		Pan factor (dimensionless)	
	SFA C		Snowmelt factor (cm/C)	
	IPEI ND	0	Pan factor flag - 0 = pan data read from meteorology file	
	ANE TD		Min. depth from which evaporation is extracted during fallow period (cm); 10 cm = soil with limited drainage	
	INIC RP	1	Flag for initial crop if simulation date is before emergence date (see Record 10); 1 = yes, 2 = no	Always should be 1
	ISCO ND		Surface condition of initial crop if INICRP = 1; 1 = fallow, 2 = cropping, 3 = residue	
	DSN (x5)		Leave blank	
6	ERF LAG	4	Flag to calculate erosion; 0 = none, 2 = MUSLE, 3 = MUST, 4 = MUSS; note that a value of 1 is meaningless; MUSS selected by EPA and industry as most appropriate.	
7	Only needed if ERFLAG = 2,3, or 4 (Record 6)			
	USL EK		Universal soil loss equation (K) of soil erodability	
	USL ELS		Universal soil loss equation (LS) length-slope topographic factor	
	USL EP		Universal soil loss equation (P) practice factor	
	AFIE LD	17 2	Area of field or plot (ha); EPA default is 10	email from Sid Abel (98 12 28)
	IREG		Location of NRCS 24-hour hyetograph/Soil Conservation Service rainfall distribution region	
	SLP		Land slope (%)	
	HL	60 0	Hydraulic length (m); for a circular 10 ha field emptying into a 1 ha pond (when linked to EXAMS), default HL = 354 m	
8	NDC	1	Number of different crops in simulation (1 to 5)	
9	(repeat this record NDC times)			
	ICNC N	1	Crop number	
	CINT CP		Maximum interception storage of crop (cm)	
	AMX DR		Maximum rooting depth of crop (cm)	
	COV		Maximum areal coverage of canopy (%)	

PRZM INPUTS.XLS - PRZM Data Inputs for Various Crop Scenarios

	MAX	
	ICNA	Surface condition of crop after harvest date (see Record 11); 1 = fallow, 2 = cropping, 3 =
	H	residue
	CN	Runoff curve numbers of antecedent moisture condition for fallow, cropping, and residue
	(x3)	(three values); note that runoff and leaching are very sensitive to these factors.
	WFM	Maximum dry weight of crop at full canopy (kg/m ²), required if CAM = 3 (Record 16) else
	AX	set to 0.0
	HTM	Maximum canopy height (cm) at maturation date (Record 11)
	AX	
	REC	
	ORD	
	9A	
	REC	
	ORD	
	9B	
	REC	
	ORD	
	9C	
	REC	
	ORD	
	9D	
	REC	
	ORD	
	9B	
	REC	
	ORD	
	9C	
	REC	
	ORD	
	9D	
9A	CRO	Crop number
	PNO	
	NUS	Number of USLEC factors (up to 32)
	LEC	
9B	GDU	Day of month to start USLEC and Manning's N factor
	SLE	
	C	
	GMU	Month to start USLEC and Manning's N factor
	SLE	
	C	
9C	USL	Universal soil loss cover management factors for fallow, cropping, and residue (C value);
	EC	required if ERFLAG not equal to zero (Record 6), else set to 0.0
9D	MNG	Manning's N
	N	
10	NCP	Number of cropping periods (sum of NDC for all cropping dates in Record 11)
	DS	
11	(Repeat this record NCPDS times)	
	EMD	Integer day of crop emergence
	EMM	Integer month of crop emergence
	IYRE	Integer year of crop emergence
	M	
	MAD	Integer day of crop maturation
	MAM	Integer month of crop maturation
	IYRM	Integer year of crop maturation
	AT	
	HAD	Integer day of crop harvest
	HAM	Integer month of crop harvest

PRZM INPUTS.XLS - PRZM Data Inputs for Various Crop Scenarios

	IYRH AR	Integer year of crop harvest	
	INCR OP	Crop number associated with NDC (Record 8)	
19	STIT LE	Brief description of soil properties	
20	COR ED	Total depth of soil core (cm); must be sum of all horizon thicknesses in Record 33 and at least as deep as the root depth in Record 9	
	BDF LAG	0 Bulk density flag; 0 = bulk density known and entered in Record 33, 1 = mineral value entered	
	THFL AG	0 Field capacity and wilting point flag; 0 = water contents are entered, 1 = calculated by model.	
	KDF LAG	0 Soil adsorption coefficient; 0 = Kd entered in Record 37, 1 = calculated by model.	Submission studies email from Sid Abel (99 03 10)
	HSW ZT	0 Drainage flag; 0 = free draining, 1 = restricted (should be set to zero)	
	MOC	0 Method of characteristics flag; 1 = yes, 0 = no; this flag is used for the leaching program and PRZM is not recommended as a leaching model by the EPA at this time.	
	IRFL AG	0 Irrigation flag; 0 = no irrigation, 1 = year round, 2 = during cropping period only.	email from Sid Abel (99 03 10)
	ITFL AG	0 Soil temperature simulation flag; 1 = yes, 0 = no (must = 1 if nitrogen is being simulated)	
	IDFL AG	0 Thermal conductivity and heat capacity flag; 1 = yes, 0 = no.	
	BIOF LG	0 Biodegradation flag; 1 = yes, 0 = no; this flag is used when transformation occurs only by the microbial pathway and requires knowledge of microbe population characteristics	email from Sid Abel (99 03 10)
33	NHO RIZ	Number of horizons	
Horizon 1:			
34	(Repeat Records 34, 36, and 37 for each horizon)		
	HORI ZN	Horizon number	
	THK NS	Thickness of horizon (cm)	
	BD	Bulk density if BDFLAG = 0 or mineral density if BDFLAG = 1 (Record 20) (g/cm ³)	
	THE TO	Initial soil water content in horizon (cm ³ /cm ³); if site-specific value not known, use field capacity	
	AD	Soil drainage parameter if HSWZT = 1 (Record 20), else set to 0.0 (day ⁻¹); note that the # of compartments (= DPN/THKNS) is needed to determine AD	
	DISP	Pesticide(s) hydrodynamic solute dispersion coefficient for each NCHEM; should be set to zero unless field data are available for calibration	
	ADL	Lateral soil drainage parameter if HSWZT = 1 (Record 20) (should be set to zero)	
37	DPN	Thickness of compartments in horizon (cm)	
	THE FC	Field capacity in horizon (cm ³ /cm ³)	
	THE WP	Wilting point in horizon (cm ³ /cm ³)	
	OC	Organic carbon in horizon (%)	
Horizon 2:			
34	(Repeat Records 34, 36, and 37 for each horizon)		
	HORI ZN	Horizon number	

PRZM INPUTS.XLS - PRZM Data Inputs for Various Crop Scenarios

	THK	Thickness of horizon (cm)
	NS	
	BD	Bulk density if BDFLAG = 0 or mineral density if BDFLAG = 1 (Record 20) (g/cm ³)
	THE	Initial soil water content in horizon (cm ³ /cm ³); if site-specific value not known, use field
	TO	capacity
	AD	Soil drainage parameter if HSWZT = 1 (Record 20), else set to 0.0 (day-1); note that the #
		of compartments (= DPN/THKNS) is needed to determine AD
	DISP	Pesticide(s) hydrodynamic solute dispersion coefficient for each NCHEM; should be set to
		zero unless field data are available for calibration
	ADL	Lateral soil drainage parameter if HSWZT = 1 (Record 20) (should be set to zero)
37	DPN	Thickness of compartments in horizon (cm)
	THE	Field capacity in horizon (cm ³ /cm ³)
	FC	
	THE	Wilting point in horizon (cm ³ /cm ³)
	WP	
	OC	Organic carbon in horizon (%)

Anexo II
Comparações entre estações meteorológicas no ARCGIS.

Tabela 1- Comparação para o parâmetro Velocidade do Vento.

Estação INMET sem velocidade do vento	Estado	Estação INMET com velocidade do vento	Estado	Distância (Km)
Maceió	AL	Porto de Pedras	AL	0.55946405
Feira de Santana	BA	Alagoinhas	BA	0.43174246
São Mateus	ES	Caravelas	BA	1.140570268
Vitória	ES	Aimorés	MG	1.126099577
Cuiabá	MT	Padre Ricardo Remetter	MT	0.235371437
Triunfo	PE	Monteiro	PB	1.051712124
Cordeiro	RJ	Itaperuna	RJ	0.935359157
Maricá	RJ	Rio de Janeiro	RJ	0.362216113
Lagoa Vermelha	RS	Campos Novos	SC	0.891964012
Taubaté	SP	Maria da Fé	MG	0.749534185

Tabela 2 - Comparação para o parâmetro Direção do Vento.

Estações INMET sem direção do vento	Estado	Estações INMET com direção do vento	Estado	Distância (km)
São Mateus	ES	Caravelas	BA	1.14
Cordeiro	RJ	Itaperuna	RJ	0.94

Tabela 3 - Comparação para o parâmetro Umidade.

Estação INMET sem umidade	Estado	Estação INMET com umidade	Estado	Distância (km)
Correntina	BA	Bom Jesus da Lapa	BA	1.2015
Itiruçu (Jaguaquara)	BA	Itaberaba	BA	0.845281
Corumbá	MS	Nhumirim	MS	1.0008
Taubaté	SP	Maria da Fé	MG	0.749534

Tabela 4- Comparação para o parâmetro evaporação.

Estação sem evaporação	Estado	Estação com evaporação	Estado	Distância (km)
Barra	BA	Santa Rita de Cássia (Ibipetuba)	BA	1.35
Correntina	BA	Bom Jesus da Lapa	BA	1.20
Irecê	BA	Morro do Chapéu	BA	0.65
Itaberaba	BA	Itiruçu (Jaguaquara)	BA	0.84
Remanso	BA	Caracol	PI	1.28
Aracaju	SE	Itabaianinha	SE	0.79
Propriá	SE	Pão de Açúcar	AL	0.72

Tabela 5- Comparação para o parâmetro Pressão Atmosférica.

Estação INMET sem pressão atmosférica	Estado	Estação INMET com pressão atmosférica	Estado	Distância (km)
Barcelos	AM	Fonte Boa	AM	3.61
Benjamin Constant	AM	Cruzeiro do SUL	AC	4.19
Coari	AM	Manicoré	AM	2.53
Codajás	AM	Manicoré	AM	2.14
Eirunepé	AM	Cruzeiro do Sul	AC	2.96
Itacoatiara	AM	Manaus	AM	1.52
Parintins	AM	Óbidos	PA	1.40
S. G. da Cachoeira (Uaupés)	AM	Iauaretê	AM	2.32
Tefé	AM	Fonte Boa	AM	1.96
Itumbiara	GO	Capinópolis	MG	0.45
Bom Despacho	MG	Pompeu	MG	0.62
Caldas (P. de Caldas)	MG	Machado	MG	0.55
Curvelo	MG	Pompeu	MG	0.72
Formoso	MG	Posse	GO	0.84
Ibirité	MG	Belo Horizonte	MG	0.15
Janauba	MG	Monte Azul	MG	0.89
Juramento	MG	Montes Claros	MG	0.15
Maria da Fé	MG	São Lourenço	MG	0.41
Oliveira	MG	Divinópolis	MG	0.51
Passa Quatro	MG	São Lourenço	MG	0.28
São Sebas. do Paraíso	MG	Franca	SP	0.42
Unaí	MG	Arinos	MG	0.69
Nhumirm	MS	Corumbá	MS	1.00
Rondonópolis	MT	Poxoréo	MT	0.65
São Vicente	MT	Padre Ricardo Remetter	MT	0.65
Pesqueira	PE	Arcoverde	PE	0.31
Triunfo	PE	Monteiro	PB	1.05
Caldeirão	PI	Piriri	PI	0.02
Esperantina	PI	Piriri	PI	0.60
Luzilândia (Lag. do Piauí)	PI	Piriri	PI	0.99
Morro dos Cavalos	PI	São João do Piauí	PI	0.61
Vale do Gurgueia (Cristiano Castro)	PI	Bom Jesus do Piauí	PI	0.79
Avelar	RJ	Rio de Janeiro	RJ	0.58
Marica	RJ	Rio de Janeiro	RJ	0.36
Boa Vista	RR	Manaus	AM	5.98
Caracaraí	RR	Manaus	AM	5.09
Bento Gonçalves	RS	Caxias do Sul	RS	0.32
Cambara do Sul	RS	Bom Jesus	RS	0.48
Campo Bom	RS	Porto Alegre	RS	0.39
Ibirubá	RS	Cruz Alta	RS	0.48
Triunfo	RS	Porto Alegre	RS	0.28

Estação INMET sem pressão atmosférica	Estado	Estação INMET com pressão atmosférica	Estado	Distância (km)
Urussanga	SC	São Joaquim	SC	0.65
Sorocaba	SP	São Paulo (Mir. de Santana)	SP	0.81
Tarauacá	AC	Cruzeiro do Sul	AC	1.98

Tabela 6- Comparação para o parâmetro Aerosol.

Nome da estação INMET	Estado	Nome da Estação AERONET	Estado	Distância (km)
Agua Branca	AL	São Paulo	SP	16.78
Maceió	AL	São Paulo	SP	17.73
Palmeira dos Índios	AL	São Paulo	SP	17.30
Altamira	PA	Alta Floresta	MT	7.69
Alto Parnaíba	MA	Alta Floresta	MT	10.20
Apodí	RN	Alta Floresta	MT	18.77
Pão de Açúcar	AL	São Paulo	SP	16.64
Porto de Pedras	AL	São Paulo	SP	18.28
Aragarças	GO	Cuiabá Miranda	MT	3.78
Araguaína	TO	Alta Floresta	MT	8.34
Alagoinhas	BA	São Paulo	SP	13.93
Barra	BA	São Paulo	SP	12.97
Bom Jesus da Lapa	BA	São Paulo	SP	10.80
Caetité	BA	São Paulo	SP	10.39
Canavieiras	BA	São Paulo	SP	11.08
Caravelas	BA	São Paulo	SP	9.48
Bacabal	MA	Alta Floresta	MT	12.66
Carinhanha	BA	São Paulo	SP	9.73
Balsas	MA	Alta Floresta	MT	10.34
Cipó	BA	São Paulo	SP	14.93
Correntina	BA	São Paulo	SP	10.44
Barbalha	CE	Alta Floresta	MT	16.99
Barcelos	AM	Rio Branco	AC	10.25
Feira de Santana	BA	São Paulo	SP	13.77
Barra do Corda	MA	Alta Floresta	MT	11.71
Barreiras	BA	Alta Floresta	MT	11.33
Belém	PA	Alta Floresta	MT	11.40
Guaratinga	BA	São Paulo	SP	9.90
Belterra	PA	Alta Floresta	MT	7.32
Benjamin Constant	AM	Rio Branco	AC	5.98
Irecê	BA	São Paulo	SP	13.18
Boa Vista	RR	Alta Floresta	MT	13.47
Itaberaba	BA	São Paulo	SP	12.78
Itiruçu (Jaguaquara)	BA	São Paulo	SP	12.15
Ituaçu	BA	São Paulo	SP	11.14
Bom Jesus do Piauí	PI	Alta Floresta	MT	12.00

Nome da estação INMET	Estado	Nome da Estação AERONET	Estado	Distância (km)
Breves	PA	Alta Floresta	MT	9.92
Jacobina	BA	São Paulo	SP	13.86
Lençóis	BA	São Paulo	SP	12.21
Cáceres	MT	Cuiabá Miranda	MT	1.70
Monte Santo	BA	São Paulo	SP	15.08
Morro do Chapéu	BA	São Paulo	SP	13.51
Caldeirão	PI	Alta Floresta	MT	15.35
Paulo Afonso	BA	São Paulo	SP	16.54
Cametá	PA	Alta Floresta	MT	10.07
Salvador (Ondina)	BA	São Paulo	SP	13.38
Serrinha	BA	São Paulo	SP	14.22
Vitória da Conquista	BA	São Paulo	SP	10.50
Roncador	DF	São Paulo	SP	7.71
São Mateus	ES	São Paulo	SP	8.42
Campos Sales	CE	Alta Floresta	MT	15.98
Canarana	MT	Cuiabá Miranda	MT	4.15
Vitória	ES	São Paulo	SP	7.18
Catalão	GO	São Paulo	SP	5.51
Formosa	GO	São Paulo	SP	8.04
Caracaraí	RR	Alta Floresta	MT	12.73
Caracol	PI	Alta Floresta	MT	12.78
Ipameri	GO	São Paulo	SP	6.01
Itumbiara	GO	São Paulo	SP	5.70
Posse	GO	São Paulo	SP	9.46
Carolina	MA	Alta Floresta	MT	8.99
Aimorés	MG	São Paulo	SP	6.97
Araçuaí	MG	São Paulo	SP	8.19
Araxá	MG	São Paulo	SP	3.96
Caxias	MA	Alta Floresta	MT	13.69
Arinos	MG	São Paulo	SP	7.68
Ceará Mirim	RN	Alta Floresta	MT	20.88
Chapadinha	MA	Alta Floresta	MT	14.15
Bambuí	MG	São Paulo	SP	3.59
Barbacena	MG	São Paulo	SP	3.75
Coari	AM	Rio Branco	AC	7.54
Codajás	AM	Rio Branco	AC	8.42
Colinas	MA	Alta Floresta	MT	12.47
Conceição do Araguaia	PA	Alta Floresta	MT	7.01
Belo Horizonte	MG	São Paulo	SP	4.58
Bom Despacho	MG	São Paulo	SP	4.06
Corumbá	MS	Cuiabá Miranda	MT	3.69
Crateús	CE	Alta Floresta	MT	16.13
C do Mato Dentro	MG	São Paulo	SP	5.60
Cruzeiro do Sul	AC	Rio Branco	AC	5.34

Nome da estação INMET	Estado	Nome da Estação AERONET	Estado	Distância (km)
Cruzeta	RN	Alta Floresta	MT	19.82
Cuiabá	MT	Cuiabá Miranda	MT	0.19
Caldas (P. de Caldas)	MG	São Paulo	SP	1.67
Caparaó	MG	São Paulo	SP	5.70
Capinópolis	MG	São Paulo	SP	5.59
Diamantino	MT	Cuiabá Miranda	MT	1.38
Caratinga	MG	São Paulo	SP	5.92
Eirunepé	AM	Rio Branco	AC	3.85
Curvelo	MG	São Paulo	SP	5.31
Esperantina	PI	Alta Floresta	MT	15.08
Diamantina	MG	São Paulo	SP	6.16
Divinópolis	MG	São Paulo	SP	3.86
Florânia	RN	Alta Floresta	MT	19.64
Floriano	PI	Alta Floresta	MT	13.44
Espinosa	MG	São Paulo	SP	9.46
Fonte Boa	AM	Rio Branco	AC	7.61
Formoso	MG	São Paulo	SP	8.63
Frutal	MG	São Paulo	SP	4.15
Fortaleza	CE	Alta Floresta	MT	18.58
Ibirité	MG	São Paulo	SP	4.43
Itamarandiba	MG	São Paulo	SP	6.90
Gleba Celeste	MT	Alta Floresta	MT	2.37
Goiânia	GO	Cuiabá Miranda	MT	6.83
Goiás	GO	Cuiabá Miranda	MT	5.88
Guaramiranga	CE	Alta Floresta	MT	17.99
Ituiutaba	MG	São Paulo	SP	5.36
Janaúba	MG	São Paulo	SP	8.49
Iauaretê	AM	Rio Branco	AC	10.65
Januária	MG	São Paulo	SP	8.44
João Pinheiro	MG	São Paulo	SP	5.88
Iguatu	CE	Alta Floresta	MT	17.16
Imperatriz	MA	Alta Floresta	MT	9.65
Juiz de Fora	MG	São Paulo	SP	3.82
Juramento	MG	São Paulo	SP	7.41
Lavras	MG	São Paulo	SP	2.50
Machado	MG	São Paulo	SP	2.07
Maria da Fé	MG	São Paulo	SP	1.84
Moçambinho	MG	São Paulo	SP	8.89
Monte Azul	MG	São Paulo	SP	9.36
Itacoatiara	AM	Alta Floresta	MT	7.12
Itaituba	PA	Alta Floresta	MT	5.58
Montes Claros	MG	São Paulo	SP	7.46
Oliveira	MG	São Paulo	SP	3.45
Paracatu	MG	São Paulo	SP	6.32

Nome da estação INMET	Estado	Nome da Estação AERONET	Estado	Distância (km)
Passa Quatro	MG	São Paulo	SP	2.11
Patos de Minas	MG	São Paulo	SP	5.04
Pedra Azul	MG	São Paulo	SP	9.31
Pirapora	MG	São Paulo	SP	6.46
Pompeu	MG	São Paulo	SP	4.66
Jaguaruana	CE	Alta Floresta	MT	19.02
Salinas	MG	São Paulo	SP	8.61
São Lourenço	MG	São Paulo	SP	2.24
Jataí	GO	Cuiabá Miranda	MT	4.81
São Sebas. do Paraíso	MG	São Paulo	SP	2.66
Sete Lagoas	MG	São Paulo	SP	4.77
Uberaba	MG	São Paulo	SP	4.01
Unaí	MG	São Paulo	SP	7.18
Lábrea	AM	Rio Branco	AC	4.06
Viçosa	MG	São Paulo	SP	4.78
Paranaíba	MS	São Paulo	SP	5.85
Areia	PB	São Paulo	SP	19.92
Campina Grande	PB	São Paulo	SP	19.61
João Pessoa	PB	São Paulo	SP	20.28
Luzilândia (Lag. do Piauí)	PI	Alta Floresta	MT	15.25
Macapá	AP	Alta Floresta	MT	11.00
Macau	RN	Alta Floresta	MT	19.90
Monteiro	PB	São Paulo	SP	18.41
Arcoverde	PE	São Paulo	SP	17.95
Manaus	AM	Alta Floresta	MT	7.76
Manicoré	AM	Alta Floresta	MT	6.58
Marabá	PA	Alta Floresta	MT	8.29
Cabrobó	PE	São Paulo	SP	16.75
Pesqueira	PE	São Paulo	SP	18.13
Petrolina	PE	São Paulo	SP	15.50
Matuba	MT	Alta Floresta	MT	1.24
Recife	PE	São Paulo	SP	19.47
Monte Alegre	PA	Alta Floresta	MT	8.12
Surubim	PE	São Paulo	SP	19.19
Triunfo	PE	São Paulo	SP	17.93
Campo Mourão	PR	São Paulo	SP	5.66
Castro	PR	São Paulo	SP	3.49
Morada Nova	CE	Alta Floresta	MT	18.35
Curitiba	PR	São Paulo	SP	3.16
Morro dos Cavalos	PI	Alta Floresta	MT	14.34
Irati	PR	São Paulo	SP	4.35
Nhumirim	MS	Cuiabá Miranda	MT	3.33
Nova Xavantino	MG	Cuiabá Miranda	MT	3.80
Óbidos	PA	Alta Floresta	MT	7.96

Nome da estação INMET	Estado	Nome da Estação AERONET	Estado	Distância (km)
Ivaí	PR	São Paulo	SP	4.37
Ouricuri	PE	Alta Floresta	MT	16.17
Padre Ricardo Remetter	MT	Cuiabá Miranda	MT	0.09
Palmas	TO	Alta Floresta	MT	7.81
Londrina	PR	São Paulo	SP	4.41
Maringá	PR	São Paulo	SP	5.18
Paranaguá	PR	São Paulo	SP	2.67
Avelar	RJ	São Paulo	SP	3.52
Campos	RJ	São Paulo	SP	5.69
Parintins	AM	Alta Floresta	MT	7.26
Cordeiro	RJ	São Paulo	SP	4.64
Itaperuna	RJ	São Paulo	SP	5.37
Patos	PB	Alta Floresta	MT	19.04
Marica	RJ	São Paulo	SP	3.96
Paulistana	PI	Alta Floresta	MT	15.07
Resende	RJ	São Paulo	SP	2.55
Rio de Janeiro	RJ	São Paulo	SP	3.61
Pedro Afonso	TO	Alta Floresta	MT	7.97
Peixe	TO	Alta Floresta	MT	8.05
Natal	RN	São Paulo	SP	21.07
Bagé	RS	São Paulo	SP	10.72
Bento Gonçalves	RS	São Paulo	SP	7.37
Picos	PI	Alta Floresta	MT	14.89
Bom Jesus	RS	São Paulo	SP	6.32
Pirenópolis	GO	Cuiabá Miranda	MT	7.04
Piriri	PI	Alta Floresta	MT	15.37
Cambara do Sul	RS	São Paulo	SP	6.47
Ponta Porã	MS	Cuiabá Miranda	MT	6.84
Campo Bom	RS	São Paulo	SP	7.50
Porto de Moz	PA	Alta Floresta	MT	9.00
Caxias do Sul	RS	São Paulo	SP	7.18
Porto Nacional	TO	Alta Floresta	MT	7.73
Cruz Alta	RS	São Paulo	SP	8.54
Poxoréo	MT	Cuiabá Miranda	MT	1.63
Encruzilhada do Sul	RS	São Paulo	SP	9.07
Ibirubá	RS	São Paulo	SP	8.18
Quixeramobim	CE	Alta Floresta	MT	17.46
Iraí	RS	São Paulo	SP	7.44
Remanso	BA	Alta Floresta	MT	14.00
Lagoa Vermelha	RS	São Paulo	SP	6.68
Rio Branco	AC	Rio Branco	AC	0.06
Passo Fundo	RS	São Paulo	SP	7.35
Pelotas	RS	São Paulo	SP	10.01
Rio Verde	GO	Cuiabá Miranda	MT	5.50

Nome da estação INMET	Estado	Nome da Estação AERONET	Estado	Distância (km)
Porto Alegre	RS	São Paulo	SP	7.87
Rondonópolis	MT	Cuiabá Miranda	MT	1.62
S. G. da Cachoeira (Uaupés)	AM	Rio Branco	AC	9.87
Rio Grande	RS	São Paulo	SP	10.04
Santa Maria	RS	São Paulo	SP	9.30
Santa Vitória do Palmar	RS	São Paulo	SP	11.97
Santa Rita de Cássia (Ibipetuba)	BA	Alta Floresta	MT	11.64
Santana do Livramento	RS	São Paulo	SP	11.47
São Luiz Gonzaga	RS	São Paulo	SP	9.60
Torres	RS	São Paulo	SP	6.53
São Félix do Xingu	PA	Alta Floresta	MT	5.24
São Gonçalo	PB	Alta Floresta	MT	18.15
São João do Piauí	PI	Alta Floresta	MT	13.93
Triunfo	RS	São Paulo	SP	7.85
São José do Rio Claro	MT	Cuiabá Miranda	MT	2.39
Uruguaiana	RS	São Paulo	SP	12.06
São Luís	MA	Alta Floresta	MT	13.96
Campos Novos	SC	São Paulo	SP	5.89
Chapecó	SC	São Paulo	SP	6.89
Florianópolis	SC	São Paulo	SP	4.43
Indaial	SC	São Paulo	SP	4.17
Lages	SC	São Paulo	SP	5.59
São Vicente	MT	Cuiabá Miranda	MT	0.60
Seridó	RN	Alta Floresta	MT	19.32
São Joaquim	SC	São Paulo	SP	5.73
Urussanga	SC	São Paulo	SP	5.60
Sobral	CE	Alta Floresta	MT	16.92
Aracaju	SE	São Paulo	SP	15.89
Soure	PA	Alta Floresta	MT	11.87
Itabaianinha	SE	São Paulo	SP	15.29
Taguatinga	TO	Alta Floresta	MT	10.01
Tarauacá	AC	Rio Branco	AC	3.41
Tauá	CE	Alta Floresta	MT	16.15
Propriá	SE	São Paulo	SP	16.60
Tefé	AM	Rio Branco	AC	6.89
Teresina	PI	Alta Floresta	MT	14.11
Avaré	SP	São Paulo	SP	2.22
Tracuateua	PA	Alta Floresta	MT	12.72
Catanduva	SP	São Paulo	SP	3.28
Franca	SP	São Paulo	SP	3.04
Tucuruí	PA	Alta Floresta	MT	8.86
Turiaçãoçu	MA	Alta Floresta	MT	13.56
Guarulhos	SP	São Paulo	SP	0.29

Nome da estação INMET	Estado	Nome da Estação AERONET	Estado	Distância (km)
Presidente Prudente	SP	São Paulo	SP	4.86
São Carlos	SP	São Paulo	SP	1.95
São Paulo (Mir. de Santana)	SP	São Paulo	SP	0.12
Vale do Gurgueia (Cristiano Castro)	PI	Alta Floresta	MT	12.46
São Simão	SP	São Paulo	SP	2.23
Sorocaba	SP	São Paulo	SP	0.70
Taubaté	SP	São Paulo	SP	1.29
Zé Doca	MA	Alta Floresta	MT	12.35