

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**Avaliação da vulnerabilidade e risco de contaminação de aquíferos
porosos por nitratos, utilizando ferramentas SIG e métodos
estatísticos**

João Carlos Figueiredo Barão

Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território

Dissertação orientada por:
Professora Doutora Maria do Rosário Carvalho

2022

RESUMO

A crescente preocupação com a contaminação de águas subterrâneas tem levado à procura de metodologias que permitam evitar esse problema. São vários os métodos de avaliação de vulnerabilidade e risco de contaminação utilizados atualmente, no entanto, a aplicação desses modelos é complexa e imprecisa, conduzindo a conclusões discrepantes.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da aplicação dos métodos de determinação da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação DRASTIC e DRASTIC Pesticide (Aller *et al.*, 1987), e o Índice de Suscetibilidade (IS) (Ribeiro, 2005) numa zona contaminada por nitratos de origem agrícola. A Zona Vulnerável (ZV) do Litoral Centro foi a área escolhida por apresentar concentrações de nitratos nas águas subterrâneas superiores a 50 mg/L.

O mapeamento dos índices de vulnerabilidade e suscetibilidade foi realizado com o recurso a ferramentas de informação geográfica, as quais incluíram análise espacial e geoprocessamento. Os mapas dos índices DRASTIC, DRASTIC Pesticide e IS mostram que a diferença entre classes de vulnerabilidade não é significativamente diferente. Na zona norte da ZV a vulnerabilidade varia de baixa a moderada, aumentando consideravelmente no centro, com vulnerabilidade moderada a elevada; na zona sul a vulnerabilidade é predominantemente moderada.

A eficiência da aplicação dos diferentes métodos de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos foi avaliada através de dois métodos: o Índice de Correlação Qualitativo (ICQ) e o Coeficiente de Determinação do Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC).

O método ICQ expôs a eficiência dos métodos de avaliação através de uma comparação direta de mapas de classes de concentração de nitratos e de índices de vulnerabilidade. O método DRASTIC Pesticide foi o que apresentou maior valor de ICQ, de 102. Por sua vez o método DRASTIC tem um ICQ de 96 e o método IS um ICQ de 97.

O método IVC formula a correlação dos métodos de avaliação de vulnerabilidade através da utilização de classes de vulnerabilidade normalizadas com os dados de concentração de nitratos. Os índices obtidos pelo método DRASTIC Pesticide apresentam maior R^2 , com o valor de 0,9906. Os índices DRASTIC apresentaram R^2 de 0,9854 e os índices IS 0,9831.

O índice DRASTIC Pesticide é o que apresenta maior correlação com a concentração de nitratos na ZV, isto é, as zonas de maior vulnerabilidade são as que se encontram mais contaminadas. Deste modo, o método DRASTIC Pesticide é o método com melhor desempenho na proteção de aquíferos porosos contaminados por nitratos de origem agrícola.

A análise de sensibilidade dos diferentes parâmetros utilizados na determinação da vulnerabilidade e suscetibilidade dos aquíferos à contaminação por nitratos foi realizada, também, através da aplicação do método IVC. Os parâmetros com maior correlação com a contaminação foram S: Tipo de Solo ($R^2 = 0,9965$) e I: Impacto da zona não saturada ($R^2 = 0,9905$). O parâmetro que apresenta menor correlação é LU: Ocupação do solo ($R^2=0,6950$). A correlação elevada dos parâmetros S e I com a concentração de nitratos nas águas subterrâneas da ZV reforça e explica o resultado obtido para o método DRASTIC Pesticide, tendo em consideração os pesos (ponderação) que estes parâmetros têm no cálculo do índice de vulnerabilidade.

Palavras-Chave: Vulnerabilidade, Risco, Aquíferos porosos, Nitratos, Análise de Sensibilidade.

ABSTRACT

The growing concern with groundwater contamination has led to the search for the definition of methodologies to avoid this problem. There are several methods for assessing vulnerability and contamination risk currently in use, however, the application of these models is complex and imprecise, leading to discrepant conclusions.

This work aimed at evaluating the efficiency of the application of the DRASTIC and DRASTIC Pesticide (Aller *et al.*, 1987) methods for determining aquifer vulnerability to contamination, and the Susceptibility Index (SI, Ribeiro, 2005) in an area contaminated by nitrates of agricultural origin. The Vulnerable Zone (VZ) of Litoral Centro was the area chosen for presenting nitrate concentrations in groundwater higher than 50 mg/L.

The mapping of vulnerability and susceptibility indices was carried out using geographic information tools, which included spatial analysis and geoprocessing. The maps of DRASTIC, DRASTIC Pesticide and SI indices show that the difference between vulnerability classes is not significantly different. In the northern part of the VZ the vulnerability ranges from low to moderate, increasing considerably in the centre with moderate to high vulnerability; in the southern part the vulnerability is predominantly moderate.

The efficiency of applying different aquifer vulnerability assessment methods was evaluated through two methods: the Qualitative Correlation Index (QCI) and the Conditioned Vulnerability Index Determination Coefficient (VIC).

The QCI method exposed the efficiency of the assessment methods through a direct comparison of nitrate concentration class maps and vulnerability indices. The DRASTIC Pesticide method was the one that presented the highest QCI value of 102. In turn the DRASTIC method has QCI of 96 and the IS method with an QCI of 97.

The VIC method formulates the correlation of the vulnerability assessment methods by using normalized vulnerability classes with the nitrate concentration data. The indices obtained by the DRASTIC Pesticide method present higher R^2 , with the value of 0.9906. The DRASTIC indices presented R^2 of 0.9854 and the IS 0.9831.

The DRASTIC Pesticide index is the one that presents the highest correlation with the concentration of nitrates in the ZV, that is, the zones of greater vulnerability are the ones that are more contaminated. Thus, the DRASTIC Pesticide method is the one that presents the best performance for the protection of porous aquifers contaminated by nitrates of agricultural origin.

The sensitivity analysis of the different parameters used in the determination of the vulnerability and susceptibility of aquifers to contamination by nitrates was also carried out through the application of the VIC method. The parameters with the highest correlation with contamination were S: Soil Type ($R^2 = 0.9965$) and I: Impact of the unsaturated zone ($R^2 = 0.9905$). The parameter showing the lowest correlation is LU: Land Use ($R^2=0.6950$). The high correlation of the S and I parameters with the nitrate concentration in the groundwater of the VZ reinforces and explains the result obtained for the DRASTIC Pesticide method, taking into consideration the weights that these parameters have in the calculation of the vulnerability indices.

Keywords: Vulnerability; Risk; Porous aquifers, Nitrates; Sensibility analysis.

AGRADECIMENTOS

Aquando da realização desta dissertação foram várias as pessoas envolvidas que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para a conclusão e apresentação deste trabalho de grande importância para mim e o meu futuro. A todas elas, agradeço muito do fundo do coração pelo seu apoio durante esta etapa que tive a oportunidade e orgulho de participar na minha vida.

À minha orientadora, Professora Maria do Rosário Carvalho, agradeço a oportunidade de trabalhar neste projeto, que infelizmente devido ao início da pandemia teve um começo atribulado e muitas dúvidas associadas. No entanto, a orientadora sempre apresentou uma disponibilidade elevada, apoio e acompanhamento, utilizando críticas, comentários e sugestões que me permitiram concluir este trabalho da melhor forma possível. Agradeço também pela orientação ao longo do mestrado e pelo apoio e ensino aquando dos anos de licenciatura.

Aos amigos da vida, presentes ou não, todos prestaram sempre palavras de incentivo, coragem e determinação. Cada um, de uma forma única e especial sempre incentivaram a fazer o meu melhor para a conclusão deste trabalho. Nomeadamente, em momentos de procrastinação e de ansiedade, nunca me deixaram ir abaixo, e sempre disseram para olhar em frente e com confiança nas minhas forças.

Aos Champihelp, colegas e grandes amigos para o resto da vida. Agradeço o apoio, companhia e aventuras durante a pandemia na grande Fundação Champalimaud. O vosso incentivo foi fundamental e importante para a passagem e tolerância desta pandemia com uma dissertação por realizar da melhor forma possível. Grande agradecimento em especial para a Catarina Moura, Raquel Vieira e a Juliana Calças, sempre demonstraram disponibilidade para ajudar com burocracias relacionadas com a dissertação e enorme incentivo e força para eu terminar esta etapa.

À família que sempre esteve presente nos bons e maus momentos. Que desde o início desta grande aventura sempre me suportaram e incentivaram. Especial agradecimento aos meus pais e avós que me educaram ao longo da minha vida fazendo de mim o homem que sou hoje.

Dedico esta dissertação de mestrado, um dos maiores projetos da minha vida aos meus avós e à minha mãe. Ambos moldaram, educaram e disciplinaram a pessoa que sou hoje. Todas as minhas decisões realizadas e que serão realizadas são sempre com todos no meu pensamento. Eu não seria nada sem vós na minha vida. Muito obrigado por tudo do fundo do coração, não existem palavras suficientes que possam agradecer ou demonstrar o que sinto por vós todos.

Amor, dedicação, respeito e dignidade. Muito obrigado por tudo, irei fazer o meu melhor para viver da melhor forma possível e alcançar as vossas expectativas!

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
2. METODOLOGIA	4
2.1. DRASTIC	5
2.2. DRASTIC Pesticide.....	8
2.3. Índice de Suscetibilidade (Ribeiro, 2005)	9
2.4. Avaliação do desempenho dos Índices de avaliação de vulnerabilidade e risco.....	11
Índice de Correlação Qualitativo (ICQ)	12
Coeficiente de Determinação do Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC).....	12
3. CASO DE ESTUDO: ZONA VULNERÁVEL LITORAL CENTRO	13
3.1. Enquadramento Geográfico	13
3.2. Caracterização Geológica.....	14
3.3. Caracterização Geomorfológica	16
3.4. Caracterização Hidrogeológica.....	17
Sistemas aquíferos.....	17
Profundidade da água	19
Parâmetros hidráulicos	19
Recarga dos aquíferos.....	21
Qualidade de água	22
4. AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS NA ZV LITORAL CENTRO	23
4.1. Mapeamento dos parâmetros	24
D: Profundidade do nível freático / D: Profundidade da zona não saturada.....	24
R: Recarga do aquífero	25
A: Material do aquífero.....	26
S: Tipo de Solo	27
T: Topografia	28
I: Impacto da zona não saturada.....	29
C: Condutividade Hidráulica.....	30
LU: Ocupação do solo	31
4.2. Mapeamento do índice de vulnerabilidade pelos métodos DRASTIC, DRASTIC Pesticide e IS	32
5. ÍNDICES DE VULNERABILIDADE VS CONTAMINAÇÃO	34
5.1. Índice de Correlação Qualitativo (ICQ)	34

5.2. Condição de Determinação do Índice de Vulnerabilidade (IVC).....	37
6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS INTRÍNSECOS DOS AQUÍFEROS NA VULNERABILIDADE.....	40
7. CONCLUSÃO	50
8. BIBLIOGRAFIA	52
9. WEBGRAFIA.....	56
10. ANEXO	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Localização da Zona Vulnerável Litoral Centro em Portugal Continental (adaptada de Carvalho et al., 2019).	4
Figura 3.1: Localização da área em estudo, Zona Vulnerável Litoral Centro.	14
Figura 3.2: Formações geológicas na Zona Vulnerável Litoral Centro. Carta Geológica 1:50000, Folha 16-A Aveiro (Teixeira e Zbyszewski, 1976). Carta Geológica 1:50000, Folha 16-C Vagos (Barbosa, 1981). Carta Geológica 1:50000, Folha 19-A Cantanhede (Barbosa, 1988).	15
Figura 3.3: Mapa de declives (%) na Zona Vulnerável Litoral Centro.	16
Figura 3.4: Enquadramento da massa de água subterrânea do Maciço Antigo Indiferenciado da Bacia do Vouga (adaptada de Ribeiro, 2012).	18
Figura 3.5: Enquadramento do sistema aquífero Quaternário de Aveiro (adaptada de Almeida et al., 2000).	18
Figura 3.6: Profundidade (m) da água (ou da zona saturada) na Zona Vulnerável Litoral Centro (esquerda). Localização dos pontos de monitorização para recolha de amostras (direita).	19
Figura 3.7: Condutividade hidráulica (m/dia) na Zona Vulnerável Litoral Centro (adaptado de Carvalho et al., 2019).	20
Figura 3.8: Recarga (mm/ano) dos aquíferos na Zona Vulnerável Litoral Centro (adaptado de Carvalho et al., 2019).	21
Figura 3.9: Concentração de nitratos (mg/L NO ₃) na Zona Vulnerável Litoral Centro.	22
Figura 3.10: Concentração de Nitratos (NO ₃) (mg/L) nos locais de monitorização pela APA (dados SNIRH).	23
Figura 4.1: Mapeamento do parâmetro D: Profundidade do nível freático dos métodos DRASTIC e DRASTIC Pesticide (Esquerda); D: Profundidade da zona não saturada do método IS (Direita).	24
Figura 4.2: Mapeamento do parâmetro R: Recarga do aquífero dos métodos DRASTIC e DRASTIC Pesticide (Esquerda) e do método IS (Direita).	25
Figura 4.3: Mapeamento do parâmetro A: Material do aquífero do método DRASTIC e DRASTIC Pesticide (Esquerda) e método IS (Direita).	26
Figura 4.4: Mapa do parâmetro S: Tipo de Solo do método DRASTIC e DRASTIC Pesticide.	28
Figura 4.5: Mapa do parâmetro T: Topografia do método DRASTIC e DRASTIC Pesticide (Esquerda) e do método IS (Direita).	29
Figura 4.6: Mapa do parâmetro I: Impacto da zona não saturada do método DRASTIC e DRASTIC Pesticide.	30
Figura 4.7: Mapa do parâmetro C: Condutividade Hidráulica do método DRASTIC e DRASTIC Pesticide.	31
Figura 4.8: Mapeamento da vulnerabilidade do parâmetro LU: Ocupação do solo do IS.	32
Figura 4.9: Mapas de índices de vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação na ZV Litoral Centro: pelo Método DRASTIC (Esquerda); pelo Método DRASTIC Pesticide (Centro); pelo Método IS (Direita).	33

Figura 5.1: Classes de concentração de nitratos nas águas subterrâneas da ZV Litoral Centro: Baixo < 25 mg/L; Moderado entre 25 e 50 mg/L; Alto > 50 mg/L.	35
Figura 5.2: Classes dos índices de vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos na ZV Litoral Centro: Índice DRASTIC (Esquerda); Índice DRASTIC Pesticide (Centro); Índice IS (Direita).	35
Figura 5.3: Relação entre o índice de vulnerabilidade DRASTIC e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	37
Figura 5.4: Correlação entre o índice de vulnerabilidade condicionado (IVC) obtido do método DRASTIC e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	38
Figura 5.5: Relação entre o índice de vulnerabilidade DRASTIC Pesticide e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	38
Figura 5.6: Correlação entre o índice de vulnerabilidade condicionado (IVC) obtido do método DRASTIC Pesticide e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	38
Figura 5.7: Relação entre o índice de vulnerabilidade IS e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	39
Figura 5.8: Correlação entre o índice de vulnerabilidade condicionado (IVC) obtido do método IS e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	39
Figura 6.1: Relação entre o índice do parâmetro D: Profundidade do nível freático/Zona vadosa e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	41
Figura 6.2: Correlação entre o parâmetro D: Profundidade do nível freático/Zona vadosa normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro. ..	42
Figura 6.3: Relação entre o índice do parâmetro R: Recarga do aquífero e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	42
Figura 6.4: Correlação entre o parâmetro R: Recarga do aquífero normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	43
Figura 6.5: Relação entre o índice do parâmetro A: Material do aquífero do IS e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	43
Figura 6.6: Correlação entre o parâmetro A: Material do aquífero do IS normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	44
Figura 6.7: Relação entre o índice do parâmetro A: Material do aquífero do DRASTIC e DRASTIC Pesticide e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	44
Figura 6.8: Correlação entre o parâmetro A: Material do aquífero do DRASTIC e DRASTIC Pesticide normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	45
Figura 6.9: Relação entre o índice do parâmetro S: Tipo do Solo do DRASTIC e DRASTIC Pesticide e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro. ..	45
Figura 6.10: Correlação entre o parâmetro S: Tipo do Solo do DRASTIC e DRASTIC Pesticide normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	46

Figura 6.11: Relação entre o índice do parâmetro T: Topografia e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	46
Figura 6.12: Correlação entre o parâmetro T: Topografia normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	47
Figura 6.13: Relação entre o índice do parâmetro I: Impacto da zona não saturada do DRASTIC e DRASTIC Pesticide e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	47
Figura 6.14: Correlação entre o parâmetro I: Impacto da zona não saturada do DRASTIC e DRASTIC Pesticide normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	48
Figura 6.15: Relação entre o índice do parâmetro C: Condutividade Hidráulica do DRASTIC e DRASTIC Pesticide e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	48
Figura 6.16: Correlação entre o parâmetro C: Condutividade Hidráulica do DRASTIC e DRASTIC Pesticide normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	49
Figura 6.17: Relação entre o índice do parâmetro LU: Ocupação do Solo IS e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	49
Figura 6.18: Correlação entre o parâmetro LU: Ocupação do Solo do IS normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.	50

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Classificação do parâmetro D: Profundidade do nível freático	6
Tabela 2.2: Classificação do parâmetro R: Recarga do aquífero	7
Tabela 2.3: Classificação do parâmetro A: Material do aquífero	7
Tabela 2.4: Classificação do parâmetro S: Tipo de Solo	7
Tabela 2.5: Classificação do parâmetro T: Topografia	7
Tabela 2.6: Classificação do parâmetro I: Impacto da zona não saturada	8
Tabela 2.7: Classificação do parâmetro C: Condutividade hidráulica	8
Tabela 2.8: Classificação do parâmetro D: Profundidade da zona não saturada	10
Tabela 2.9: Classificação do parâmetro R: Recarga do aquífero	10
Tabela 2.10: Classificação do parâmetro A: Material do aquífero	10
Tabela 2.11: Classificação do parâmetro T: Topografia	10
Tabela 2.12: Classificação do parâmetro LU: Ocupação do Solo, com base na carta CORINE Land Cover (CNIG, 1988)	11
Tabela 4.1: Classificação da Vulnerabilidade para o Método Índice de Susceptibilidade (Ribeiro, 2005) segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012	33
Tabela 5.1: Correlação Qualitativa (CQ) entre as classes de vulnerabilidade de contaminação de aquíferos e as classes de concentração de nitratos nas águas subterrâneas	34
Tabela 5.2: Índice de Correlação Qualitativo do Método DRASTIC, obtido pela soma da CQ, obtido em cada ponto de observação	36
Tabela 5.3: Índice de Correlação Qualitativo do Método DRASTIC Pesticide, obtido pela soma da CQ, obtido em cada ponto de observação	36
Tabela 5.4: Índice de Correlação Qualitativo do Método Índice de Suscetibilidade (Ribeiro, 2005), obtido pela soma da CQ, obtido em cada ponto de observação	36
Tabela 6.1: Valor do Coeficiente de Determinação (R^2) entre os parâmetros dos métodos de determinação da vulnerabilidade e a concentração de nitratos na água subterrânea	40
Tabela 10.1: Método do Índice de Correlação Qualitativo (ICQ), dados utilizados para o Método DRASTIC	58
Tabela 10.2: Método do Índice de Correlação Qualitativo (ICQ), dados utilizados para o Método DRASTIC Pesticide	59
Tabela 10.3: Método do Índice de Correlação Qualitativo (ICQ), dados utilizados para o Método IS (Ribeiro, 2005)	60
Tabela 10.4: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o Método DRASTIC e DRASTIC Pesticide, PARTE 1	61
Tabela 10.5: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o Método DRASTIC e DRASTIC Pesticide, PARTE 2	62

Tabela 10.6: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o Método DRASTIC e DRASTIC Pesticide, PARTE 3	63
Tabela 10.7: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o Método DRASTIC e DRASTIC Pesticide, PARTE 4	64
Tabela 10.8: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o Método DRASTIC e DRASTIC Pesticide, PARTE 5	65
Tabela 10.9: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o Método DRASTIC e DRASTIC Pesticide, PARTE 6	66
Tabela 10.10: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o Método DRASTIC e DRASTIC Pesticide, PARTE 7	67
Tabela 10.11: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o IS (Ribeiro, 2005), PARTE 1	68
Tabela 10.12: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o IS (Ribeiro, 2005), PARTE 2.....	69
Tabela 10.13: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o IS (Ribeiro, 2005), PARTE 3.....	70
Tabela 10.14: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o IS (Ribeiro, 2005), PARTE 4.....	71
Tabela 10.15: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o IS (Ribeiro, 2005), PARTE 5.....	72
Tabela 10.16: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados utilizados para o Método DRASTIC	73
Tabela 10.17: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados utilizados para o Método DRASTIC Pesticide.....	74
Tabela 10.18: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados utilizados para o Método IS (Ribeiro, 2005)	75

ACRÓNIMOS

APA – Agência Portuguesa do Ambiente;

CCRD – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional;

CE – Comunidade Europeia;

COS – Carta de Uso e Ocupação do Solo;

CQ – Correlação Qualitativa;

DRAPCentro – Direção Regional de Agricultura e Pescas do Centro;

DQA – Diretiva Quadro de Água;

EPA – Environmental Protection Agency;

ICQ – Índice de Correlação Qualitativo;

IS – Índice de Suscetibilidade;

IVC – Índice de Vulnerabilidade Condicionado;

MDT – Modelo Digital de Terreno;

REN – Reserva Ecológica Nacional;

SAU – Superfície Agrícola Utilizada;

SIG – Sistemas de Informação Geográfica;

SNIAmb – Sistema Nacional de Informação Ambiental;

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos;

ZV – Zona Vulnerável.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A crescente preocupação com a contaminação de águas subterrâneas tem levado à procura de soluções que passam pela proteção dos aquíferos à contaminação. A melhor forma de proteger um aquífero é conhecer a sua vulnerabilidade e condicionar a ocupação do solo a determinadas atividades antrópicas que possam conduzir à deterioração deste recurso vital para as populações e ecossistemas, que é a água subterrânea.

Vulnerabilidade de um aquífero à contaminação é definida como o potencial de suscetibilidade da água subterrânea a uma fonte poluente. Os métodos de avaliação de vulnerabilidade utilizam um sistema de cálculo com base em vários fatores intrínsecos aos aquíferos, nomeadamente características geológicas, hidrológicas, hidrogeológicas e geomorfológicas. Esta avaliação permite estimar o grau de proteção natural do aquífero a uma potencial contaminação extrínseca (Almeida *et al.*, 2000).

Existem dois tipos de vulnerabilidade definidos, a vulnerabilidade intrínseca, a qual tem em especial consideração as propriedades geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas dos aquíferos, independente do tipo de poluente, e a vulnerabilidade específica, ou seja, à vulnerabilidade intrínseca é adicionado o risco de contaminação ou propriedades do poluente (Ribeiro, 2005). Por sua vez, o risco à contaminação representa a probabilidade de contaminação, isto é, é necessária a presença do poluente para que possa ocorrer contaminação.

Para a avaliação da vulnerabilidade e risco de contaminação de aquíferos têm sido desenvolvidas diferentes metodologias, mas a maioria com suporte em ferramentas de informação geográfica (SIG). Estas ferramentas SIG permitem a visualização, análise e interpretação de padrões e tendências através de mapas e modelos conceptuais em 3D, com componente geográfica.

São vários os métodos de avaliação de vulnerabilidade e risco de contaminação conhecidos, sendo os mais utilizados: o método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) e DRASTIC Pesticide (Aller *et al.*, 1987), com aplicação a aquíferos porosos; o método EPIK (Doerfliger e Zwahlen, 1997), desenvolvido para aplicação em aquíferos cársicos; o VULFRAC (Fernandes, 2003) aplicável a aquíferos em rochas fissuradas ou fraturadas; o Índice de Suscetibilidade (IS) de Ribeiro (2005); o POSH (Foster *et al.*, 2002) e Fuzzy (Zhou *et al.*, 1999).

Em Portugal as metodologias mais utilizadas para a caracterização da vulnerabilidade e risco de aquíferos à contaminação têm sido o método DRASTIC e o IS, mesmo em aquíferos que não têm comportamento de aquíferos porosos, devido à sua facilidade de aplicação. As entidades tutelares e gestores do ambiente e dos recursos hídricos (Agência Portuguesa do Ambiente, APA, Regiões Hidrográficas, Centros de Coordenação Regional Desenvolvimento, CCRD) com competência para a aprovação das propostas de REN apresentadas pelos municípios, aconselham a utilização do método IS (só componente de vulnerabilidade intrínseca), acompanhado do cálculo do Índice de Recarga Efetiva para os aquíferos porosos, o método EPIK (Doerfliger e Zwahlen, 1997) em aquíferos cársicos e o VULFRAC (Fernandes, 2003) em rochas fissuradas ou fraturadas.

O mapeamento da vulnerabilidade e risco da contaminação de aquíferos é fundamental para uma correta gestão do solo e dos recursos hídricos subterrâneos. Como descrito, são numerosos os modelos desenvolvidos para avaliação da vulnerabilidade e risco, no entanto, a aplicação desses modelos é complexa e imprecisa, conduzindo a conclusões discrepantes. Assim, é fundamental a contínua procura de métodos que permitam desenvolver modelos preditivos mais aproximados à realidade, nomeadamente através da melhor estimativa de parâmetros hidrogeológicos e conhecimento dos processos que intervêm na contaminação das águas subterrâneas.

Apesar de medidas restritivas ao uso de fertilizantes no solo, para evitar a contaminação dos solos e aquíferos, o ião nitrato (NO_3) continua a ser o principal contaminante das águas subterrâneas, quer em zonas rurais como urbanas. A utilização dos fertilizantes azotados de forma excessiva e não racional conduz ao aumento da concentração em nitratos nas plantas e no solo, que sofrendo processos de degradação e/ou lixiviação causam a poluição das águas subterrâneas e das águas superficiais (Fadiran e Mamba, 2005).

O azoto (N) é um elemento necessário à vida e importante para o desenvolvimento das plantas, sendo um dos principais macronutrientes no desenvolvimento das culturas agrícolas. A sua grande importância no desenvolvimento rápido das plantas e animais faz com que a sua utilização na atividade agrícola e pecuária seja de grande importância, na forma de fertilizantes azotados. Sob a forma de ião nitrato possui uma elevada mobilidade promovida pela baixa retenção do solo, podendo assim ser lixiviado e poluir cursos de água próximos (escorrência superficial) ou aquíferos (infiltração) (Perez *et al.*, 1998).

Com a preocupação de proteger o recurso água nos países da Comunidade Europeia, o Conselho Europeu criou a Directiva Quadro de Água (Directiva 2000/60/CE, de 23 de outubro de 2000, DQA) que estabelece uma série de parâmetros e medidas a cumprir, pelos Estados Membros da CE para a proteção das águas superficiais, de transição, costeiras e subterrâneas. A gestão sustentável da água é o seu objetivo principal, sendo considerada um património que deve ser protegido a longo prazo dos recursos hídricos disponíveis, defendido e melhorado o estado dos ecossistemas aquáticos e os envolventes dependentes deste, e tratado de forma adequada que assegure a redução da poluição das águas e/ou evite o seu agravamento. A DQA foi transporta para a Lei portuguesa através da Lei da Água (Decreto – Lei n.º 226 – A/2007 de 31 de Maio).

A Directiva “Nitratos” (Directiva 91/676/CEE, de 12 de dezembro de 1991) tem como objetivo a redução da poluição das águas causadoras ou induzidas por nitratos de origem agrícola de forma a impedir a propagação destas águas no próprio sistema ou em adjacentes. Neste contexto, a Directiva “Nitratos” tem um conjunto de objetivos semelhantes à DQA (2000), no entanto, dirigida apenas à contaminação por nitratos de origem agrícola. Para que sejam atingidos estes objetivos, os Estados Membros da CE devem implementar ações e medidas para a redução da introdução do ião nitrato nos solos e recursos hídricos, que passam pela monitorização da qualidade das águas até à elaboração de um regime de boas práticas agrícolas. Estas ações e medidas são aplicadas a zonas em que as águas subterrâneas apresentam concentração em ião NO_3 na água superior a 50 mg/L, designadas por Zonas Vulneráveis a Nitratos de Origem Agrícola (ZV).

A ZV compreende, assim áreas de carácter legal com a principal função de proteger as águas contra a poluição causada por nitratos de origem agrícola (Portaria n.º 164/2010, de 16 março). Estas áreas são designadas pela presença de águas poluídas por nitratos de origem agrícola e/ou de águas suscetíveis de o virem a ser. Sendo tal identificação realizada pelos Ministérios da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas e do Ambiente e do Ordenamento do Território.

O Programa de Ação da ZV tem em atenção as necessidades das culturas e as quantidades máximas de azoto a aplicar, limitando a quantidade de fertilizantes utilizados, elaboração de planos e balanços de fertilização, nomeadamente em solo inundados ou inundáveis, e constante monitorização (Portaria n.º 259/2012, de 28 de agosto). A monitorização é realizada pela DRAPCentro e APA.

Em Portugal Continental estão delimitadas e aprovadas 9 ZV (Portaria n.º 164/2010, de 16 março): Esposende – Vila do Conde; Estarreja – Murtosa; Litoral Centro; Tejo; Estremoz – Cano; Elvas; Beja; Faro; Luz – Tavira (Figura 1.1).

As ZV abrangem uma área de 4,5% do território nacional e têm como principais objetivos:

- Manter os recursos hídricos renováveis disponíveis e o aproveitamento sustentável dos recursos hídricos subterrâneos;
- Contribuir para a proteção da qualidade da água;
- Assegurar a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos e da biodiversidade dependentes da água, com particular incidência na época do Verão;
- Reduzir a probabilidade de poluição das águas presentes ou próximas susceptíveis de serem contaminadas pela presença de atividade agrícola.

Nestas áreas é obrigatória a aplicação das medidas do Programa de Ação (Portaria nº 259/2012, de 28 de agosto) para prevenir e reduzir a contaminação dos nitratos de origem agrícola. Apesar deste programa de medidas nas ZV a concentração excessiva de nitratos nas águas subterrâneas mantém-se, ocorrendo mesmo um ligeiro aumento da concentração do ião na água de algumas ZV (APA, 2021).

As explorações agrícolas e pecuárias presentes totalmente ou parcialmente na ZV, com mais de 2 ha de SAU, com mais de 1 ha de cultura arbóreas e/ou arbustivas, ou com mais de 0,5 ha de floricultura e/ou hortícolas são obrigadas ao cumprimento das regras referidas no Programa de Ação (Martins, 2016). O Programa de Ação foi estabelecido nos termos da Portaria nº 259/2012, de 28 de agosto. Os titulares das respetivas explorações estão sujeitos a um conjunto de obrigações, sendo que o incumprimento das medidas apresentadas no Programa de Ação está sujeito a procedimento contraordenacional e a sanções, sendo punível com coimas variáveis (Martins, 2016).

De acordo com o artigo 4º a 15º da Portaria 259/2012, de 28 agosto, salienta-se a obrigatoriedade de várias medidas, nomeadamente:

- Respeitar as épocas de aplicação e interdição de utilização de fertilizantes;
- Respeitar a distância de aplicação de fertilizante;
- Análises de Terra, anualmente;
- Análises de Água, anualmente;
- Análises Foliares, anualmente;
- Elaborar um Plano de Gestão de Fertilização e Fichas de Registo de fertilização.

Neste contexto, o trabalho visa a comparação destas metodologias: Índice de Suscetibilidade (Ribeiro, 2005), DRASTIC e DRASTIC Pesticide (Aller *et al.*, 1987) com aplicação numa determinada área do território, com vista a analisar os resultados obtidos por avaliação de vulnerabilidade e risco, intrínseca e específica e com a ocorrência de contaminação nos aquíferos. A Zona Vulnerável a nitratos de origem agrícola, ZV do Litoral Centro foi escolhida como área de estudo por apresentar várias características peculiares, nomeadamente a presença de um dos principais sistemas aquíferos na área de Portugal Continental, o Sistema Aquífero Quaternário de Aveiro, e observação de um nível de concentração de nitratos na água elevado devido à atividade agrícola presente, daí a sua definição como ZV (Figura 1.1).

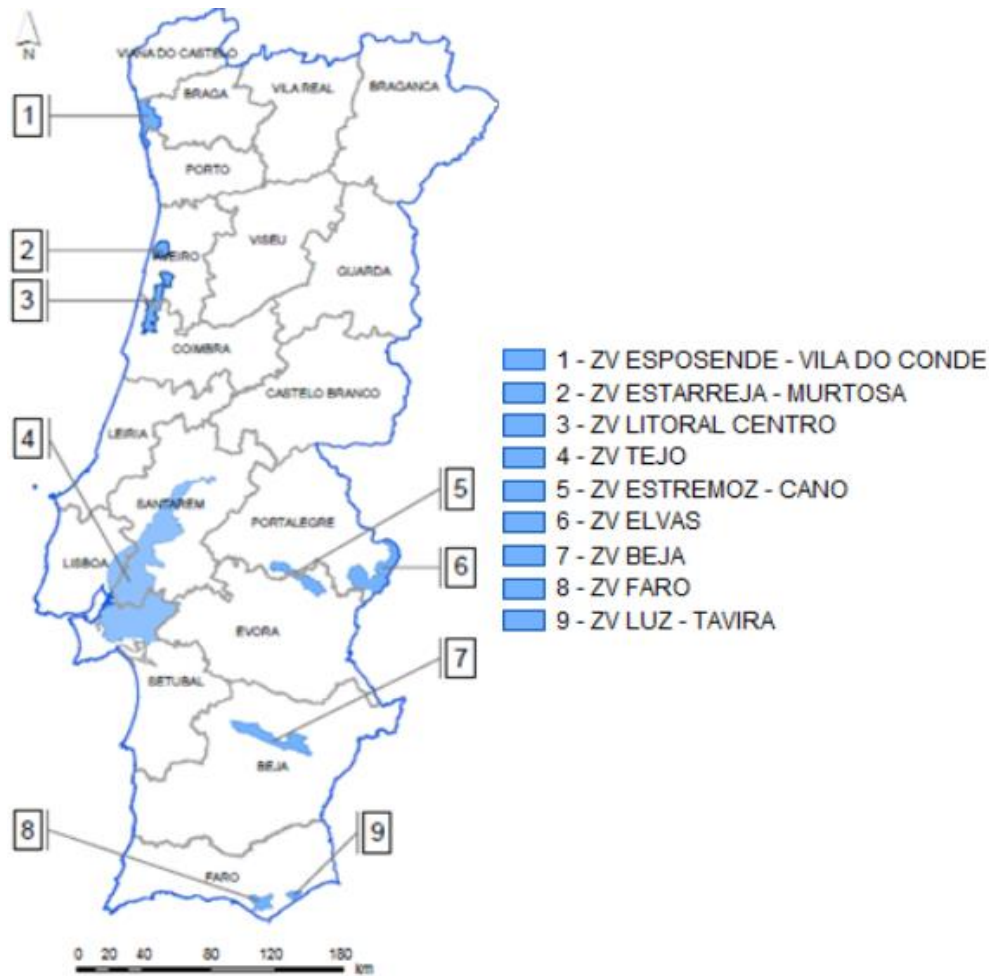


Figura 1.1: Localização da Zona Vulnerável Litoral Centro em Portugal Continental (adaptada de Carvalho *et al.*, 2019).

2. METODOLOGIA

Para se atingirem os objetivos propostos neste projeto de tese, os trabalhos foram desenvolvidos por diferentes etapas que a seguir se descrevem:

- Recolha bibliográfica sobre métodos de mapeamento da vulnerabilidade e risco de aquíferos porosos à contaminação;
- Recolha de dados geológicos, hidrogeológicos e de qualidade da água integrados na ZV Litoral Centro;
- Aplicação de métodos estatísticos a parâmetros hidráulicos e de concentração do ião nitratos para interpolação espacial e análise da evolução temporal com ferramentas SIG;
- Mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação por nitratos com o recurso ferramentas SIG, aplicando os métodos DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), DRASTIC Pesticide (Aller *et al.*, 1987) e Índice de Suscetibilidade (Ribeiro, 2005);

- Estudo da correlação entre os índices de vulnerabilidade obtidos pelos diferentes métodos e a concentração de nitratos na área em estudo, com o objetivo de se identificar o método preditivo mais adequado a situações de contaminação com características semelhantes à da ZV. Foram utilizadas duas metodologias, o Índice de Correlação Qualitativo (ICQ) (proposto por Nadiri *et al.*, 2017) e o Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC) (adaptado de Nadiri *et al.*, 2017), que abaixo se descrevem;
- Análise de sensibilidade dos parâmetros intrínsecos dos aquíferos nos métodos de avaliação de vulnerabilidade e risco.

2.1. DRASTIC

O método de mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos à poluição DRASTIC foi desenvolvido pelo *National Water Well Association* (Aller *et al.*, 1987) em colaboração com a *Environmental Protection Agency* (EPA).

O método consiste no cálculo de um índice de vulnerabilidade que tem por base a soma ponderada de 7 parâmetros intrínsecos dos aquíferos discretizados numa malha: profundidade do nível freático (D); recarga do aquífero (R); material do aquífero (A); tipo de solo (S); topografia (T); impacto da zona não saturada (I) e condutividade hidráulica (C). Os diferentes parâmetros são distribuídos por classes de vulnerabilidade que variam entre 1 a 10, sendo a classe 1 menos vulnerável e a classe 10 a mais vulnerável.

O índice DRASTIC é obtido através da soma ponderada dos diferentes parâmetros e calculado pela seguinte equação:

$$DRASTIC = 5 D + 4 R + 3 A + 2 S + 1 T + 5 I + 3 C \quad \text{Equação 2.1}$$

- D: Profundidade do nível freático: este parâmetro representa a distância na vertical entre a superfície topográfica e a superfície freática, relaciona-se com, a espessura do material geológico que o contaminante tem que atravessar para atingir a zona saturada do aquífero. Quanto mais profunda estiver a superfície freática, menos contribui para a vulnerabilidade do aquífero (Tabela 2.1).
- R: Recarga do aquífero: expressa a quantidade de água, que após a infiltração no solo, chega à superfície freática, quanto maior a recarga, maior a vulnerabilidade do aquífero, pois a recarga facilita o transporte dos poluentes para a profundidade (Tabela 2.2).
- A: Material do aquífero: refere-se à litologia do aquífero, a qual determina a capacidade de atenuação dos poluentes, por meio de características como o tamanho dos grãos, a fissuração e a existência de cavidades; quanto maior a porosidade eficaz e fissurado o material, menor a capacidade de atenuação ou retenção de um poluente (Tabela 2.3).

- **S: Tipo de Solo:** este parâmetro caracteriza o tipo de solo que cobre o terreno e aquífero e que condiciona a infiltração da água e dos contaminantes em profundidade, está diretamente ligado à permeabilidade do solo, por exemplo, um solo argiloso possui maior capacidade de retenção devido à sua baixa permeabilidade e porosidade eficaz, aumentando o tempo de retenção do contaminante no solo (Tabela 2.4).
- **T: Topografia:** refere-se ao declive da superfície do terreno, o qual condiciona a possibilidade de um poluente escoar superficialmente ou de permanecer à superfície durante um tempo suficiente para a sua infiltração, maiores declives dão origem a maiores gradientes hidráulicos, proporcionando maiores velocidades de escoamento superficial, dificultando, assim, a infiltração e progressão de um poluente em profundidade para atingir o aquífero (Tabela 2.5).
- **I: Impacto da zona não saturada:** designada como a zona entre o solo superficial e o nível freático, o parâmetro **I** caracteriza o material constituinte desta zona, o qual condiciona o tempo que o contaminante leva a atingir o nível freático (Tabela 2.6), retardando a progressão de um poluente para a profundidade.
- **C: Condutividade hidráulica:** expressa a velocidade da água no interior do aquífero e relaciona-se com a permeabilidade do material aquífero; quanto maior a sua permeabilidade, menor o tempo que o contaminante necessita para percorrer o aquífero, aumentando a contaminação deste (Tabela 2.7).

Tabela 2.1: Classificação do parâmetro D: Profundidade do nível freático

Classe – Profundidade da água no aquífero (m)	Valor D
< 1,5	10
1,5 – 4,6	9
4,6 – 9,1	7
9,1 – 15,2	5
15,2 – 22,9	3
22,9 – 30,5	2
> 30,5	1

Tabela 2.2: Classificação do parâmetro **R: Recarga do aquífero**

Classe – Recarga do aquífero (mm)	Valor R
< 51	1
51 – 102	3
102 – 178	6
178 – 254	8
> 254	9

Tabela 2.3: Classificação do parâmetro **A: Material do aquífero**

Classe – Material do aquífero	Valor A	Valor Típico A
Xisto Argiloso, argilito	1 – 3	2
Rocha metamórfica/ígnea	2 – 5	3
Rocha metamórfica/ígnea alterada	3 – 5	4
“Till” glacial	4 – 6	5
Arenito, calcário e argilitos estratificados	5 – 9	6
Arenito maciço	4 – 9	6
Calcário maciço	4 – 9	8
Areia e balastro	4 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Calcário Carsificado	9 – 10	9

Tabela 2.4: Classificação do parâmetro **S: Tipo de Solo**

Classe – Tipo de Solo	Valor S
Fino ou Ausente	10
Balastro	10
Areia	9
Turfa	8
Argila agregada e/ou expansível	7
Franco arenoso	6
Franco	5
Franco siltoso	4
Franco argiloso	3
Lodo	2
Argila não agregada e não expansível	1

Tabela 2.5: Classificação do parâmetro **T: Topografia**

Classe – Declive (%)	Valor T
< 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
> 18	1

Tabela 2.6: Classificação do parâmetro **I: Impacto da zona não saturada**

Classe – Material da zona não saturada	Valor I	Valor Típico I
Camada Confinante	1	1
Argila/Silte	2 – 6	3
Xisto Argiloso, argilito	2 – 6	3
Calcário	2 – 5	3
Arenito maciço	2 – 7	6
Arenito, calcário e argilito estratificados	4 – 8	6
Areia e balastro com percentagem significativa de silte e argila	4 – 8	6
Areia e balastro	4 – 8	8
Basalto	2 – 10	9
Calcário Carsificado	8 – 10	10

Tabela 2.7: Classificação do parâmetro **C: Condutividade hidráulica**

Classe – Condutividade hidráulica, K (m/d)	Valor C
0 – 4,1	1
4,1 – 12,2	2
12,2 – 28,5	4
28,5 – 40,7	6
40,7 – 81,5	8
> 81,5	10

2.2. DRASTIC Pesticide

O método de mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos à poluição DRASTIC Pesticide foi também desenvolvido pela *National Water Well Association* (Aller *et al.*, 1987), com o objetivo da sua aplicação a zonas agrícolas, onde existe o risco de contaminação por pesticidas.

O método DRASTIC Pesticide corresponde à soma ponderada dos 7 parâmetros do método DRASTIC anteriormente apresentados. A diferença fundamental entre os dois métodos é o peso atribuído a cada parâmetro na obtenção do índice final, sendo dada maior importância aos parâmetros S (Tipo de Solo) e T (Declive do terreno). As classes de classificação para cada parâmetro do método DRASTIC Pesticide variam entre 1 a 10 dependente do seu potencial de vulnerabilidade, tal como no método DRASTIC.

O índice DRASTIC Pesticide é obtido por meio da soma ponderada dos diferentes parâmetros, calculada pela seguinte equação:

$$DRASTIC\ Pesticide = 5D + 4R + 3A + 5S + 3T + 4I + 2C \quad \text{Equação 2.2}$$

2.3. Índice de Suscetibilidade (Ribeiro, 2005)

O Índice de Suscetibilidade (IS) foi desenvolvido por Ribeiro (2005) com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos porosos ou com dupla porosidade, como é o caso dos aquíferos com comportamentos misto, seguindo os fundamentos básicos do Índice DRASTIC. Tendo em consideração que este método de avaliação da vulnerabilidade foi desenvolvido para aquíferos livres, Ribeiro (2005) considerou existir sobreposição dos parâmetros S (Tipo de solo), I (Impacto da zona não saturada) e C (Condutividade Hidráulica) com o parâmetro A (Material do aquífero), tendo retirado estes parâmetros do cálculo do IS.

O IS considera não apenas a vulnerabilidade intrínseca, mas também a vulnerabilidade específica, acrescentando ao método um parâmetro associado ao risco de contaminação, isto é, à Ocupação do solo (LU).

As classes de classificação utilizadas para os parâmetro D, R, A e T são as mesmas do DRASTIC, mas os índices variam entre 1 e 100, correspondendo o valor de 100 à classe em que o parâmetro contribui para a maior vulnerabilidade. Para o parâmetro LU (Ocupação do Solo), Ribeiro (2005) propôs os valores constantes da Tabela 2.12.

O índice IS é obtido por meio da soma ponderada dos diferentes parâmetros, e calculado pela seguinte equação:

$$IS = 0,186 D + 0,212 R + 0,259 A + 0,121 T + 0,222 LU \quad \text{Equação 2.3}$$

- D: Profundidade da zona não saturada: com o mesmo significado que no método DRASTIC, quanto mais profunda estiver a superfície freática, menos vulnerável será o aquífero em causa (Tabela 2.8).
- R: Recarga do aquífero: com o mesmo significado que no método DRASTIC, quanto maior a recarga, maior a vulnerabilidade do aquífero (Tabela 2.9).
- A: Material do aquífero: determina a capacidade de atenuação dos efeitos dos poluentes, por meio de características como o tamanho dos grãos, com as classes litológicas semelhantes às utilizadas pelo método DRASTIC (Tabela 2.10).
- T: Topografia: com o mesmo significado que no método DRASTIC, quanto maior o declive menor a vulnerabilidade do aquífero (Tabela 2.11).
- LU: Ocupação do solo: classifica a ocupação do solo e atividades exercidas sobre o terreno em função do seu potencial de contaminação relacionando-se com a vulnerabilidade específica dos aquíferos; o parâmetro uso ou ocupação do solo é dividido por classes, tendo por base a classificação da carta CORINE Land Cover (CNIG, 1988) (Tabela 2.12).

Tabela 2.8: Classificação do parâmetro **D: Profundidade da zona não saturada**

Classe – Profundidade da água do aquífero (m)	Valor D
< 1,5	100
1,5 – 4,6	90
4,6 – 9,1	70
9,1 – 15,2	50
15,2 – 22,9	30
22,9 – 30,5	20
> 30,5	10

Tabela 2.9: Classificação do parâmetro **R: Recarga do aquífero**

Classe – Recarga do aquífero (mm)	Valor R
< 51	10
51 – 102	30
102 – 178	60
178 – 254	80
> 254	90

Tabela 2.10: Classificação do parâmetro **A: Material do aquífero**

Classe – Material do aquífero	Valor A	Valor Típico A
Xisto Argiloso, argilito	10 – 30	20
Rocha metamórfica/ígnea	20 – 50	30
Rocha metamórfica/ígnea alterada	30 – 50	40
“Till” glacial	40 – 60	50
Arenito, calcário e argilitos estratificados	50 – 90	60
Arenito maciço	40 – 90	60
Calcário maciço	40 – 90	80
Areia e balastro	40 – 90	80
Basalto	20 – 100	90
Calcário Carsificado	90 – 100	90

Tabela 2.11: Classificação do parâmetro **T: Topografia**

Classe – Declive (%)	Valor T
< 2	100
2 – 6	90
6 – 12	50
12 – 18	30
> 18	10

Tabela 2.12: Classificação do parâmetro LU: Ocupação do Solo, com base na carta CORINE Land Cover (CNIG, 1988)

Classe – Ocupação do solo	Valor LU
Descargas industriais, zonas de empalhamento de lixos	100
Perímetros regados, arrozais	90
Pedreiras, zonas de extração de areia, minas a céu aberto, estaleiros	80
Aeroportos, zonas portuárias, infraestruturas da rede de autoestradas e da rede ferroviária	75
Espaços de atividades industriais, comerciais e de equipamentos gerais	75
Espaços verdes e urbanos	75
Zonas com equipamentos desportivos e de ocupação de tempos livres	75
Tecido urbano contínuo	75
Tecido urbano descontínuo	70
Culturas permanentes (vinhas, pomares, oliveiras, etc.)	70
Culturas anuais associadas às culturas permanentes	50
Pastagens	50
Florestas e meios seminaturais, superfícies com água	0
Terras ocupadas principalmente por agricultura com espaços naturais importantes	50
Sistemas culturais e parcelares complexos	50
Territórios agroflorestais	50
Meios aquáticos (sapais, salinas, etc.)	50

2.4. Avaliação do desempenho dos Índices de avaliação de vulnerabilidade e risco

O principal objetivo deste projeto é avaliar o desempenho da aplicação das diferentes metodologias de avaliação de vulnerabilidade, intrínseca e específica, comparando os valores dos índices com a ocorrência de contaminação nos aquíferos. Deste modo, procede-se à avaliação da correlação entre o mapeamento dos índices obtidos pelos diferentes métodos e a concentração de nitratos nos aquíferos da ZV Litoral Centro. A análise das correlações permitirá apontar o método de avaliação de vulnerabilidade e risco que melhor se adapta a aquíferos porosos em risco de contaminação por nitratos de origem agrícola.

A relação entre a vulnerabilidade estimada pelas diferentes metodologias e a concentração de nitratos na água subterrânea da ZV foi determinada através de dois procedimentos distintos: (i) Índice de Correlação Qualitativo (ICQ), aplicado a classes de valores, e (ii) Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), determinando o Coeficiente de Determinação (R^2), aplicado às séries de valores de índice de vulnerabilidade e de concentração de ião nitrato.

As amostras utilizadas correspondem aos pares Índice vs Concentração de nitrato no local das 43 estações de monitorização da qualidade da água subterrânea da APA. Os índices foram determinados pelas três metodologias atrás descritas e os dados relativos à concentração de nitratos referem-se ao ano hidrológico 2018/2019 (disponíveis na plataforma SNIRH – www.snirh.pt)

O método IVC também será aplicado aos diferentes parâmetros que compõem os métodos de avaliação de vulnerabilidade e risco, de forma a observar quais os que possuem maior impacto na formação dos seus respetivos Índices de Vulnerabilidade.

Índice de Correlação Qualitativo (ICQ)

A Correlação Qualitativa (CQ) baseia-se na relação direta entre classes de qualidade da água subterrânea e classes do índice de vulnerabilidade (Nadiri *et al.*, 2017), a qual permite calcular um Índice de Correlação Qualitativo (ICQ) para cada uma das metodologias de determinação da vulnerabilidade de aquíferos, e verificar a proximidade entre o índice de vulnerabilidade e a contaminação. Para a formulação do método procede-se da seguinte forma:

1. As concentrações de nitratos analisadas nas águas são agrupadas em três classes de nitrato: Baixa, quando as concentrações são inferiores a 25 mg/L, Moderada quando o NO_3 se encontra entre 25 e 50 mg/L, e Alta, para valores de nitrato superiores a 50 mg/L.
2. Os índices de vulnerabilidade são agrupados também em três classes. No caso do IS as classes definidas são: Baixa com IS entre 0 – 50%, Moderada, com IS entre 50 – 70% e Alta, com IS > 70%. Os índices DRASTIC e DRASTIC Pesticide foram divididos nas seguintes classes de vulnerabilidade: Baixa, com índice entre 23 – 68, Moderada, com índice entre 68 – 159 e Alta, com índice entre 159 – 226.
3. A CQ é avaliada para cada ponto de observação (43), comparando-se as classes de índice de vulnerabilidade com as classes de concentração de nitratos. A CQ tem valor máximo de “3” quando a diferença de classes corresponder a 0, i.e., máxima coincidência, por exemplo, se num específico ponto a classe nitrato for Moderada e a classe de vulnerabilidade também Moderada. É atribuído o valor de “2” à CQ se a diferença apresentada for de 1 classe, por exemplo, uma classe de concentração de nitratos Baixa e de índice de vulnerabilidade Moderada. A CQ tem o valor de “1” se a diferença entre as classes nitrato e vulnerabilidade for de 2 classes, a maior diferença, por exemplo, classe de concentração de nitrato Baixa e de vulnerabilidade Alta.
4. No final, é calculado o ICQ para cada método de cálculo da vulnerabilidade e risco (DRASTIC, DRASTIC Pesticide e IS), através da soma ponderada dos valores das CQ. Quanto maior o ICQ, maior a correlação entre a vulnerabilidade estimada e a contaminação real, i.e., maior o desempenho do método de avaliação de vulnerabilidade e risco.

Coeficiente de Determinação do Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC)

Para o cálculo do Coeficiente de Determinação (R^2), entre os índices de vulnerabilidade e as concentrações em nitrato, foi necessário proceder à normalização dos índices de vulnerabilidade (IVC). O IVC é obtido através da aplicação da equação (2.4). Quanto mais próximo de 1 for o Coeficiente de Determinação (R^2) entre o IVC e a concentração de nitrato para um determinado local, maior a correlação e melhor o desempenho do método de cálculo da vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação.

A equação de cálculo para determinar o Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC) é a seguinte:

$$IVC = \frac{(VI)_i}{(NO_3 - N)_{m\acute{a}x}} * (NO_3 - N)_i \quad \text{Equação 2.4}$$

Em que:

IVC – Índice de Vulnerabilidade Condicionado;

$(VI)_i$ – Índice de Vulnerabilidade calculado com o método aplicado num determinado ponto de controlo;

$(NO_3 - N)_{m\acute{a}x}$ – Concentração máxima de Nitrato na área em estudo;

$(NO_3 - N)_i$ – Concentração de Nitrato num determinado ponto de controlo.

Por sua vez, o Coeficiente de Determinação (R^2), é observado pela formulação dos gráficos com os resultados obtidos dos IVC vs Concentração de Nitrato apresentada na ZV, para os métodos de avaliação de vulnerabilidade e risco e os seus respetivos parâmetros. Quanto maior for o R^2 , maior será a correlação do método de avaliação ou o parâmetro em estudo com a concentração de nitrato na ZV.

3. CASO DE ESTUDO: ZONA VULNERÁVEL LITORAL CENTRO

3.1. Enquadramento Geográfico

A ZV Litoral Centro está localizada em Portugal Continental, corresponde a uma área total aproximada de 236,88 km² (DRAPCentro, 2020) Abrange terrenos pertencentes aos distritos de Aveiro e Coimbra (Figura 3.1). No distrito de Aveiro cobre parte dos concelhos de Ílhavo e Vagos e os concelhos de Mira e Cantanhede no distrito de Coimbra. Ambos os distritos possuem grande ocupação antrópica, com intensa atividade agrícola e pecuária. A ZV é dividida a meio pelo Rio Boco, com aproximadamente 7 km de comprimento. Este rio nasce em Cantanhede e passa pelos concelhos de Vagos e Ílhavo, onde o canal apresenta maiores dimensões, até a sua união com a Ria de Aveiro, próximo da cidade de Aveiro.

Apesar da implementação do Programa de Ação da ZV, que limita a quantidade de fertilizantes a aplicar nas culturas, e de as áreas de culturas tenderem a diminuir ao longo do tempo (aproximadamente 5499 ha em 2019, DRAPCentro, 2020), mantêm-se valores de concentração de nitratos na água subterrânea acima de 50 mg/L.

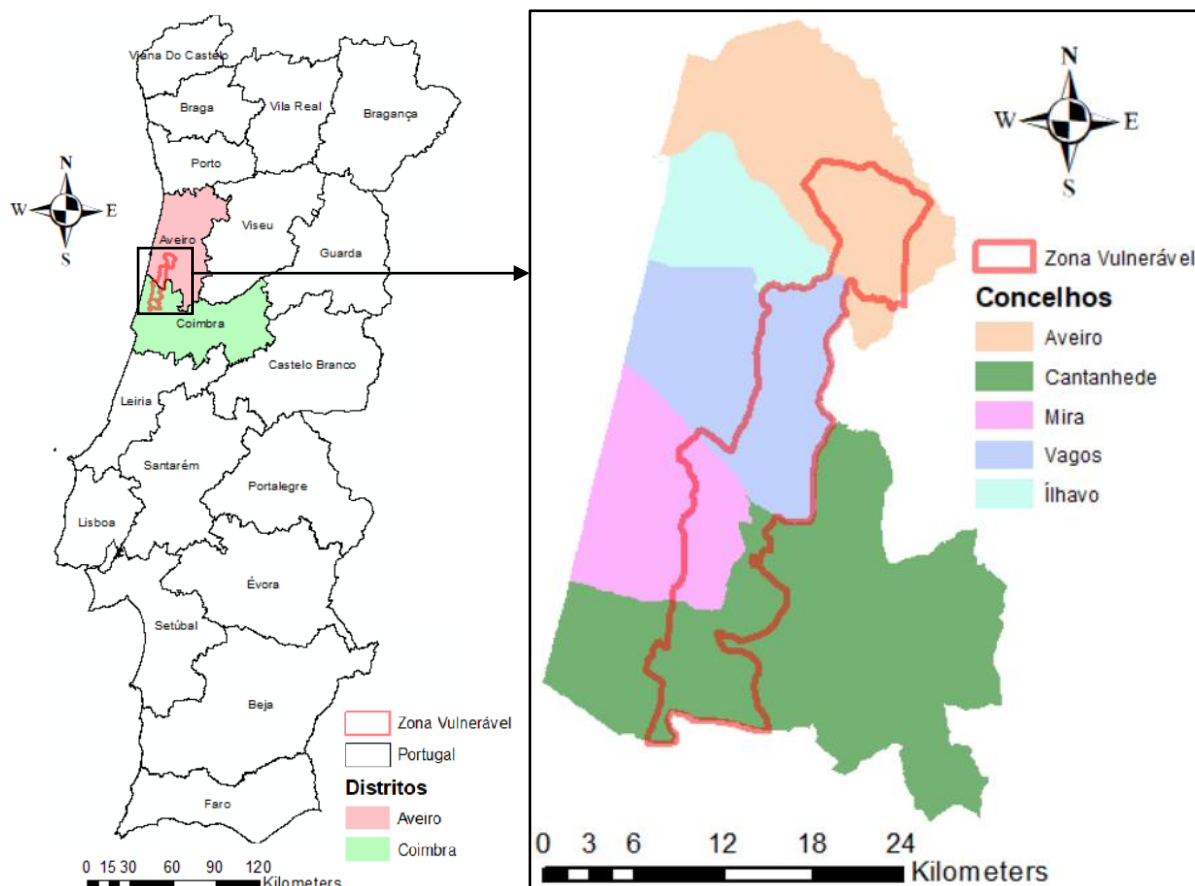


Figura 3.1: Localização da área em estudo, Zona Vulnerável Litoral Centro.

3.2. Caracterização Geológica

No interior da ZV Litoral Centro estão cartografadas três grandes unidades geológicas principais, de natureza detrítica e datadas do Holocénico, Plio-Plistocénico e Cretácico (Figura 3.2). A descrição geológica da área é realizada de acordo com a Carta Geológica à escala de 1:50000, Folha 16-A Aveiro (Teixeira e Zbyszewski, 1976), Folha 16-C Vagos (Barbosa, 1981) e Folha 19-A Cantanhede (Barbosa, 1988).

As três grandes unidades geológicas principais por ordem cronológica da mais recente para a mais antiga são (Figura 3.2):

- Aluviões, Areias de Praia e Areias de Dunas do Holocénico;
- Depósitos de praias antigas e Terraços fluviais do Plio-Plistocénico;
- Argilas, Arenitos e Calcários do Cretácico.

As formações do Holocénico são constituídas por aluviões modernos com uma granulometria bem calibrada, manto dunar e praias recentes. Ocupam uma grande extensão na ZV, mas com maior predominância do Sul a centro da área e cobrindo aglomerados de Cretácico a Norte da área (Almeida *et al.*, 2000)

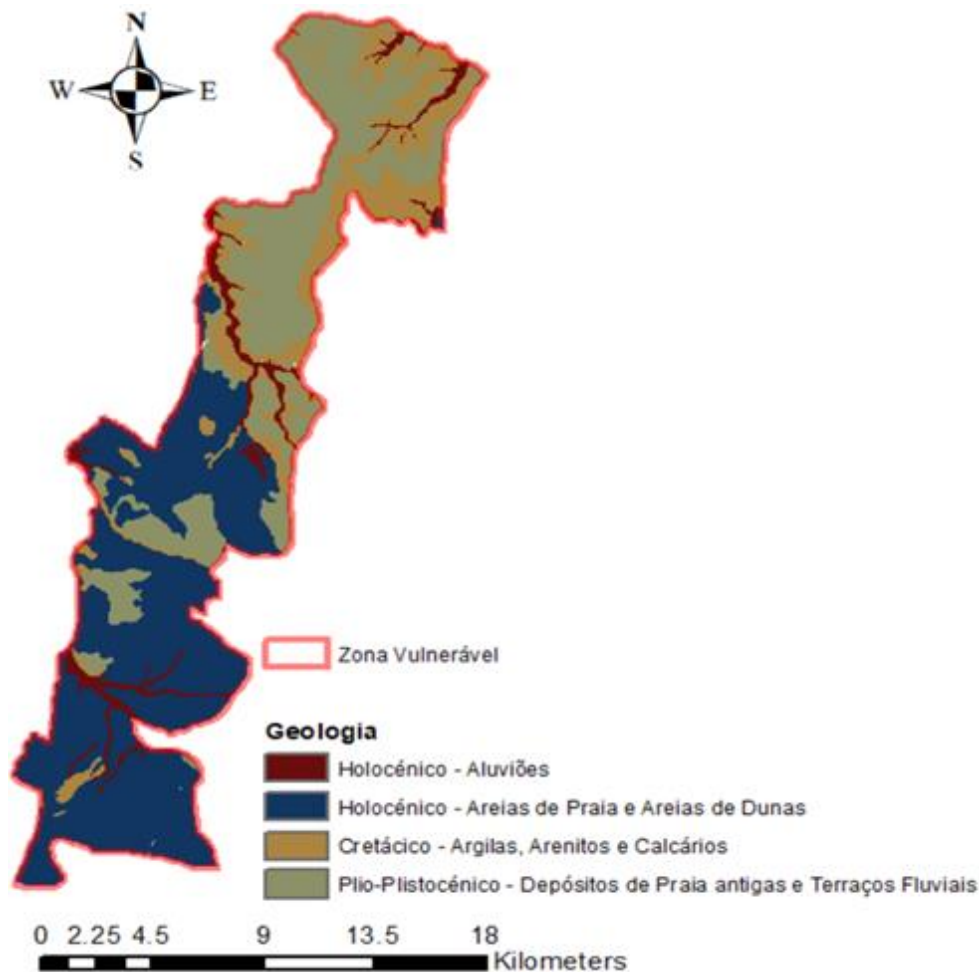


Figura 3.2: Formações geológicas na Zona Vulnerável Litoral Centro. Carta Geológica 1:50000, Folha 16-A Aveiro (Teixeira e Zbyszewski, 1976). Carta Geológica 1:50000, Folha 16-C Vagos (Barbosa, 1981). Carta Geológica 1:50000, Folha 19-A Cantanhede (Barbosa, 1988).

O Plio-Plistocénico está representado por terraços fluviais, com granulometria fina, e praias antigas com maior granulometria, mas com algumas intercalações de lodos orgânicos (Teixeira e Zbyszewski, 1976). Estas formações afloram em toda a ZV, mas com espessura reduzida, ocupando uma grande extensão de Norte ao centro da área em estudo (Figura 3.2).

As formações do Cretácico, constituídas por uma sequência granulométrica decrescente com arenitos, calcários e por fim com uma cobertura de argilas e lodos orgânicos (Teixeira e Zbyszewski, 1976) apresentam maior espessura e afloramento na parte Norte da ZV (Figura 3.2).

A maioria dos depósitos presentes na ZV não apresentam nenhuma deformação, nem deslocamentos tectónicos evidentes. No entanto, na parte Norte, onde há uma presença maior de formações cretácicas, é possível observar duas direções preferenciais, NW – SE e NE – SW, nos vales, anteriores à deposição Plio–Plistocénico, resultantes de ações tectónicas que apenas afetaram a formação do Cretácico (Almeida *et al.*, 2000).

3.3. Caracterização Geomorfológica

A ZV do Litoral Centro integra-se na zona litoral da região Centro e da Beira Litoral. O relevo mais elevado predomina a Norte e no extremo Sul, enquanto a zona central da área é caracterizada por relevos suaves.

A área de Aveiro é relativamente aplanada, sendo composta por aluviões atuais e areais de duna, denominada por Bacia Sedimentar de Aveiro. Estes depósitos de cobertura estão associados a pequenos rios e a uma laguna interior formando a “Ria de Aveiro” (Rocha, 1993). A Sul de Aveiro para o interior a plataforma litoral é mais extensa. Os relevos dominantes apresentam níveis de erosão pouco desenvolvidos, variando de altitude entre 200 m e 300 m (Teixeira *et al.*, 2007).

O relevo é maioritariamente regular e a ocupação natural da rede hidrográfica é uma constante. A rede de drenagem representa a tectónica da área, nomeadamente os sistemas de fracturação regional, dispondo o carácter morfoestrutural principal da região. A compartimentação tectónica é que guia a instalação das linhas de água (Araújo *et al.*, 2003). A principal linha de água presente na área em estudo é o Rio Boco, situado na zona centro superior da ZV, deste Cantanhede até Aveiro, mais precisamente Ria de Aveiro.

O declive para a ZV Litoral Centro varia entre 0 e 20,42 %, com predominância para os declives entre 0 e 4,88 % na maioria da área. Na Figura 3.3 está representado o declive da ZV, determinado a partir do MDT ETRS89 de 30 m (modelo digital do terreno) de Portugal Continental.

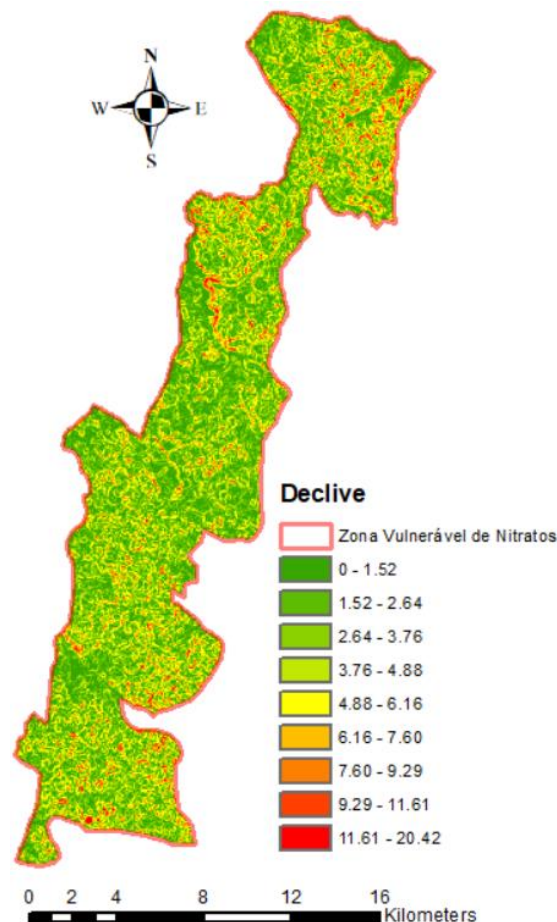


Figura 3.3: Mapa de declives (%) na Zona Vulnerável Litoral Centro.

3.4. Caracterização Hidrogeológica

A caracterização hidrogeológica que aqui se faz tem como objectivo dar a conhecer os aquíferos integrantes da ZV Litoral Centro, mas também valorizar as características intrínsecas destes que poderão ser utilizadas para a avaliação da vulnerabilidade à contaminação.

Sistemas aquíferos

A ZV Litoral Centro delimita formações suporte da massa de água subterrânea do Maciço Antigo Indiferenciado da Bacia do Vouga (Figura 3.4) e do Sistema Aquífero/Massa de Água Subterrânea Quaternário de Aveiro (Figura 3.5), integrados na Unidade Hidrogeológica da Orla Ocidental (Almeida *et al.*, 2000). A separação das duas Massas de Água na área de estudo é feita pelo Rio Boco, que atravessa a ZV sensivelmente no centro superior, a Este de Vagos.

O Sistema Aquífero Quaternário de Aveiro (Figura 3.5) tem uma área aflorante total de 931 km², sendo composto por três aquíferos. O aquífero mais superficial é freático, a unidade aquífera subjacente é semi – confinada e a posterior será confinada limitada por uma camada impermeável que se desenvolve no Sistema Aquífero Cretácico de Aveiro. O aquífero mais superficial do sistema está instalado no manto dunar dos depósitos Holocénicos, sendo um aquífero freático, bastante permeável de espessura média a rondar 10 m mas, podendo alcançar 20 m. Este aquífero é explorado maioritariamente por poços, mas com captações particulares e de abastecimento urbano e industrial (Almeida *et al.*, 2000).

A Norte do Rio Boco os aquíferos desenvolvem-se nos terraços fluviais e praias antigas de idade Plistocénica. São aquíferos descontínuos, mas podem atingir extensões de afloramento consideráveis. Raramente ultrapassando a dezena de metros de profundidade, são explorados por poços tradicionais para abastecimento agrícola (Almeida *et al.*, 2000).

Os aquíferos freáticos estão limitados na base por uma camada impermeável que serve de topo e confinamento a depósitos do Cretácico, onde se desenvolve o Sistema Aquífero Cretácico do Aveiro (Condesso de Melo, 2002). Do ponto de vista da qualidade da água, um dos problemas para a sua exploração e consumo, tem a ver com a presença de concentração elevada em cloretos provenientes da camada confinante superior, constituída por argilas e lodo orgânico (Almeida *et al.*, 2000).

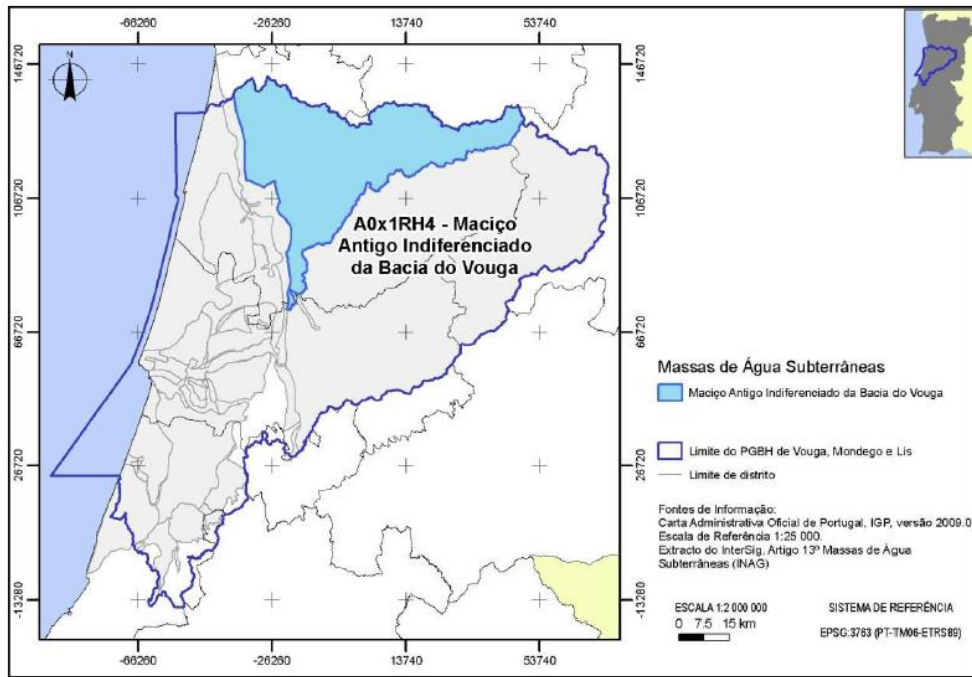


Figura 3.4: Enquadramento da massa de água subterrânea do Maciço Antigo Indiferenciado da Bacia do Vouga (adaptada de Ribeiro, 2012).

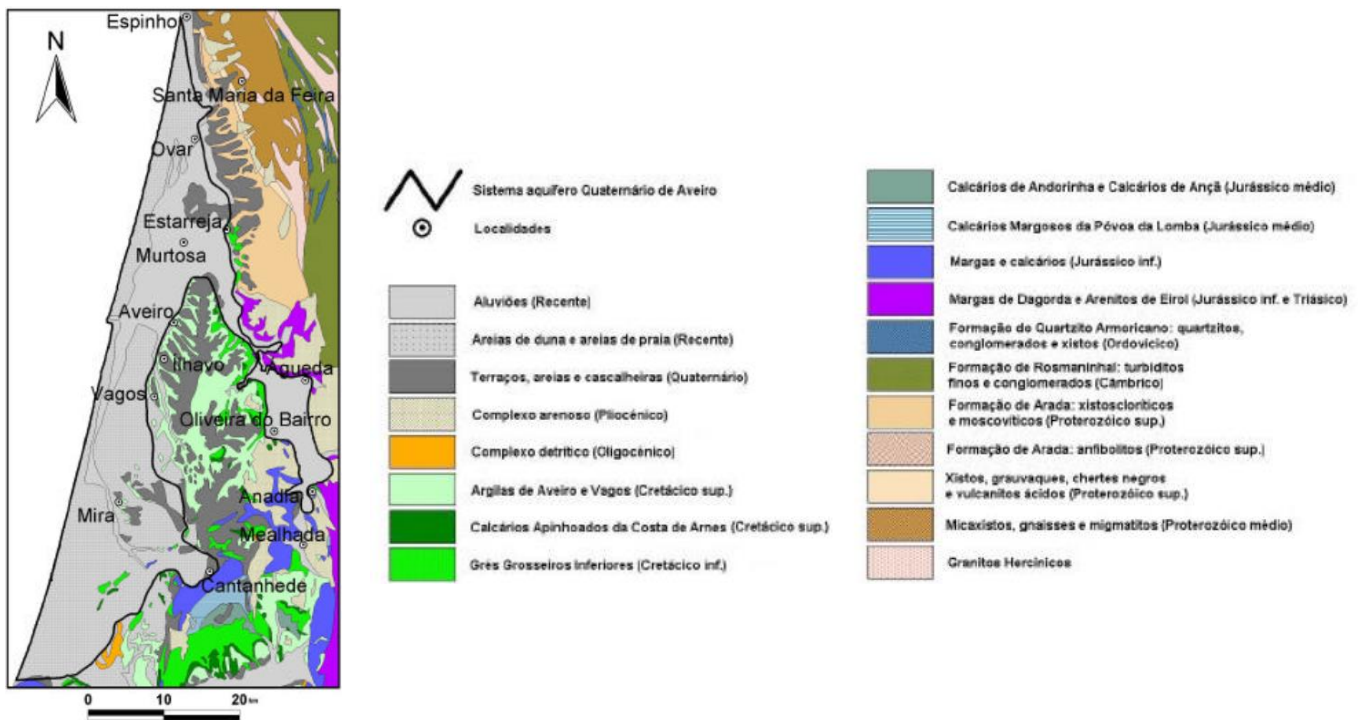


Figura 3.5: Enquadramento do sistema aquífero Quaternário de Aveiro (adaptada de Almeida *et al.*, 2000).

Profundidade da água

A profundidade da água nos aquíferos freáticos da ZV está representada na Figura 3.6. Foi estimada por interpolação, a partir de dados da base de dados do SNIRH, utilizando-se o método do inverso da distância. Foram selecionados dados de profundidade da água nos pontos de monitorização da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) entre 2002 e 2020, de 43 pontos de monitorização (Figura 3.6). A maioria dos pontos de monitorização está localizada na parte central e norte da área, permitindo maior confiança (menor erro de interpolação) nas profundidades de água estimadas para estas zonas.

Pela observação da Figura 3.6, a profundidade da água na ZV varia entre 0,7 e 23,64 m de profundidade. As menores profundidades observam-se na zona central da ZV, sendo maior junto aos limites norte e sul.

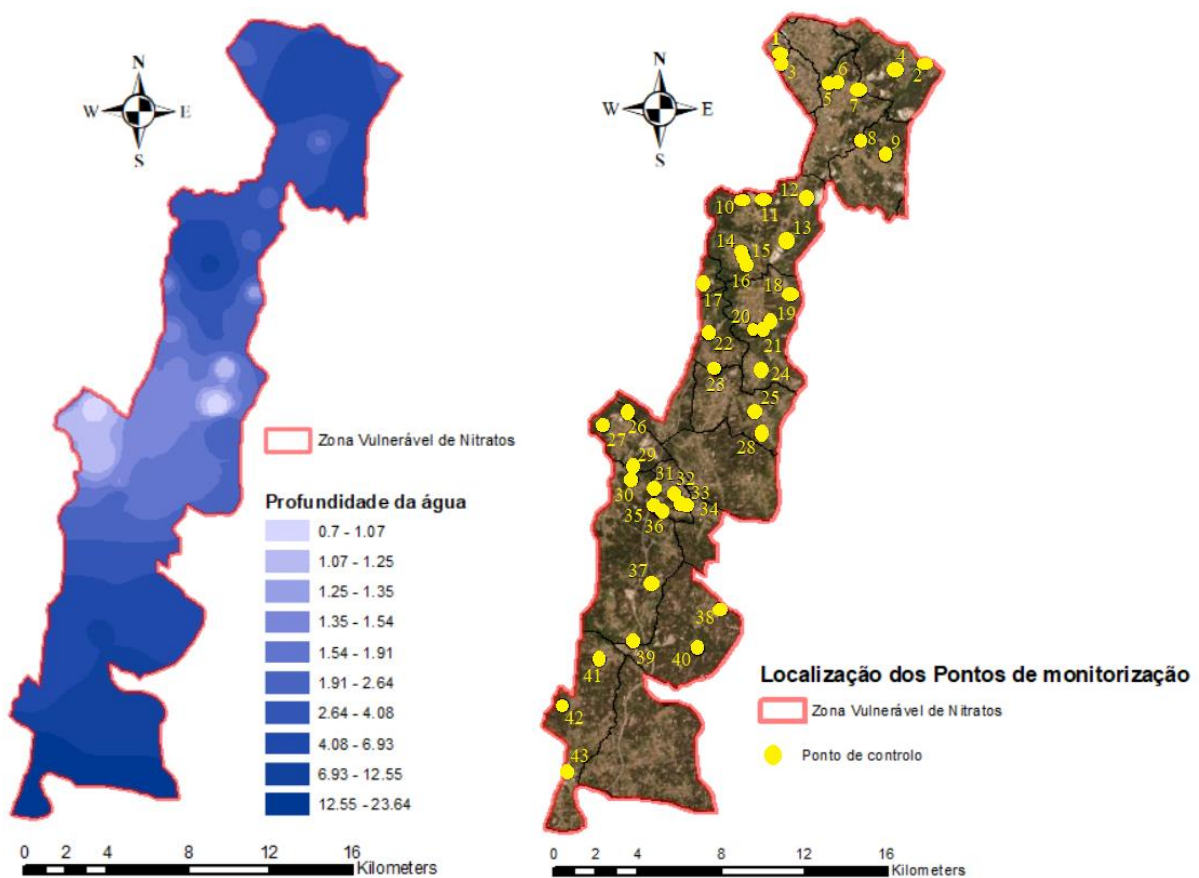


Figura 3.6: Profundidade (m) da água (ou da zona saturada) na Zona Vulnerável Litoral Centro (esquerda). Localização dos pontos de monitorização para recolha de amostras (direita).

Parâmetros hidráulicos

Os parâmetros hidráulicos dos aquíferos do Sistema Aquífero Quaternário de Aveiro variam de autor para autor, no entanto, todos apresentam valores próximos ou semelhantes.

Tendo por base os diferentes valores que cada autor atribuí ao Sistema Aquífero Quaternário de Aveiro, este possui condutividade hidráulica média estimada de 15 a 20 m/dia, com valores correspondentes de transmissividade média entre 250 a 600 m²/dia.

Ferreira (1995) propôs valores médios de condutividade hidráulica e de transmissividade que variam entre 25 a 40 m/dia e 150 a 760 m²/dia, respectivamente. Ferreira da Silva (1989) determinou valores de condutividade hidráulica entre os 19 a 50 m/dia (pelo método de Hazen) para as formações deste sistema aquífero. Pelo mesmo método, Barradas (1992) calculou uma condutividade hidráulica de 0,2 a 25 m/dia e uma porosidade eficaz superior a 20%.

Não são conhecidos valores de transmissividade para a massa de água da Orla Ocidental da Bacia do Vouga.

Carvalho *et al.* (2019) estimaram valores de condutividade hidráulica (K) para os aquíferos freáticos na ZV, através da calibração deste parâmetro num modelo numérico do escoamento subterrâneo. Os autores calibraram K em função de cinco classes de litologias aflorantes: aluviões, terraços fluviais, areias de dunas, areias hidroólicas e formações do Cretácico. A Figura 3.7 representa a variação espacial deste parâmetro. A condutividade hidráulica, assim obtida e utilizada para a ZV Litoral Centro em estudo varia entre 0,091 e 184,139 m/dia (Figura 3.7). Os valores mais altos predominam na parte sul da ZV, devido à maior presença de rochas sedimentares com uma porosidade efetiva maior. Também se observam valores altos de K nas linhas de água, em resultado da presença de aluviões.

De acordo com Peixinho de Cristo (1985), as captações existentes neste sistema apresentam caudal específico entre 2 e 6 L/s.m e o aquífero superior tem porosidade eficaz entre 1 a 5%.

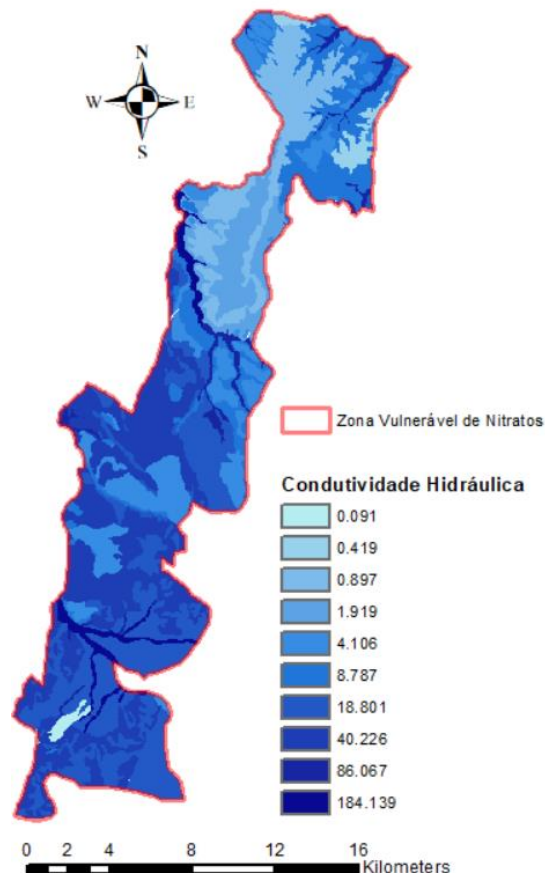


Figura 3.7: Condutividade hidráulica (m/dia) na Zona Vulnerável Litoral Centro (adaptado de Carvalho *et al.*, 2019).

Recarga dos aquíferos

No Sistema Aquífero Quaternário de Aveiro a recarga processa-se diretamente por infiltração da precipitação no aquífero freático. A descarga faz-se em direção ao mar, à rede hidrográfica ou, por drenância vertical, para a unidade aquífera subjacente. Essa unidade subjacente, semi – confinada, da base do Quaternário, recebe, por sua vez, recarga nas áreas aflorantes ou por drenagem diferida do aquífero superior e da rede hidrográfica. No Plano de Gestão de Região Hidrográfica 2º Ciclo (APA, 2016) são apresentados valores de 225 hm³/ano de recarga para os aquíferos do Quaternário de Aveiro e 55 hm³/ano para os depósitos da Orla Ocidental Indiferenciado da Bacia do Vouga.

Carvalho *et al.*, (2019) estimaram valores de recarga para os aquíferos freáticos na ZV, através da calibração deste parâmetro num modelo numérico do escoamento subterrâneo. A variação espacial da recarga na ZV Litoral Centro varia entre 0 e 351 mm/ano (Figura 3.8). A recarga nula corresponde às linhas de água, como o rio Boco, que foram consideradas como zonas de descarga.

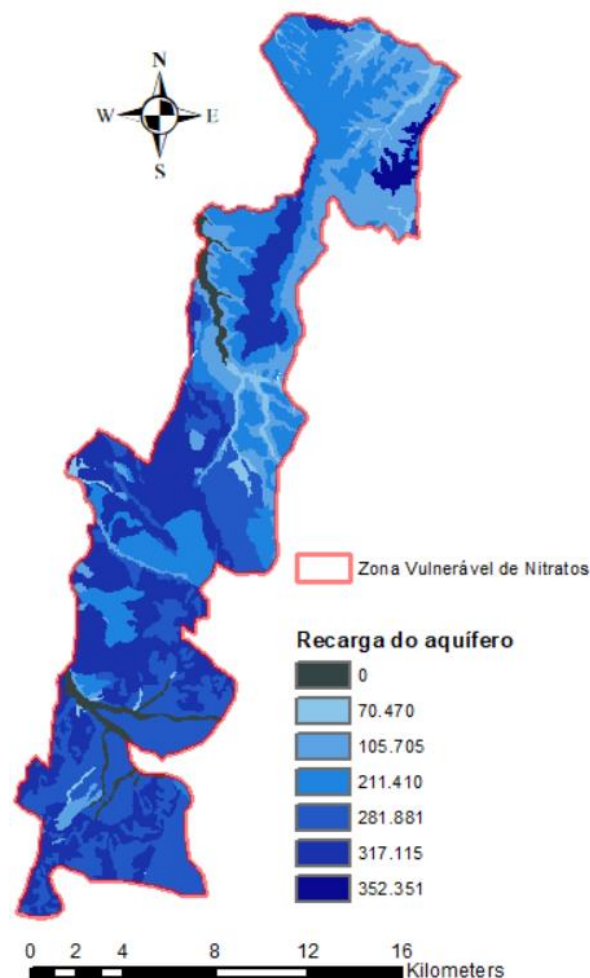


Figura 3.8: Recarga (mm/ano) dos aquíferos na Zona Vulnerável Litoral Centro (adaptado de Carvalho *et al.*, 2019).

Qualidade de água

A qualidade de água do aquífero instalado no manto dunar dos depósitos Holocénicos está influenciada pelas estruturas urbanas e industriais sobre este aquífero (Almeida *et al.*, 2000). O aquífero apresenta contaminação elevada com vários tipos de poluentes, nomeadamente, metais pesados e produtos químicos orgânicos e inorgânicos. Há igualmente contaminação resultante da atividade agrícola com elevadas concentrações de nitratos. A qualidade de água na unidade aquífera do Plio-Pliostocénico é de difícil caracterização, pois as captações de água são maioritariamente particulares. No entanto, os contaminantes em maior concentração são o nitrato seguido do potássio (Almeida *et al.*, 2000). Ambos os iões têm origem agrícola.

É pela concentração em nitratos, superior a 50 mg/L que foi delimitada a ZV Litoral Centro. A variação espacial da concentração deste ião está representada no mapa da Figura 3.9. O mapa foi construído com base na interpolação pelo método do Inverso de Distância (por apresentar o menor erro associado de todas as interpolações efetuadas) de valores de concentração de nitratos monitorizados pela APA em 43 captações de água subterrânea (base de dados do SNIRH). Os dados utilizados correspondem à monitorização realizada no ano hidrológico 2018/2019, porque mais tarde se irá fazer a correlação entre a concentração de nitratos e a ocupação do solo através do mapa COS 2018.

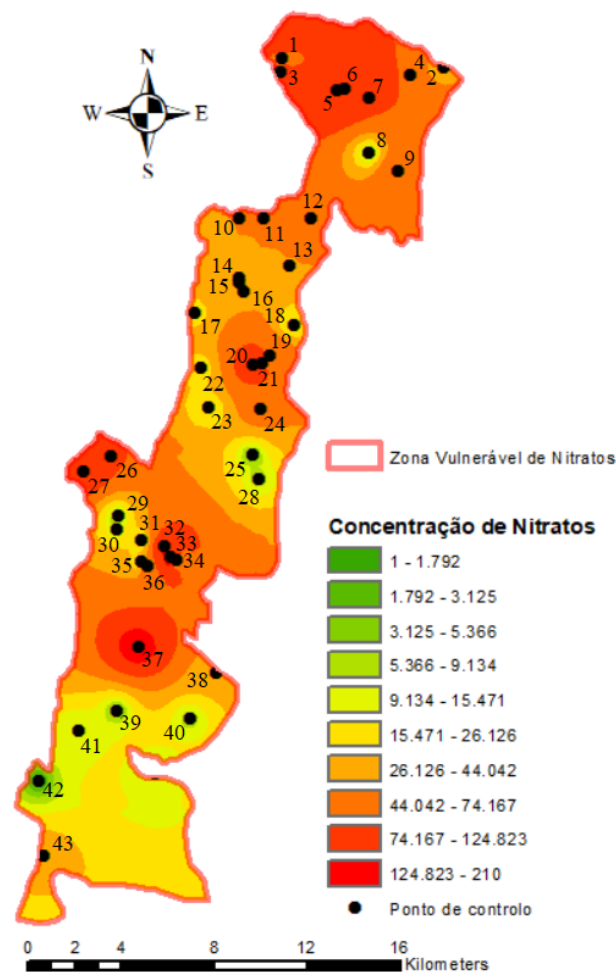


Figura 3.9: Concentração de nitratos (mg/L NO₃) na Zona Vulnerável Litoral Centro.

A maioria dos pontos de controlo estão localizados no centro e Norte da ZV, sendo locais com maior atividade industrial, urbana e agrícola. É possível observar que a maioria da concentração de nitratos está entre 75 e 30 mg/L NO₃ (moderada a alta) e 15 a 0 mg/L NO₃ (baixa a moderada) (Figura 3.10). A concentração de nitratos moderada a alta está situada predominantemente no centro e extremo norte da ZV. Representação do limite dos 50 mg/L a vermelho (Figura 3.10) em que valores superiores vão apresentar má qualidade de água em concentração de nitratos.

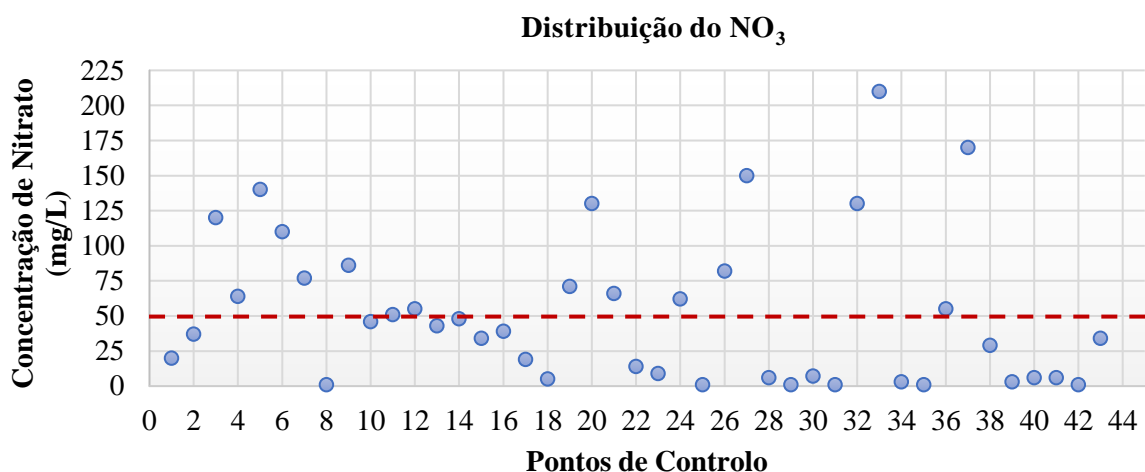


Figura 3.10: Concentração de Nitratos (NO₃) (mg/L) nos locais de monitorização pela APA (dados SNIRH).

A proximidade do Sistema Aquífero Quaternário de Aveiro ao mar e ria traduz-se num enriquecimento das águas subterrâneas em cloretos, devido à natural interface água doce/água salgada (Almeida *et al.*, 2000) e aerossóis. A água deste aquífero é de muito má qualidade. Devido à vulnerabilidade que apresenta e presença de estruturas urbanas, industriais e atividade agrícola.

O aquífero instalado na Base do Quaternário possui uma concentração baixa de nitratos, provavelmente pelo facto do aquífero apresentar características de confinamento. Os problemas que afetam a qualidade de água deste aquífero são o salgamento de captações, contaminação industrial e valores elevados de ferro (Almeida *et al.*, 2000). A concentração de ferro é favorecida pela presença de matéria orgânica nesta unidade aquífera, nomeadamente camadas de lodo que confinam o aquífero.

4. AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS NA ZV LITORAL CENTRO

A avaliação da vulnerabilidade e risco na ZV Litoral Centro foi realizada através de 3 métodos: DRASTIC, DRASTIC Pesticide e IS (Ribeiro, 2005), previamente mencionados e explicados em detalhe individual.

4.1. Mapeamento dos parâmetros

D: Profundidade do nível freático / D: Profundidade da zona não saturada

O mapeamento da vulnerabilidade para o parâmetro D: Profundidade do nível freático / D: Profundidade da zona não saturada foram obtidos através da interpolação dos dados de profundidade da água nas 43 estações de monitorização disponibilizada na plataforma SNIRH (entre 2002 e 2020). Com os dados da profundidade de cada ponto de água, foi utilizado o método do Inverso da Distância para interpolação dos dados a toda a ZV, resultando numa aproximação da profundidade para toda a área em estudo. A reclassificação de acordo com o método DRASTIC, DRASTIC Pesticide (Tabela 2.1) e IS (Tabela 2.8), atribui um valor alto de vulnerabilidade aos locais de menor profundidade e um valor baixo aos locais de maior profundidade (Figura 4.1).

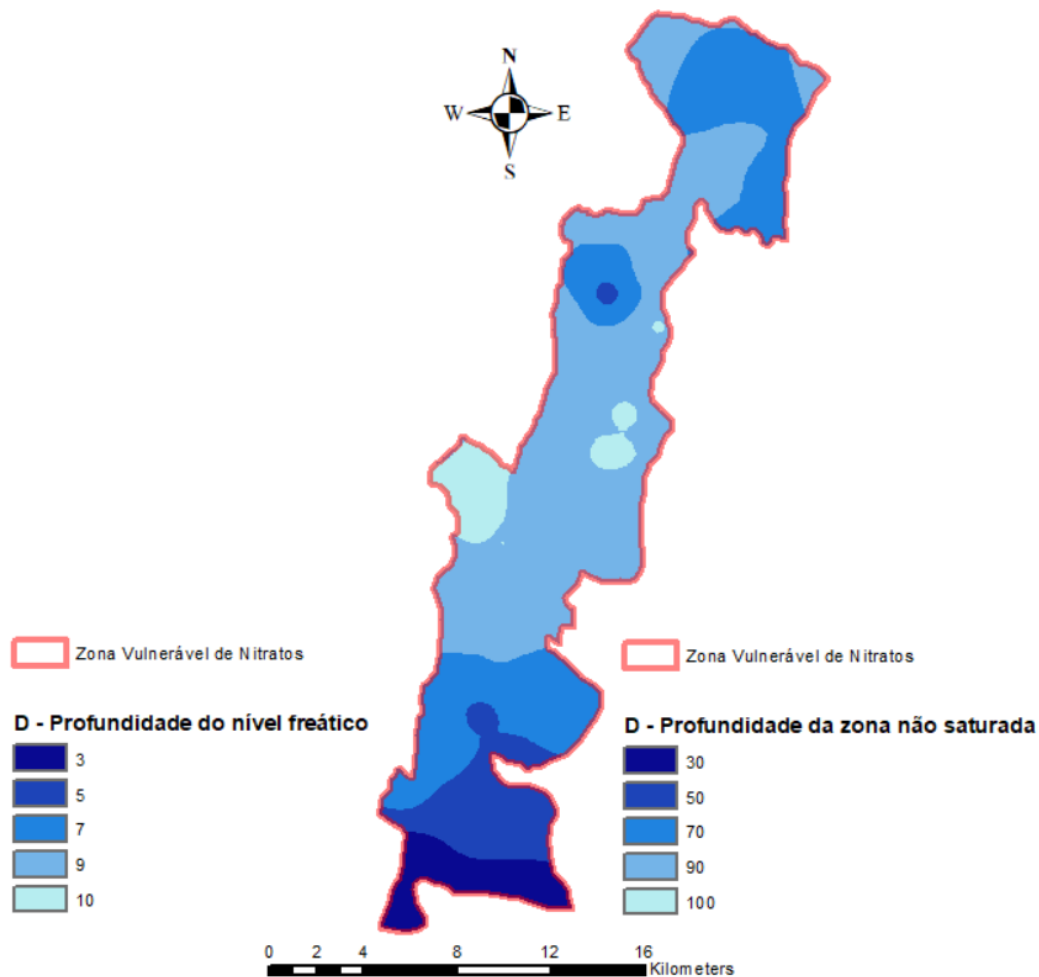


Figura 4.1: Mapeamento do parâmetro D: Profundidade do nível freático dos métodos DRASTIC e DRASTIC Pesticide (Esquerda); D: Profundidade da zona não saturada do método IS (Direita).

A grande maioria da área da ZV tem valor igual ou superior a 5 (DRASTIC) ou 50 (IS), com exceção da zona sul que está maioritariamente na classe de 3 (DRASTIC) ou 30 (IS). Isto sucede devido à baixa profundidade que a água se encontra na ZV (Figura 3.6).

R: Recarga do aquífero

O mapa do parâmetro R: Recarga do aquífero foi construído com base em valores de recarga para as respectivas litologias aflorantes presentes na ZV (Figura 3.8), que posteriormente sofreram uma reclassificação de acordo com o método DRASTIC, DRASTIC Pesticide (Tabela 2.2) e IS (Tabela 2.9). A reclassificação demonstra que os locais com maior recarga apresentam uma classe de R maior e os de menor recarga uma classes menor (Figura 4.2).

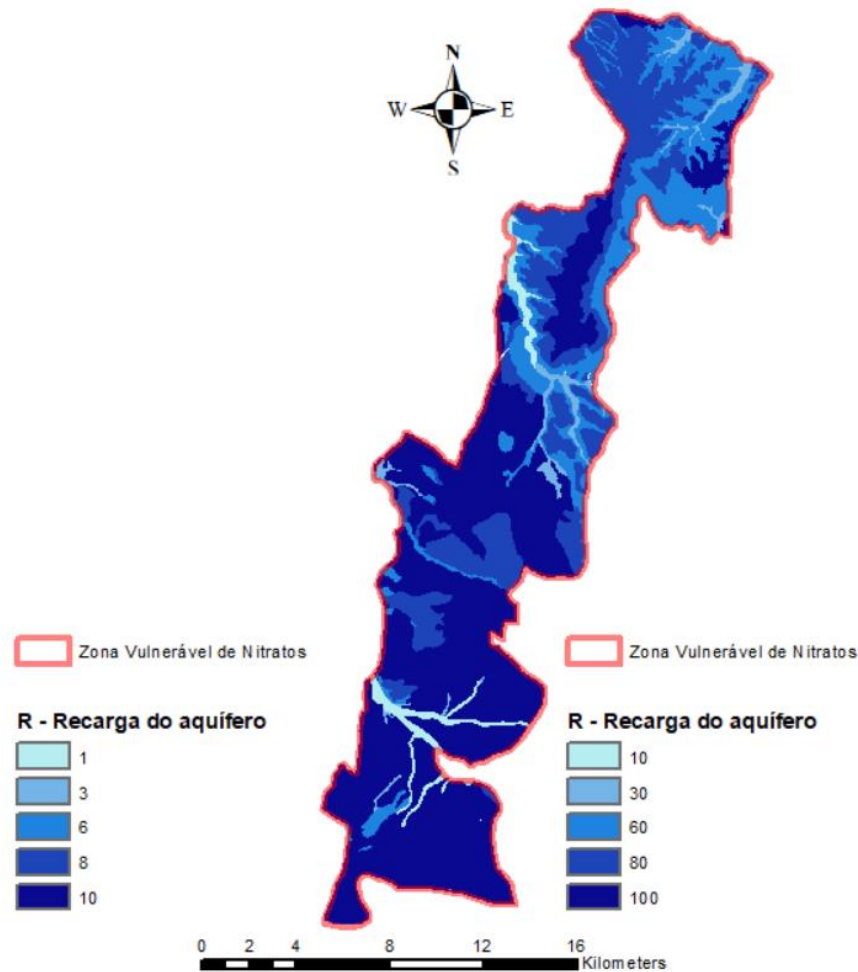


Figura 4.2: Mapeamento do parâmetro R: Recarga do aquífero dos métodos DRASTIC e DRASTIC Pesticide (Esquerda) e do método IS (Direita).

Neste parâmetro a grande maioria da área da ZV apresenta uma classificação alta, estando entre 6 – 8 (DRASTIC) e 60 – 80 (IS). Os locais que apresentam uma vulnerabilidade maior em resultado deste parâmetro estão situados no centro e Sul da ZV. As classes mais baixas estão associadas a zonas onde a recarga é quase nula, ou são zonas de descarga subterrânea (Figura 4.2).

A: Material do aquífero

O mapa do parâmetro **A: Material do aquífero** foi realizado tendo por base as litologias descritas na carta geológica 1:50000, Folha 16-A Aveiro (Teixeira e Zbyszewski, 1976), Folha 16-C Vagos (Barbosa, 1981) e Folha 19-A Cantanhede (Barbosa, 1988). Após a interpretação de cada formação litológica e sua apresentação, foi feita a reclassificação de acordo com o método DRASTIC, DRASTIC Pesticide (Tabela 2.3) e IS (Tabela 2.10). Quanto maior o valor correspondente a cada litologia, maior o potencial de vulnerabilidade à contaminação (Figura 4.3).

O potencial de vulnerabilidade associado a cada classe de litologia está relacionado com a porosidade eficaz e permeabilidade. A porosidade efetiva condiciona a permeabilidade, a recarga, a condutividade hidráulica e a transmissividade do aquífero, sendo uma propriedade importante a ter em consideração. Por exemplo, os Aluviões enquadram-se numa classe de vulnerabilidade menor, pois possuem uma porosidade efetiva muito reduzida. A classe escolhida para estes aluviões é menor do que o valor típico de 2 apresentado na Tabela 2.3, devido à sua porosidade eficaz ser muito baixa, dificultando a infiltração do contaminante.

A maioria da área da ZV apresenta classificação do parâmetro **A: Material do aquífero** entre os 6 – 8 (DRASTIC) e 60 – 75 (IS). Ambas as classes englobam “areia”, uma litologia com porosidade eficaz alta, daí a sua classificação alta atribuída.

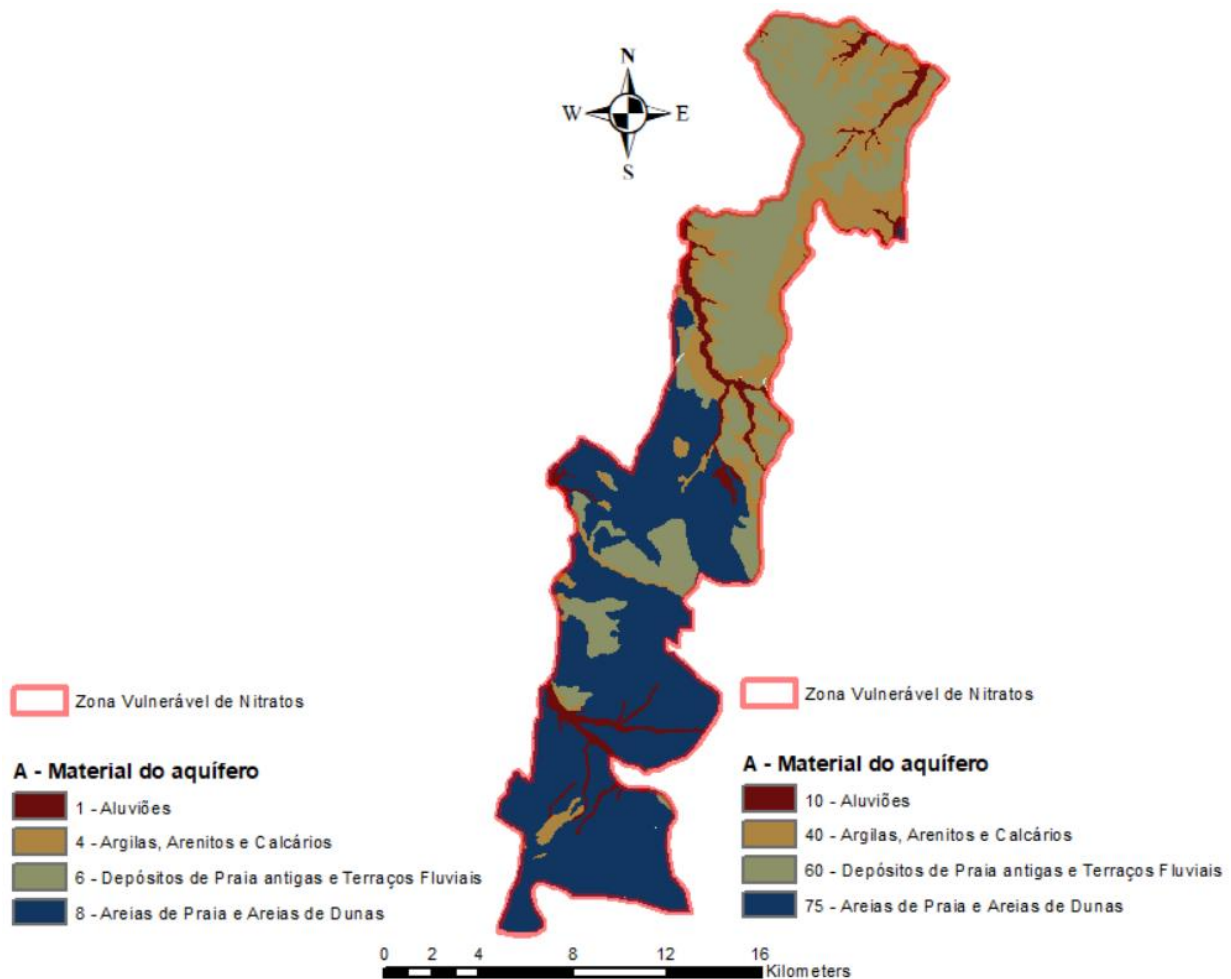


Figura 4.3: Mapeamento do parâmetro **A: Material do aquífero** do método DRASTIC e DRASTIC Pesticide (Esquerda) e método IS (Direita).

S: Tipo de Solo

O mapeamento do parâmetro S: Tipo de Solo é desenvolvido com base na classificação dos tipos de solo em Portugal Continental, disponibilizada na plataforma digital do SNIAmb (Sistema Nacional de Informação Ambiental).

Na área da ZV foram identificados cinco tipos de solo: *Solonchaks gleizados*, solos Podzóis órticos; Regossolos dístricos; Fluvissoles êutricos; Cambissolos húmicos. A reclassificação das classes de solo é realizada de acordo com a categorização do método DRASTIC (Tabela 2.4).

Um solo do tipo *Solonchak gleizado* é constituído maioritariamente por sedimentos solúveis (sais), dificultando a infiltração do contaminante e consequentemente conduzindo à proteção do aquífero que cobre e menor vulnerabilidade deste (Figura 4.4). Estão normalmente presentes em meios confinados, arenosos e áreas costeiras em todos os tipos de climas, encontrando-se normalmente submerso. Os solos *Solonchaks* possuem um potencial muito limitado para a agricultura ou pastagens devido à grande concentração de sais (FAO e IUSS, 2015). Na ZV estes solos estão presentes ao longo do rio Boco tendo sido atribuída a esta classe de solo o parâmetro S igual a 3.

Na área da ZV os solos Podzóis são predominantes, dos quais cerca de 40% são Podzóis não hidromórficos e 60% são solos Podzóis hidromórficos. Solos Podzóis são solos “normais” constituídos por areia e arenitos ricos em quartzo. São solos de origem húmida, zonas de elevada precipitação, condições frias e ácidas. São muito férteis e, assim, muito utilizados na agricultura e pastagem devido à sua grande concentração de matéria orgânica e minerais (FAO e IUSS, 2015). Aos solos Podzóis foi atribuída uma classe de vulnerabilidade do parâmetro S de 6 (Figura 4.4).

Os Regossolos são solos de minerais não consolidados, provenientes de erosão forte de rochas em climas áridos e semi-áridos (FAO e IUSS, 2015). Na reclassificação da tipologia dos solos na ZV foi atribuído um valor de 6 ao parâmetro em conjunto com os solo Podzóis, pois ambos são maioritariamente de composição arenosa.

Os solos hidromórficos sem horizonte eluvial ou Fluvissoles, são solos constituídos por aluviões recentes localizados em áreas de deposição sedimentar em ambientes com percursos de água presentes (FAO e IUSS, 2015). Junto com os solos Cambissolos (solos litólicos húmicos), apresentam elevada heterogeneidade de fonte, das formas de relevo e das condições climáticas que os originaram, ou seja, as classificações deste solo varia muito de uma área para outra (FAO e IUSS, 2015). Os Fluvissoles e Cambissolos vão apresentar um valor de 5 no parâmetro em conjunto por possuírem uma classificação de aluviões.

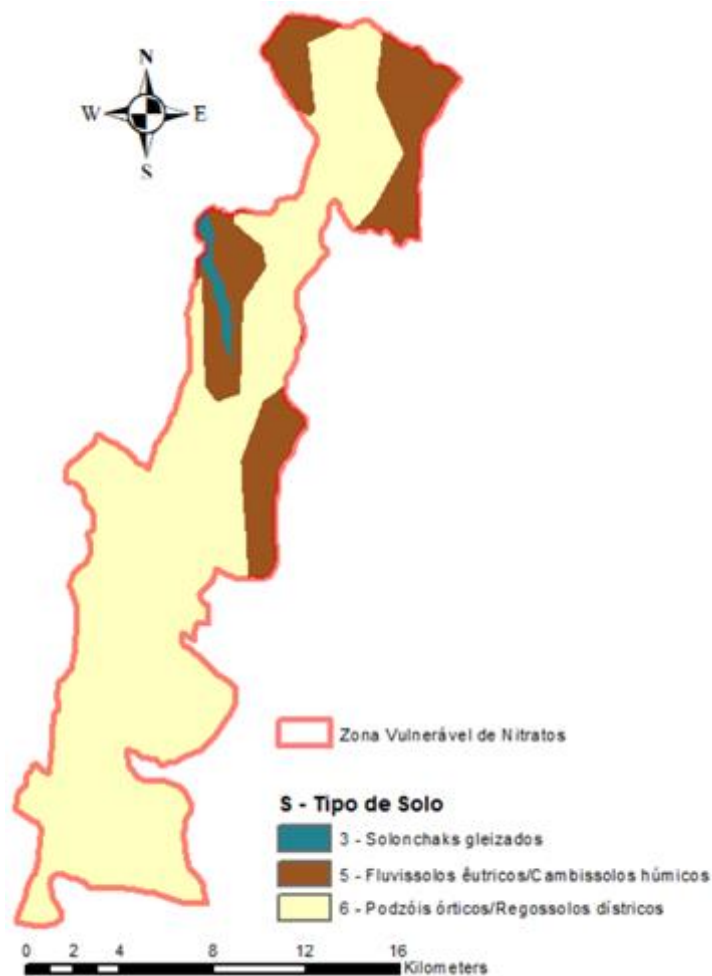


Figura 4.4: Mapa do parâmetro S: Tipo de Solo do método DRASTIC e DRASTIC Pesticide.

T: Topografia

O mapeamento do parâmetro T: Topografia foi realizado através da determinação dos declives do terreno a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT) ETRS 30 m de Portugal Continental (Figura 4.5). A reclassificação das classes de declive foi realizada de acordo com a metodologia DRASTIC, DRASTIC Pesticide (Tabela 2.5) e do IS (Tabela 2.11). Os valores de classificação mais alta estão associados aos menores declives, pois estes não permitem um escoamento eficaz da água à superfície, permitindo a retenção e consequentemente a infiltração desta e dos contaminantes.

Toda a área da ZV apresenta uma classe alta a muito alta em termos do parâmetro T: Topografia. Este fato está de acordo com o nível de declive reduzido da ZV (Figura 3.3).

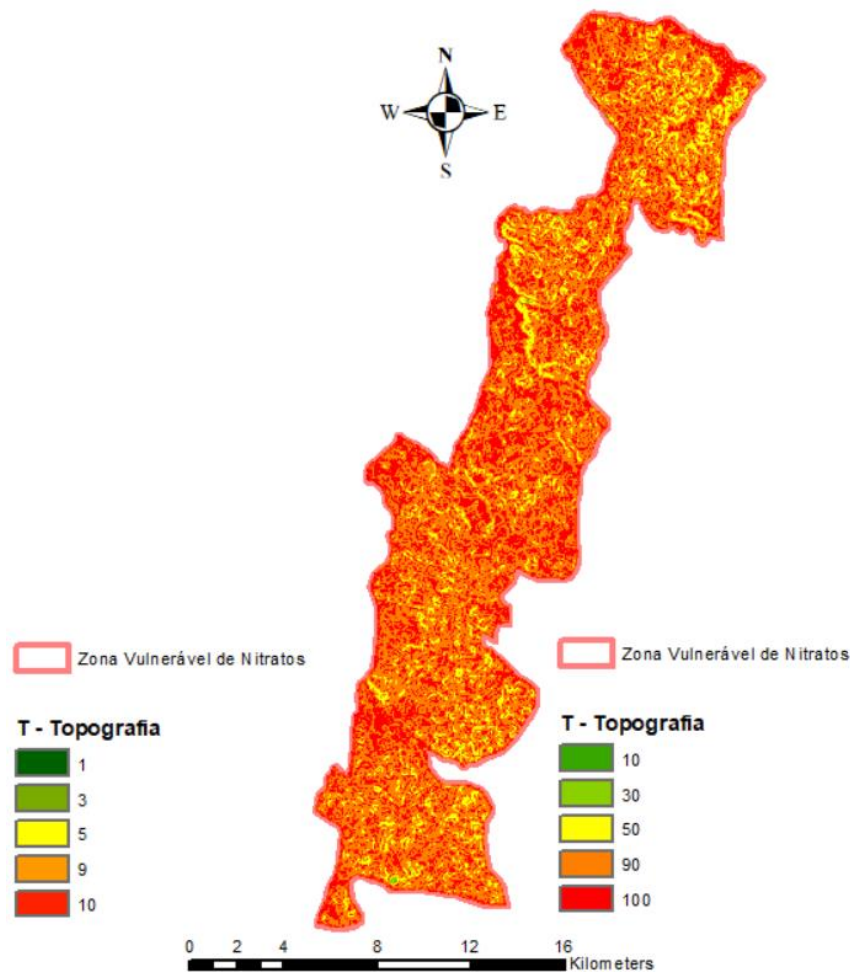


Figura 4.5: Mapa do parâmetro T: Topografia do método DRASTIC e DRASTIC Pesticide (Esquerda) e do método IS (Direita).

I: Impacto da zona não saturada

O mapeamento do parâmetro I: Impacto da zona não saturada é semelhante ao da litologia (Figura 3.2), i.e. ao parâmetro A: Material do aquífero e a sua reclassificação. Foi realizada de acordo com o método DRASTIC e DRASTIC Pesticide (Tabela 2.6).

O parâmetro I: Impacto da zona não saturada, avalia a suscetibilidade das litologias, e relaciona-se com a facilidade com que se deixam atravessar por um fluido.

Os grupos litológicos dominantes na zona não saturada são os depósitos de praia antigas e terraços fluviais (predominantes a Norte, com alguns afloramentos no centro), e areias de praia e areias de dunas (maiores afloramentos na parte Sul da ZV) (Figura 4.6). Neste caso, às classes de Areias de Praia e Areias de Dunas foi atribuída a valorização de 7, comparativamente com a classificação atribuída do valor típico no parâmetro A: Material do aquífero de 8 (Figura 4.3). Esta decisão foi tomada devido à classe ser composta por dois tipos de litologias com granulometria diferente diminuindo a porosidade efetiva e por consequência a infiltração do contaminante ao longo da zona não saturada nestas litologias.

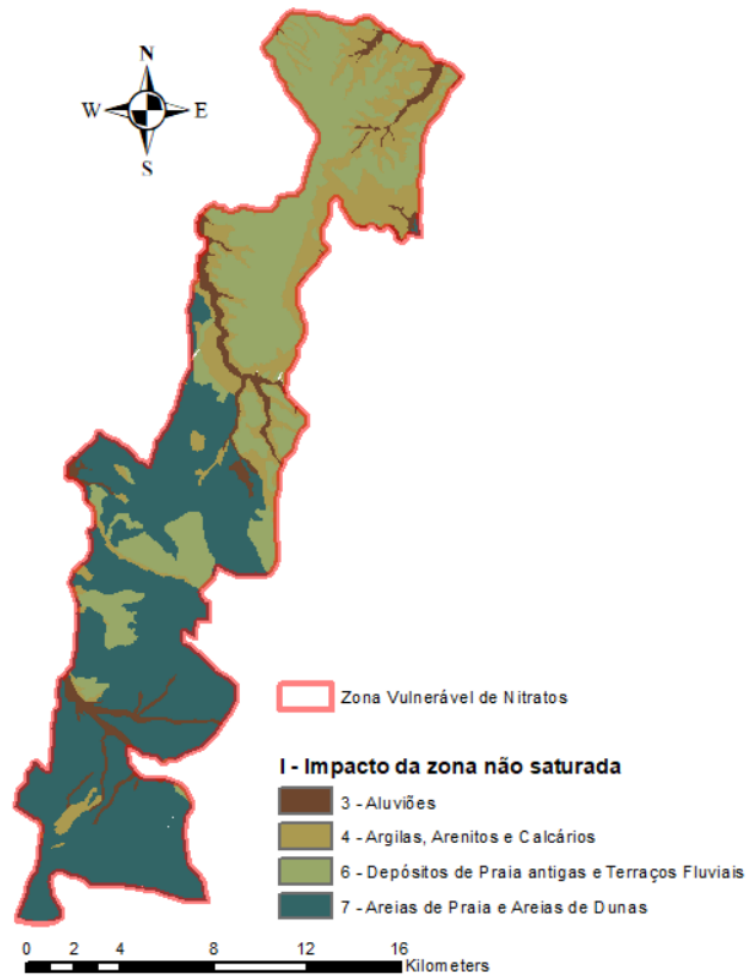


Figura 4.6: Mapa do parâmetro **I: Impacto da zona não saturada** do método DRASTIC e DRASTIC Pesticide.

C: Condutividade Hidráulica

O mapeamento do parâmetro **C: Condutividade Hidráulica** foi realizado com base em valores de condutividade hidráulica (Figura 3.7) dos aquíferos, os quais foram reclassificados de acordo com o método DRASTIC e DRASTIC Pesticide (Tabela 2.7). A reclassificação realça as áreas em que os aquíferos apresentam maior condutividade e, conseqüentemente, maior suscetibilidade à contaminação (Figura 4.7). Na zona norte da ZV a suscetibilidade é menor (classificação baixa a moderada – 1 a 4), enquanto na zona sul predominam classes de maior suscetibilidade (classificação moderada a alta – 4 a 10).

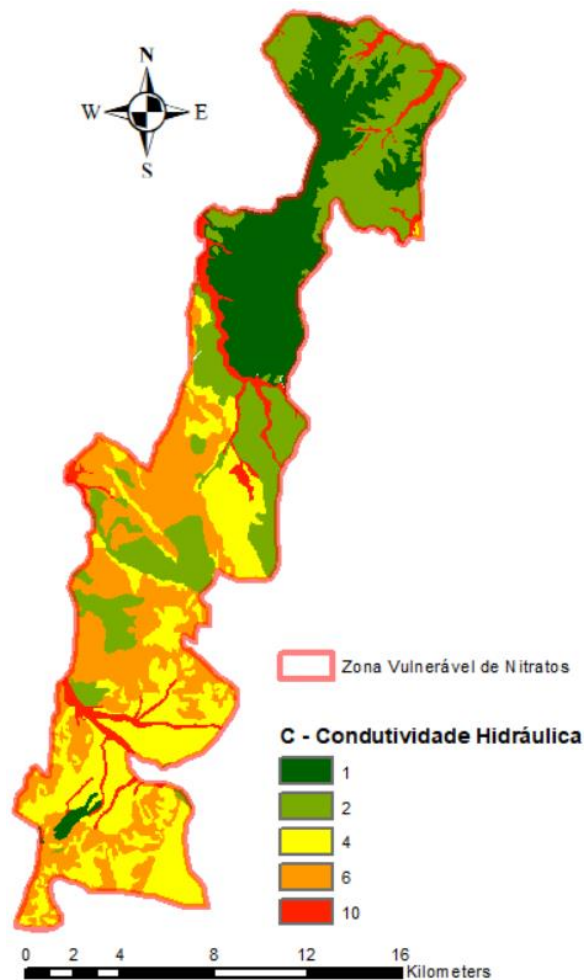


Figura 4.7: Mapa do parâmetro C: Condutividade Hidráulica do método DRASTIC e DRASTIC Pesticide.

LU: Ocupação do solo

O mapeamento do parâmetro LU: Ocupação do solo foi realizada a partir do COS 2018.

As zonas de agricultura na ZV são sistemas agrícolas predominantes, parcelas de pequena dimensão orientadas para a produção de hortícolas e forragens associadas à produção pecuária de leite.

A reclassificação das classes de LU foi realizada de acordo com a metodologia do IS (Tabela 2.12). As zonas com menor ocupação antrópica, apresentam vulnerabilidade menor (Figura 4.8). A distribuição das classes está concentrada no índice com valor de 50 (Figura 4.8), ou seja, atividades agrícolas e pecuárias temporárias com alguns meios aquáticos. É de notar que existe uma grande área de florestas e meios seminaturais com um valor de 0 na classificação do parâmetro. Os índices mais altos (superior ou igual a 70), estão associados às zonas com elevada intervenção antrópica, nomeadamente, aos espaços urbanos.

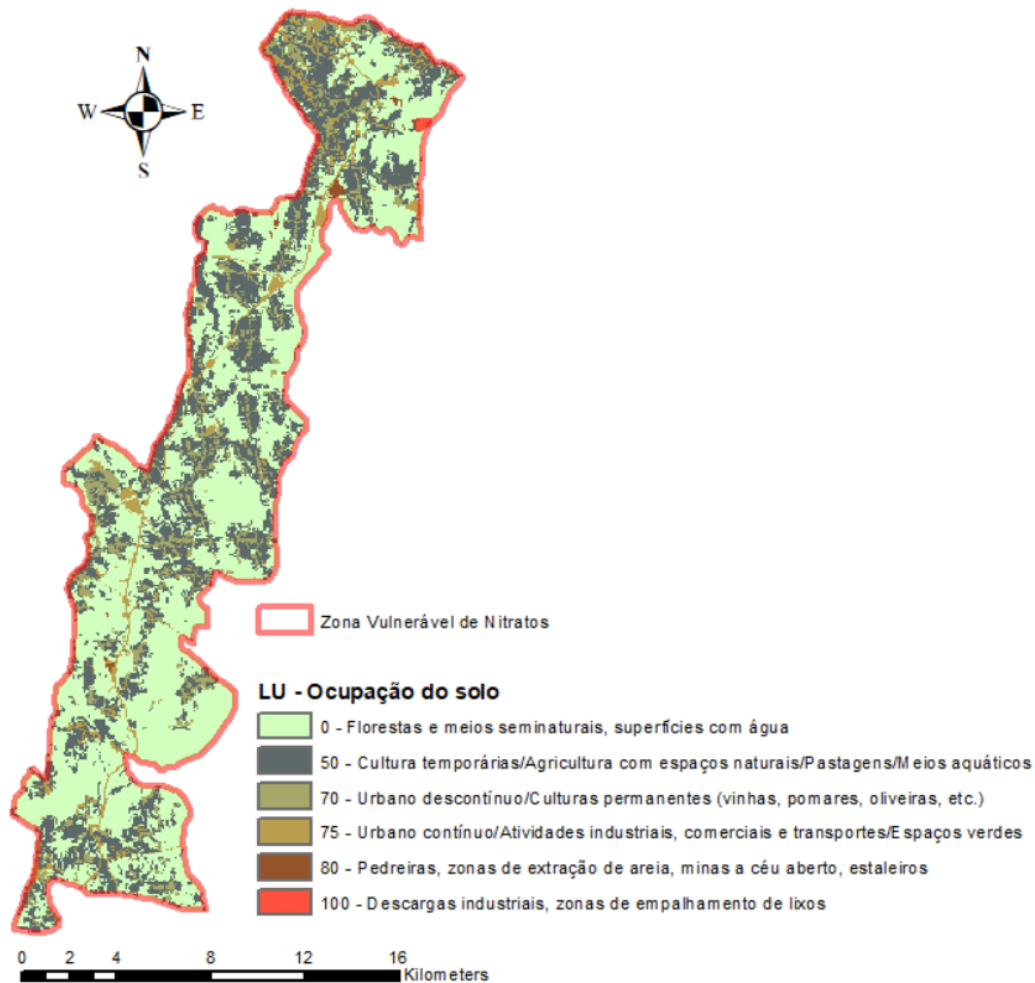


Figura 4.8: Mapeamento da vulnerabilidade do parâmetro LU: Ocupação do solo do IS.

4.2. Mapeamento do índice de vulnerabilidade pelos métodos DRASTIC, DRASTIC Pesticide e IS

A obtenção dos índices de vulnerabilidade foi realizada após o mapeamento dos parâmetros envolvidos, utilizando-se a metodologia atrás descrita para os métodos DRASTIC, DRASTIC Pesticide e IS.

Os índices finais foram divididos em 5 classes no caso dos métodos DRASTIC e DRASTIC Pesticide e de 8 classes no caso do IS (Tabela 4.1). O mapeamento dos índices assim obtidos estão representados na Figura 4.9.

Tabela 4.1: Classificação da Vulnerabilidade para o Método Índice de Susceptibilidade (Ribeiro, 2005) segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012

IS	Vulnerabilidade
> 90	Extremamente vulnerável
80 – 90	Muito Elevada
70 – 80	Elevada
60 – 70	Moderada a alta
50 – 60	Moderada a baixa
40 – 50	Baixa
30 – 40	Muito baixa
< 30	Extremamente baixa

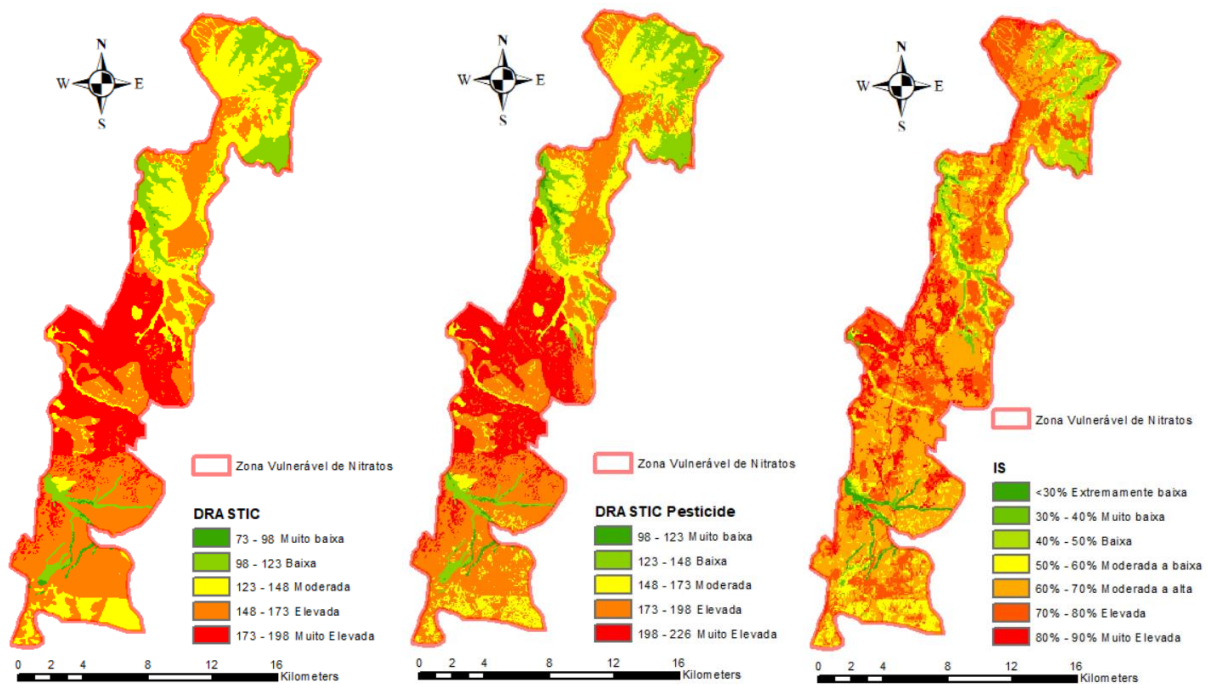


Figura 4.9: Mapas de índices de vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação na ZV Litoral Centro: pelo Método DRASTIC (Esquerda); pelo Método DRASTIC Pesticide (Centro); pelo Método IS (Direita).

A análise da Figura 4.9 permite verificar que os índices de vulnerabilidade não variam muito de método para método. As diferenças são relativamente pontuais e relacionadas com a amplitude das classes de vulnerabilidade. Na zona norte da ZV a vulnerabilidade varia de baixa a moderada, aumentando consideravelmente no centro, com vulnerabilidade moderada a elevada, na zona sul a vulnerabilidade é predominantemente moderada.

5. ÍNDICES DE VULNERABILIDADE VS CONTAMINAÇÃO

5.1. Índice de Correlação Qualitativo (ICQ)

Para obtenção do Índice de Correlação Qualitativo procedeu-se de acordo com a metodologia explicada no capítulo 2.4.. O mapa de concentração de nitratos na água subterrânea da ZV foi obtido pela interpolação dos valores de monitorização disponibilizados na plataforma SNIRH, divididos em três classes de concentração (Figura 5.1): baixa, com valores de NO₃ inferiores a 25 mg/L; moderada com valores entre 25 e 50 mg/L, alta com NO₃ superior a 50 mg/L. Estas classes relacionam-se com os limites de qualidade definidos pela Diretiva “Nitratos” (Diretiva 91/676/CEE, de 12 de dezembro de 1991) e DQA (2000), isto é, uma água que tenha uma concentração maior que 50 mg/L é considerada de má qualidade.

Para se proceder à comparação direta entre as classes de concentração de nitrato nas águas subterrâneas com os índices de vulnerabilidade obtidos para cada método foi necessário adaptar estes a três classes (Figura 5.2). No caso do IS as classes definidas são: baixa com IS entre 0 – 50%, moderada, com IS entre 50 – 70% e alta, com IS > 70%. Os índices DRASTIC e DRASTIC Pesticide foram divididos nas seguintes classes de vulnerabilidade: Baixa, com índice de 23 a 68, Moderada, com índice de 68 a 159 e Alta, com índice de 159 a 226. O método DRASTIC Pesticide apenas apresenta duas classes, uma vez que não possui valores presentes na classe baixa (23 – 68).

Os mapas finais e a sua relação vão permitir atribuir a respetiva CQ para cada ponto de controlo e, assim, calcular o ICQ para cada método de avaliação de vulnerabilidade e risco comparativamente à concentração de nitratos.

A Correlação Qualitativa entre as classes de vulnerabilidade e classes de concentração de nitratos na água subterrânea foi determinada de acordo com a metodologia descrita em 2.4. e a Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Correlação Qualitativa (CQ) entre as classes de vulnerabilidade de contaminação de aquíferos e as classes de concentração de nitratos nas águas subterrâneas

Classes Vulnerabilidade vs Concentração NO ₃		CQ	Pontos atribuídos a cada correlação observada no mapa
Baixo – Baixo		3	
Baixo – Moderado		2	
Baixo – Alto		1	
Moderado – Moderado		3	
Moderado – Baixo		2	
Moderado – Alto		2	
Alto – Alto		3	
Alto – Moderado		2	
Alto – Baixo		1	

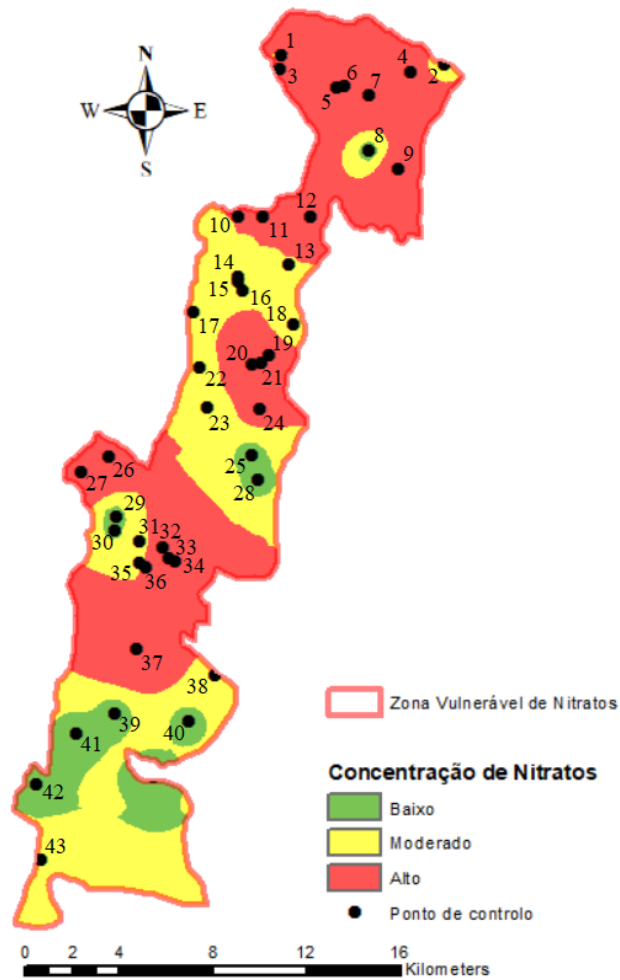


Figura 5.1: Classes de concentração de nitratos nas águas subterrâneas da ZV Litoral Centro: Baixo < 25 mg/L; Moderado entre 25 e 50 mg/L; Alto > 50 mg/L.

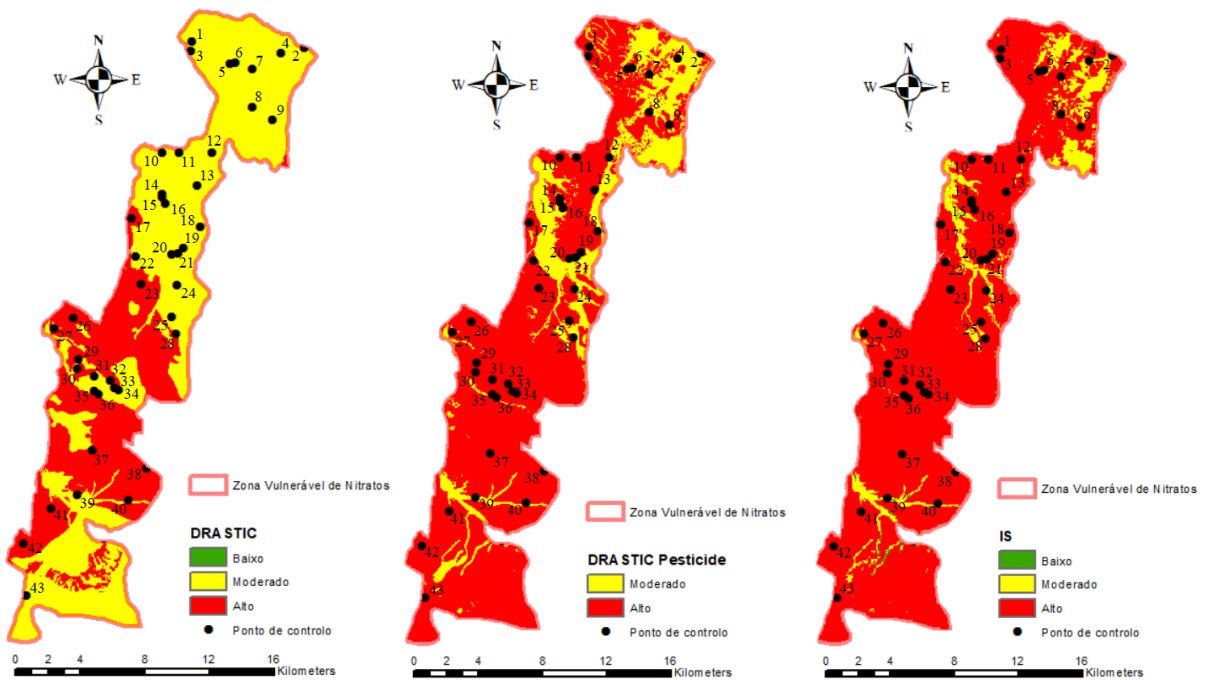


Figura 5.2: Classes dos índices de vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos na ZV Litoral Centro: Índice DRASTIC (Esquerda); Índice DRASTIC Pesticide (Centro); Índice IS (Direita).

O Índice de Correlação Qualitativo entre as diferentes metodologias de determinação da vulnerabilidade de aquíferos e a contaminação por nitrato foi obtido pela soma dos valores da Correlação Qualitativa (CQ). Nas Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4, são apresentados os ICQ para cada metodologia, DRASTIC, DRASTIC Pesticide e IS (Anexo, Tabelas 10.1, 10.2, 10.3, respetivamente). A CQ assim obtida para cada estação de monitorização é depois somada para a obtenção do ICQ final para toda a ZV. A soma é feita do seguinte modo: na ZV há 3 estações de monitorização com CQ 2, então teremos 3×2 , na ZV há 11 estações com CQ 3, então será 11×3 . Logo, o cálculo do ICQ, por exemplo, para o método DRASTIC (Tabela 5.2), será: $3 \times 2 + 11 \times 3 + 14 \times 2 + 6 \times 1 + 4 \times 2 + 5 \times 3 = 96$. A mesma metodologia é seguida para os outros dois métodos.

Tabela 5.2: Índice de Correlação Qualitativo do Método DRASTIC, obtido pela soma da CQ, obtido em cada ponto de observação

Classes de 43 pontos de observação		Concentração Nitratos (NO ₃)			ICQ
		Baixa	Moderada	Alta	
Vulnerabilidade	Baixa	0	0	0	96
	Moderada	3 X 2	11 X 3	14 X 2	
	Alta	6 X 1	4 X 2	5 X 3	

Tabela 5.3: Índice de Correlação Qualitativo do Método DRASTIC Pesticide, obtido pela soma da CQ, obtido em cada ponto de observação

Classes de 43 pontos de observação		Concentração Nitratos (NO ₃)			ICQ
		Baixa	Moderada	Alta	
Vulnerabilidade	Baixa	0	0	0	102
	Moderada	2 X 2	4 X 3	1 X 2	
	Alta	7 X 1	10 X 2	19 X 3	

Tabela 5.4: Índice de Correlação Qualitativo do Método Índice de Suscetibilidade (Ribeiro, 2005), obtido pela soma da CQ, obtido em cada ponto de observação

Classes de 43 pontos de observação		Concentração Nitratos (NO ₃)			ICQ
		Baixa	Moderada	Alta	
Vulnerabilidade	Baixa	0	0	0	97
	Moderada	0	1 X 3	1 X 2	
	Alta	9 X 1	13 X 2	19 X 3	

O ICQ é de 96 para o método DRASTIC, 102 para o método DRASTIC Pesticide e de 97 para o método IS. O índice DRASTIC Pesticide é o que apresenta maior correlação com a concentração de nitratos na ZV, isto é, as zonas de maior vulnerabilidade são as que se apresentam também maior concentração de nitratos. Podemos neste caso dizer que através do método ICQ, o método DRASTIC Pesticide é o que apresenta maior desempenho para a proteção de aquíferos porosos contaminados por nitratos de origem agrícola.

O DRASTIC Pesticide é idêntico ao método DRASTIC, utiliza os mesmos parâmetros intrínsecos dos aquíferos, diferindo apenas nos pesos atribuídos a cada um dos parâmetros. O método DRASTIC Pesticide dá maior peso aos parâmetros S: Tipo do Solo (5), T: Topografia (3) e enquanto que o índice DRASTIC atribui maior peso aos parâmetros I: Impacto da zona não saturada (5) e C: Condutividade Hidráulica (3).

5.2. Condição de Determinação do Índice de Vulnerabilidade (IVC)

Para o cálculo do Coeficiente de Determinação (R^2), entre os índices de vulnerabilidade e as concentrações em nitrato nas águas subterrâneas da ZV, foi necessário proceder à normalização dos índices de vulnerabilidade (IVC), de acordo com a metodologia descrita em 2.4.. Os resultados obtidos para os diferentes índices de vulnerabilidade normalizados encontram-se em Anexo (DRASTIC, Tabela 10.16, DRASTIC Pesticide, Tabela 10.17 e IS, Tabela 10.18).

Nas Figuras 5.3, 5.5 e 5.7 pode-se observar a relação entre a concentração do nitrato nas águas subterrâneas da ZV, nos 43 pontos de observação, e o índice de vulnerabilidade obtido utilizando-se os métodos DRASTIC, DRASTIC Pesticide e IS, respetivamente.

As Figuras 5.4, 5.6 e 5.8 mostram as correlações obtidas entre os índices de vulnerabilidade condicionados e as concentrações de nitratos e os respetivos coeficientes de determinação (R^2) para o método de vulnerabilidade, DRASTIC, DRASTIC Pesticide e IS, respetivamente. Quanto mais próximo o R^2 de 1, maior a correlação do método de avaliação de vulnerabilidade com a concentração de nitratos na ZV, sendo melhor e precisa a aplicação deste ao local.

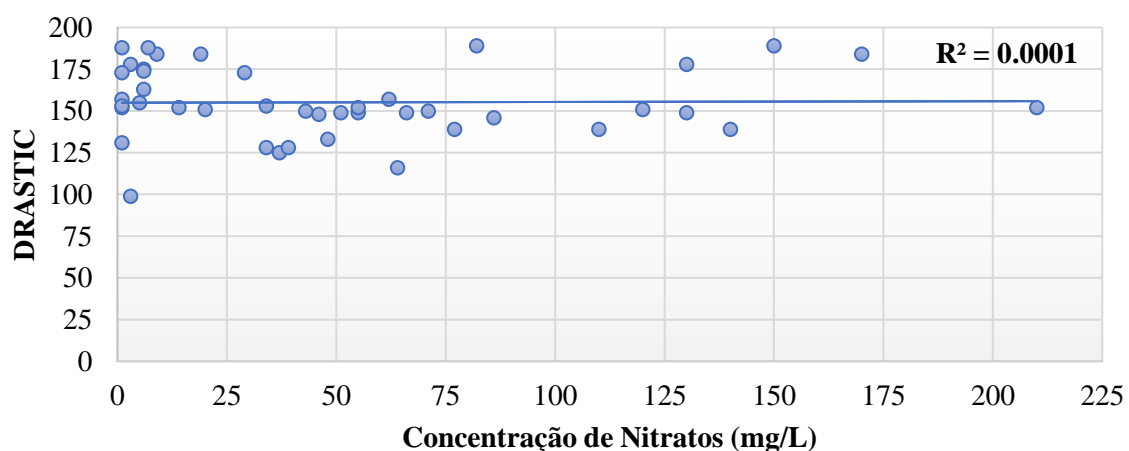


Figura 5.3: Relação entre o índice de vulnerabilidade DRASTIC e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

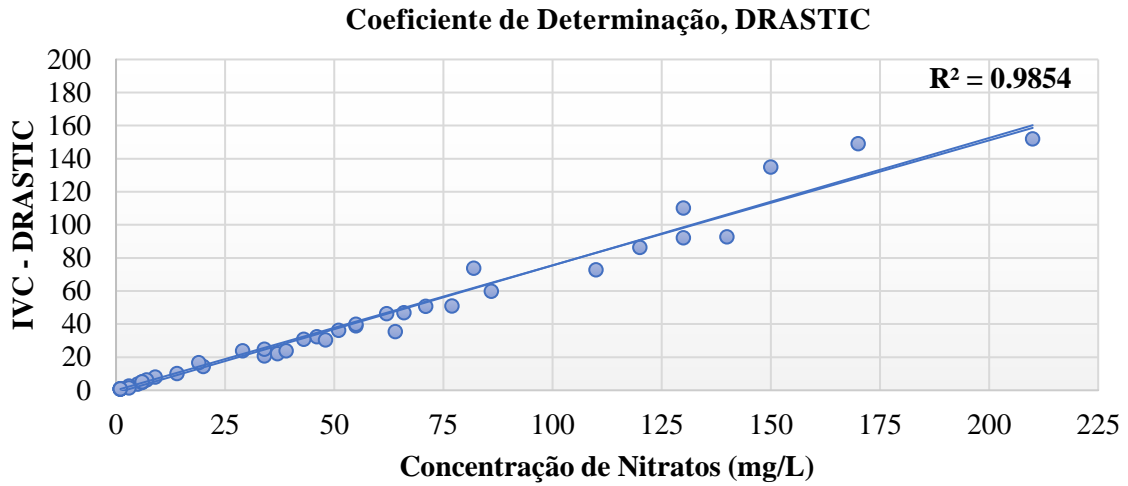


Figura 5.4: Correlação entre o índice de vulnerabilidade condicionado (IVC) obtido do método DRASTIC e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

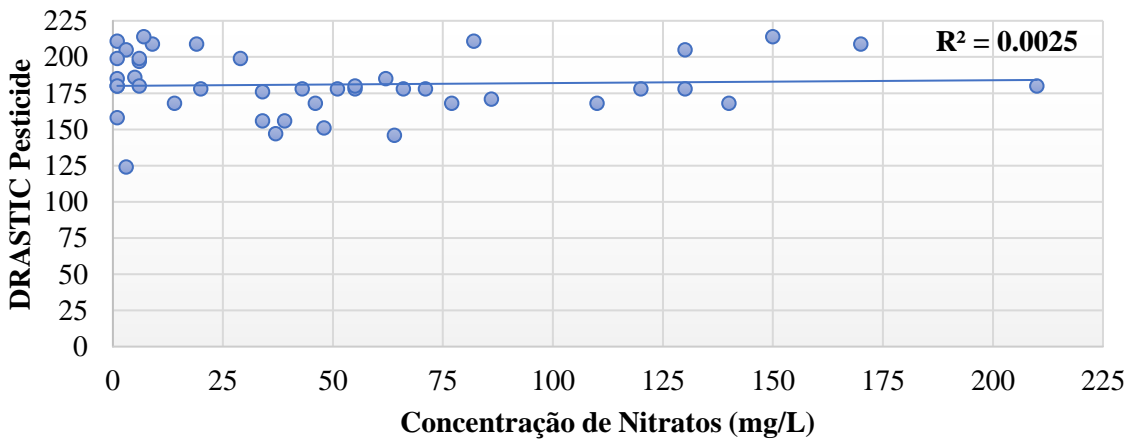


Figura 5.5: Relação entre o índice de vulnerabilidade DRASTIC Pesticide e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

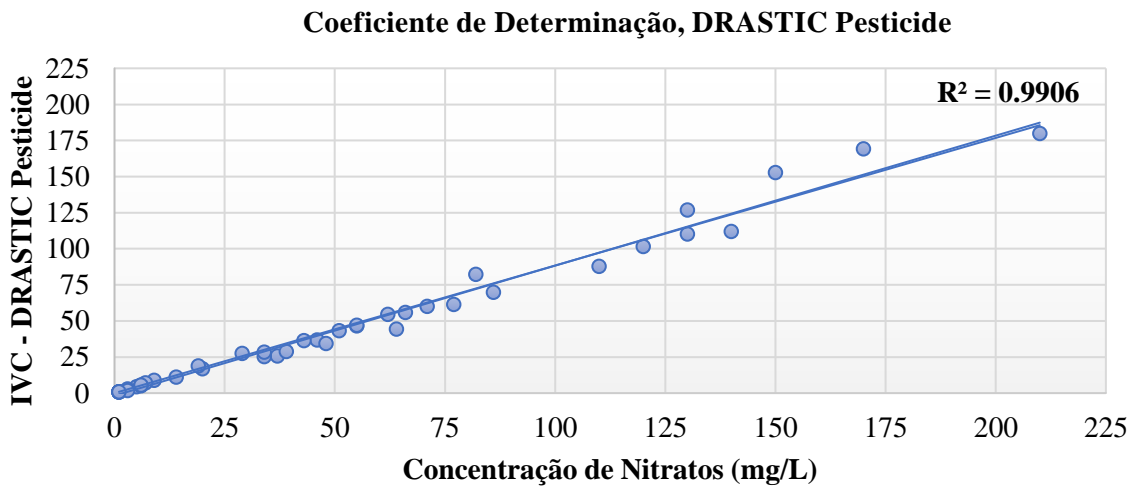


Figura 5.6: Correlação entre o índice de vulnerabilidade condicionado (IVC) obtido do método DRASTIC Pesticide e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

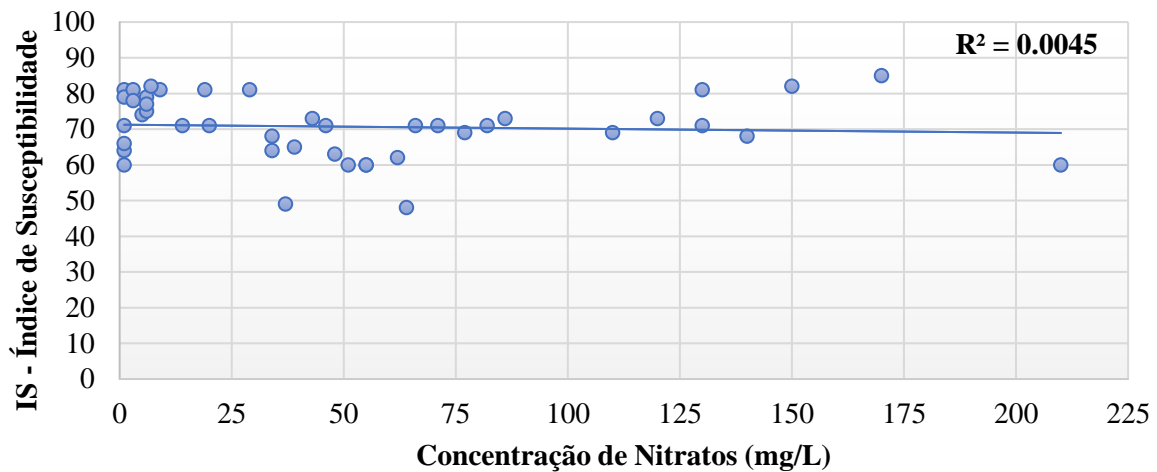


Figura 5.7: Relação entre o índice de vulnerabilidade IS e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

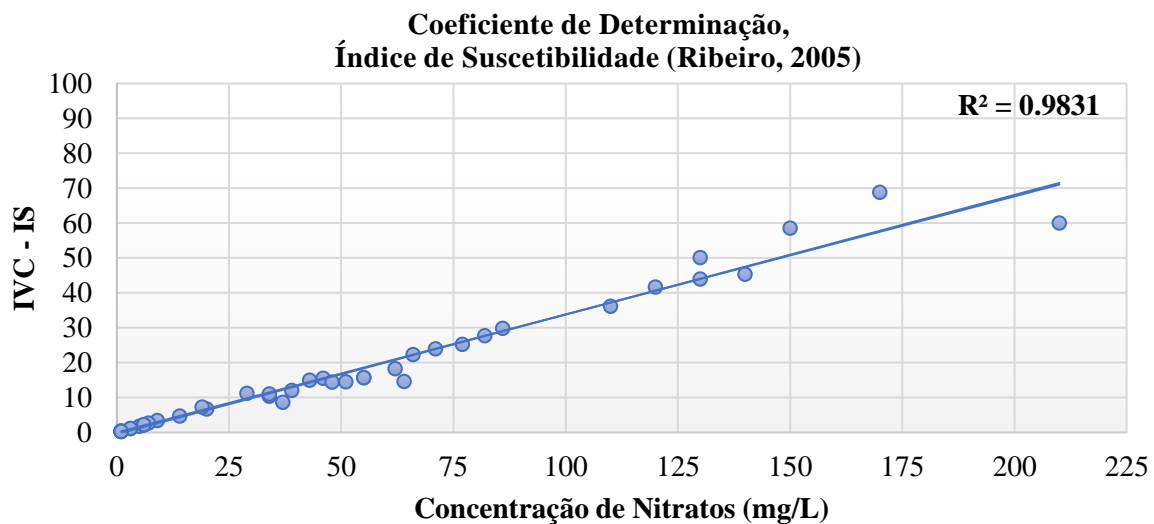


Figura 5.8: Correlação entre o índice de vulnerabilidade condicionado (IVC) obtido do método IS e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

Os valores dos índices de vulnerabilidade condicionados e das concentrações em nitratos nos 43 pontos de monitorização apresentam um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9854 para o método DRASTIC, de 0,9906 para o método DRASTIC Pesticide e de 0,9831 para o método IS. Apesar de todos os métodos mostrarem um valor R^2 elevado e próximo, o método de avaliação de vulnerabilidade que apresenta um maior Coeficiente de Determinação (R^2) e assim maior correlação com a concentração de nitratos da ZV, é o método DRASTIC Pesticide.

6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS INTRÍNSECOS DOS AQUÍFEROS NA VULNERABILIDADE

No capítulo anterior verificou-se que o método de determinação da vulnerabilidade à contaminação que apresenta melhor desempenho, quando se trata de contaminação por nitratos (origem agrícola) é o método DRASTIC Pesticide (veja-se capítulo 5). Como este método utiliza os mesmos parâmetros intrínsecos dos aquíferos que o método DRASTIC e alguns do método IS, procedeu-se a uma análise de sensibilidade deste parâmetros através do Coeficiente de Determinação (R^2), entre os parâmetros e as concentrações em nitrato nas águas subterrâneas da ZV, do mesmo modo que o utilizado para os índices de vulnerabilidade, através da normalização dos parâmetros, de acordo com a metodologia descrita em 2.4.. As Figuras 6.1, 6.3, 6.5, 6.7, 6.9, 6.11, 6.13, 6.15 e 6.17 mostram a variação dos parâmetros dos métodos DRASTIC, DRASTIC Pesticide e IS com a concentração de nitratos. Na Tabela 6.1 e Figuras 6.2, 6.4, 6.6, 6.8, 6.10, 6.12, 6.14, 6.16 e 6.18 estão representadas as relações entre os parâmetros normalizados e os respetivos Coeficientes de Determinação (R^2).

Tabela 6.1: Valor do Coeficiente de Determinação (R^2) entre os parâmetros dos métodos de determinação da vulnerabilidade e a concentração de nitratos na água subterrânea

Parâmetro	Métodos DRASTIC e DRASTIC Pesticide (R^2) NO₃ vs Parâmetro	Método IS (R^2) NO₃ vs Parâmetro
<u>D</u>	0,9835	0,9835
<u>R</u>	0,9706	0,9706
<u>A</u>	0,9736	0,9816
<u>S</u>	0,9965	
<u>T</u>	0,9770	0,9770
<u>I</u>	0,9905	
<u>C</u>	0,6514	
<u>LU</u>		0,6950

Os parâmetros que têm a mesma classificação e ponderação nas diferentes metodologias apresentam os seguintes valores de R^2 para as relações com a concentração de nitratos: 0,9835 para o parâmetro **D**: Profundidade da água, indicando uma alta correlação; 0,9706 para a **R**: Recarga do aquífero; 0,9770 para o parâmetro **T**: Topografia.

As correlações do parâmetro **A**: Material do aquífero com a concentração de nitratos são diferentes para os métodos DRASTIC e DRASTIC Pesticide e IS, uma vez que a classificação de cada litologia para a construção do respetivo mapeamento de vulnerabilidade difere para cada método. O método DRASTIC tem uma correlação de 0,9736 (Figura 6.8) e o método IS uma correlação 0,9816 (Figura 6.6). Em termos de influência na correlação com a concentração de nitratos na ZV, o valor deste parâmetro no método IS tem maior aproximação.

O parâmetro **S**: Tipo de Solo do método DRASTIC e DRASTIC Pesticide é o que apresenta maior coeficiente de determinação de todos os parâmetros estudados, com R^2 de 0,9965 (Figura 6.10). Isto significa que a concentração de nitratos na ZV está muito dependente do tipo de solo presente na área. Este parâmetro caracteriza o solo que cobre o terreno e aquífero e está diretamente ligado à permeabilidade, o solo condiciona a infiltração da água e dos contaminantes em profundidade, como observado na sua correlação com a concentração de nitratos da ZV.

A segunda maior correlação obtida com o método IVC pertence ao I: Impacto da zona não saturada, com uma correlação de 0,9905 (Figura 6.14). Este método caracteriza a zona entre o solo superficial e o nível freático, o parâmetro I caracteriza o material constituinte desta zona, o qual condiciona o tempo que o contaminante leva a atingir o nível freático desde a superfície, retardando a progressão de um poluente para a profundidade, sendo de grande relevância para a concentração de nitratos e daí a sua grande correlação.

A mais baixa correlação pertence à C: Condutividade Hidráulica com um R^2 de 0,6514 (Figura 6.16).

LU: Ocupação do Solo, é o último parâmetro em estudo, pertencente apenas ao método IS e com maior peso e referência neste. É um dos parâmetros com menor correlação na ZV em relação à concentração de nitratos com um R^2 de 0,695 (Figura 6.18).

Com a observação dos valores de correlação de todos os parâmetros e métodos de avaliação da vulnerabilidade completa, é possível assumir o método DRASTIC Pesticide como o mais indicado e preciso para uma classificação de vulnerabilidade aquando do estudo de áreas com uma contaminação substancial de nitratos.

O método DRASTIC Pesticide é o que possui maior coeficiente de determinação de todos com um R^2 de 0,9906 (Figura 5.6), sendo este número justificado pelo seu objetivo inicial como método na avaliação de vulnerabilidade em zonas agrícolas com contaminantes pesticidas. O estudo da correlação individual dos parâmetros também vai suportar tal facto, pois os parâmetros que apresentam maior Coeficiente de Determinação (R^2) são: S: Tipo de Solo ($R^2 = 0,9965$); I: Impacto da zona não saturada ($R^2 = 0,9905$) e D: Profundidade do nível freático ($R^2 = 0,9835$), estando todos estes inseridos e usados no método DRASTIC Pesticide. O peso de cada parâmetro também foi inflacionar na correlação do DRASTIC Pesticide, pois estes são os que apresentam maior peso no cálculo final da avaliação da vulnerabilidade (Equação 2.2).

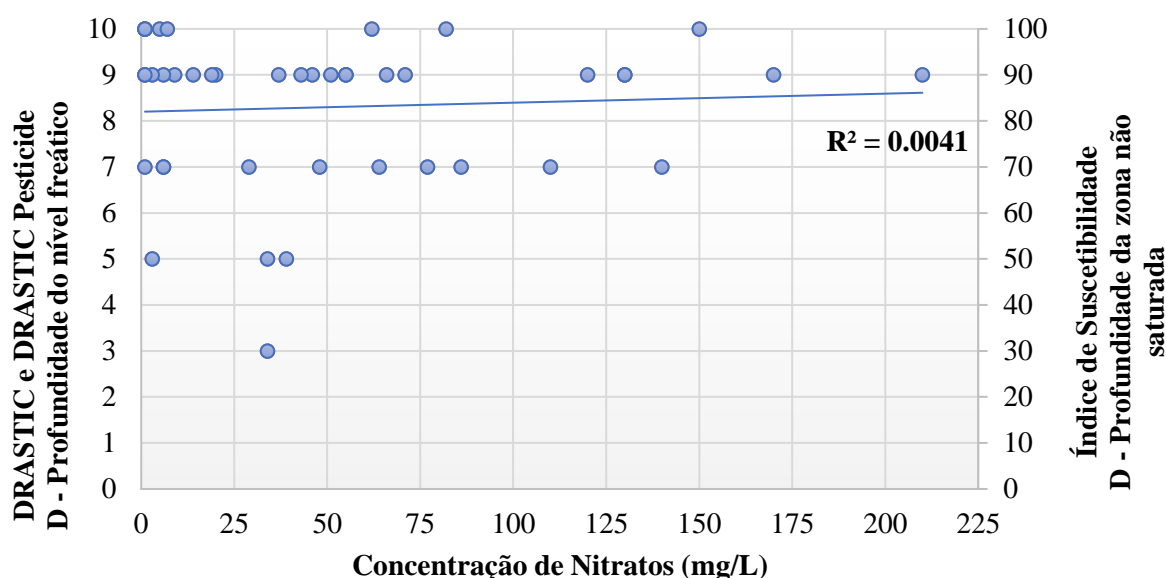


Figura 6.1: Relação entre o índice do parâmetro D: Profundidade do nível freático/Zona vadosa e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

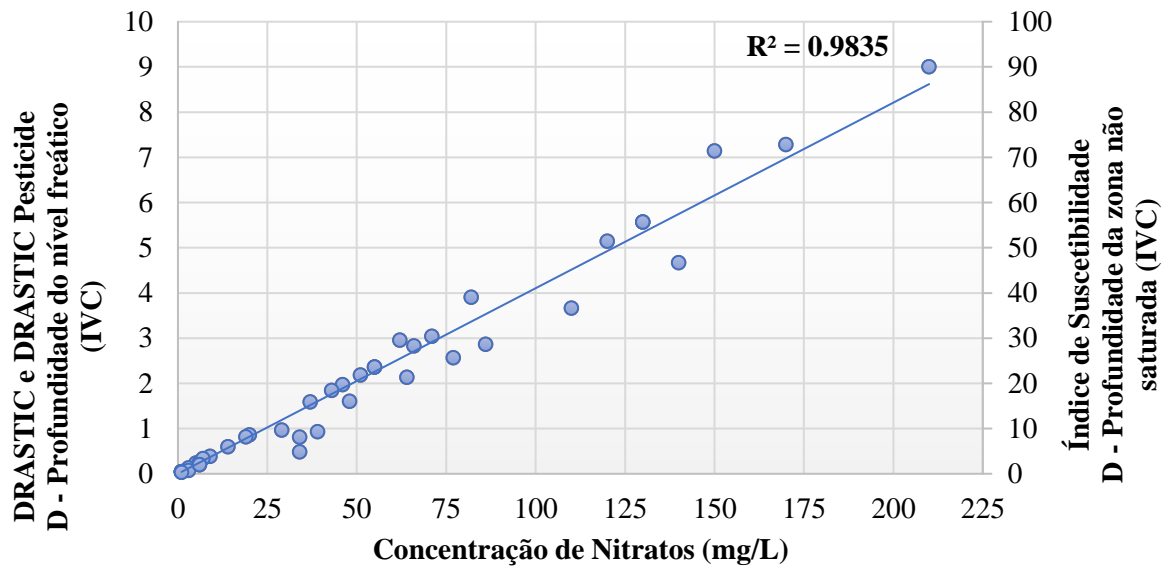


Figura 6.2: Correlação entre o parâmetro **D: Profundidade do nível freático/Zona vadosa** normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

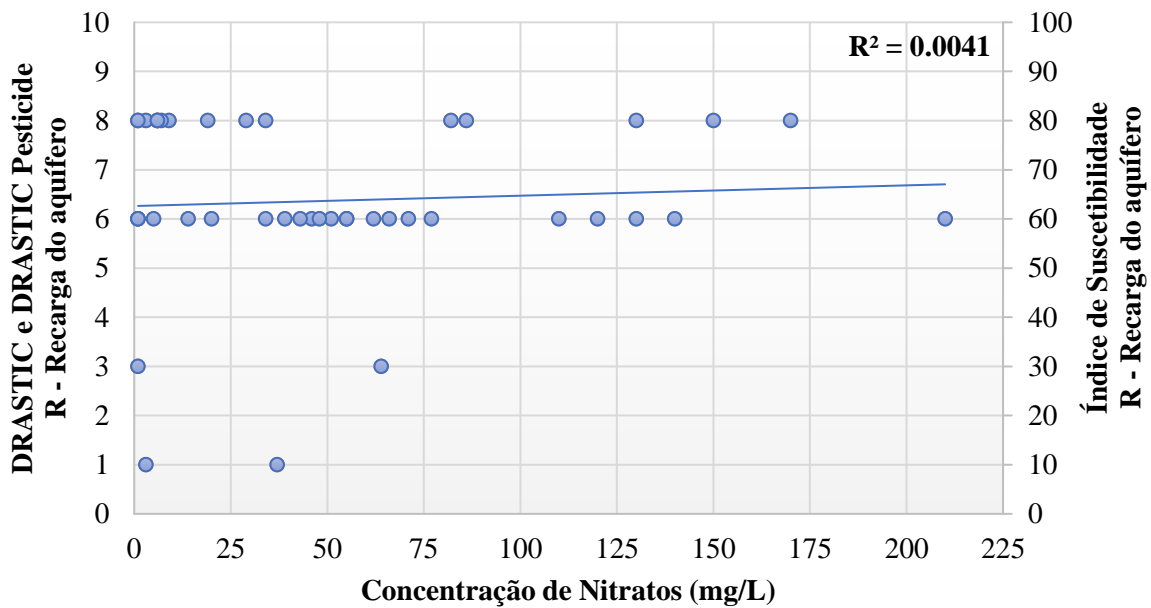


Figura 6.3: Relação entre o índice do parâmetro **R: Recarga do aquífero** e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

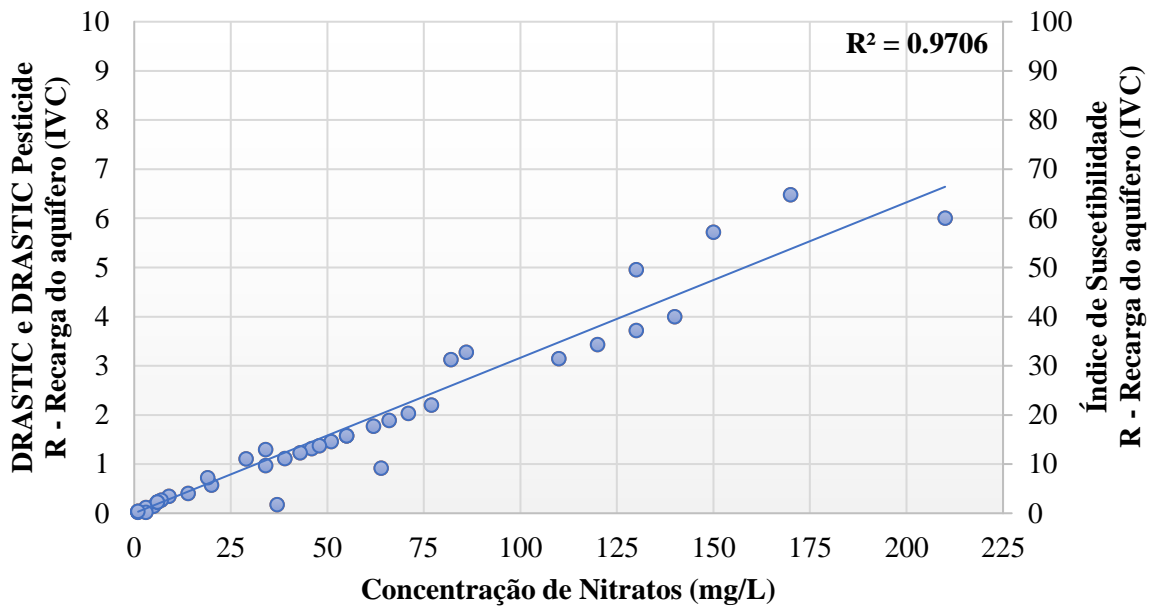


Figura 6.4: Correlação entre o parâmetro **R: Recarga do aquífero** normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

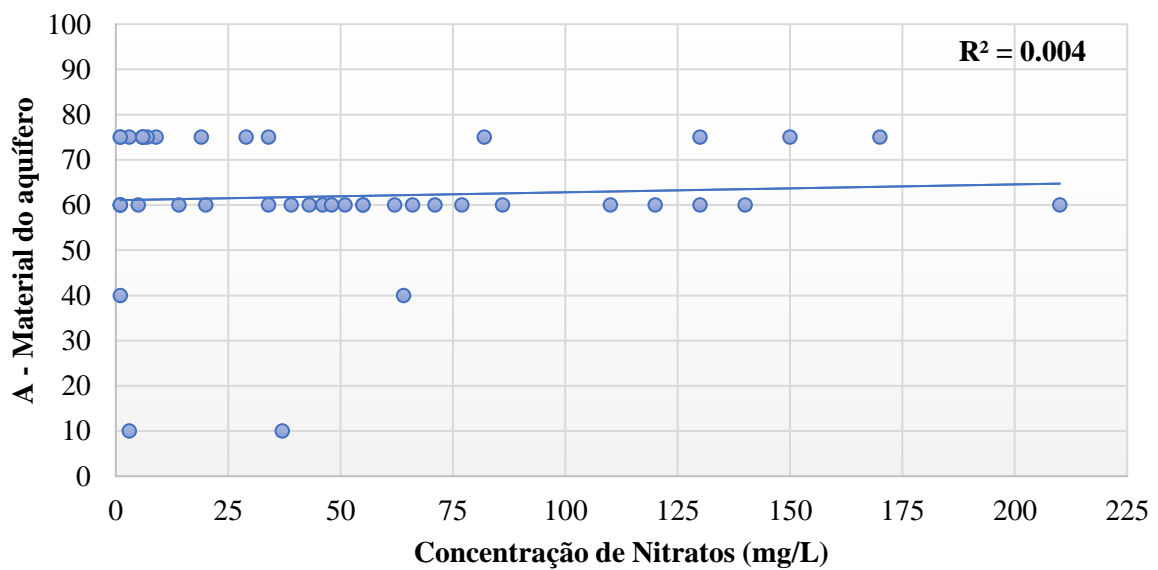


Figura 6.5: Relação entre o índice do parâmetro **A: Material do aquífero** do IS e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

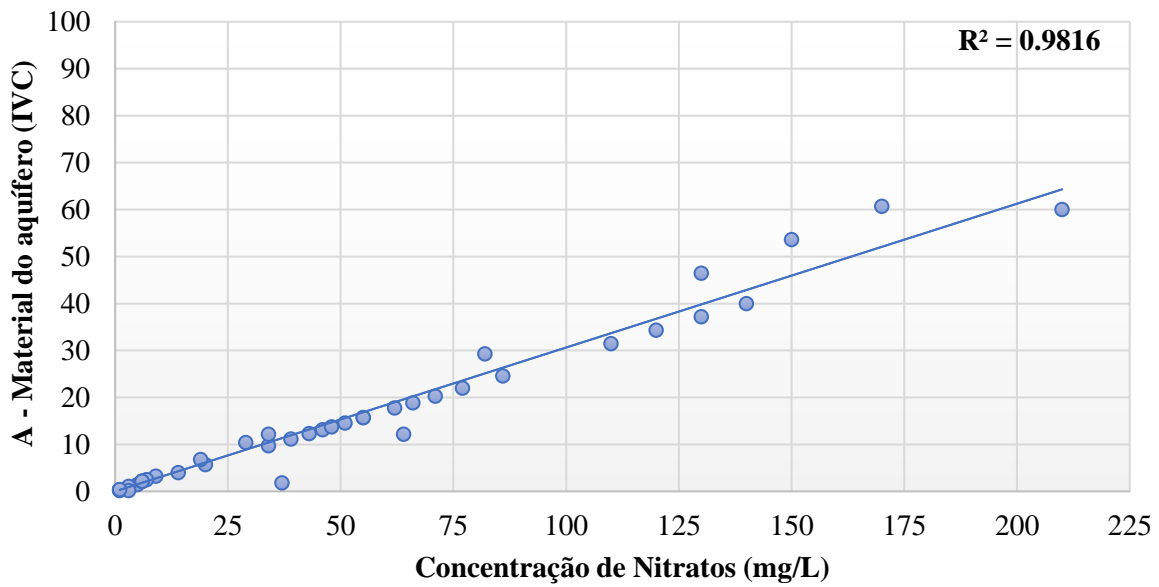


Figura 6.6: Correlação entre o parâmetro A: Material do aquífero do IS normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

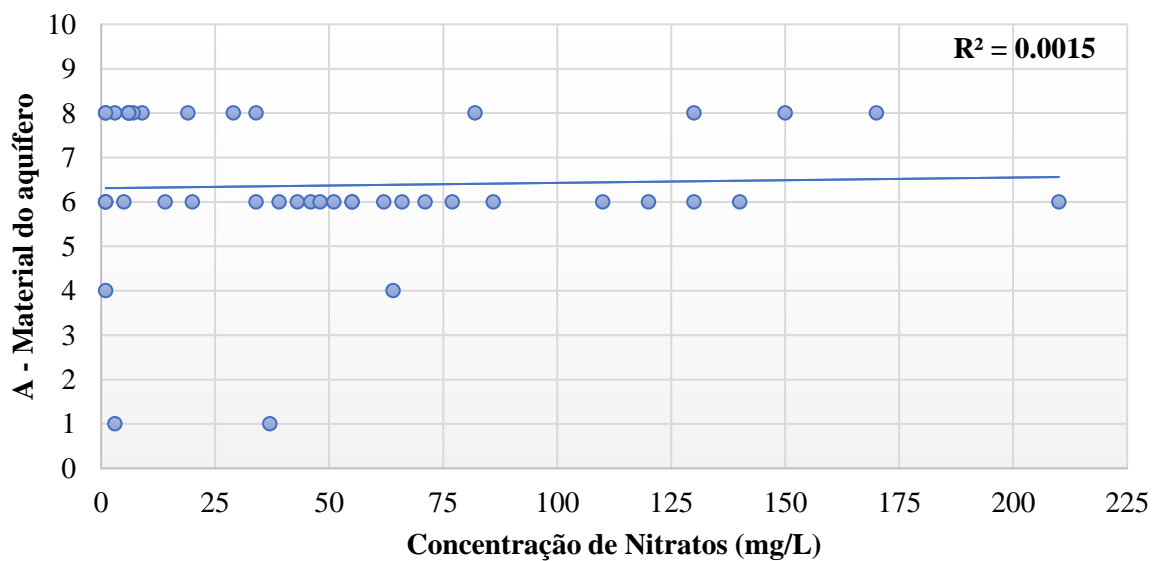


Figura 6.7: Relação entre o índice do parâmetro A: Material do aquífero do DRASTIC e DRASTIC Pesticide e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

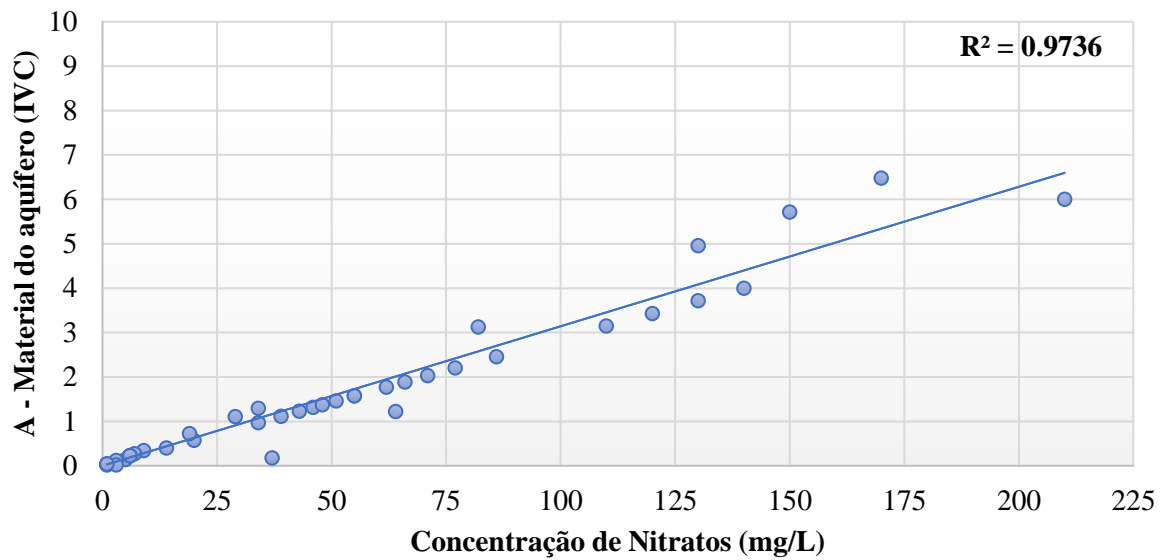


Figura 6.8: Correlação entre o parâmetro A: Material do aquífero do DRASTIC e DRASTIC Pesticide normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

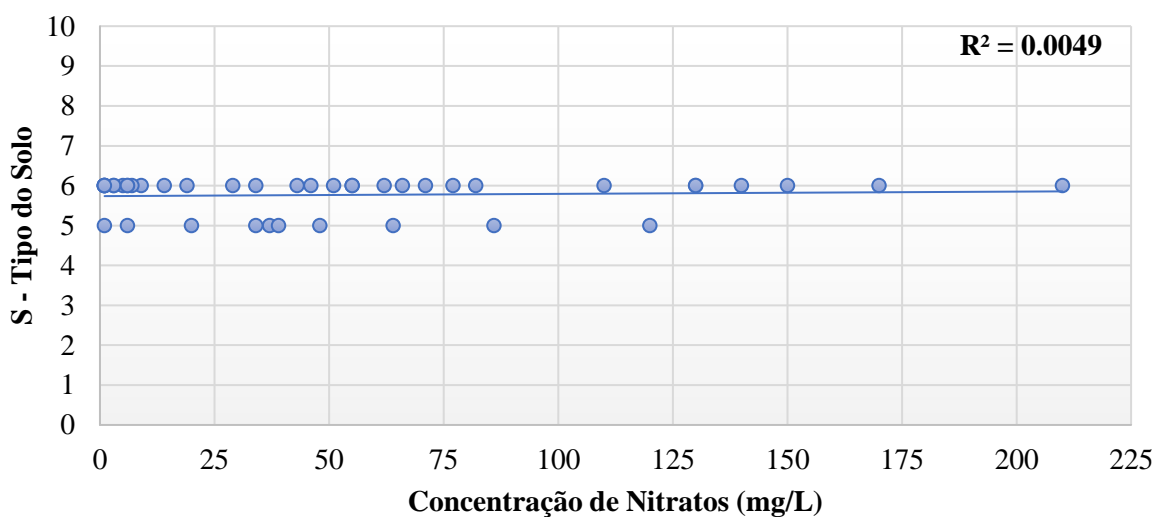


Figura 6.9: Relação entre o índice do parâmetro S: Tipo do Solo do DRASTIC e DRASTIC Pesticide e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

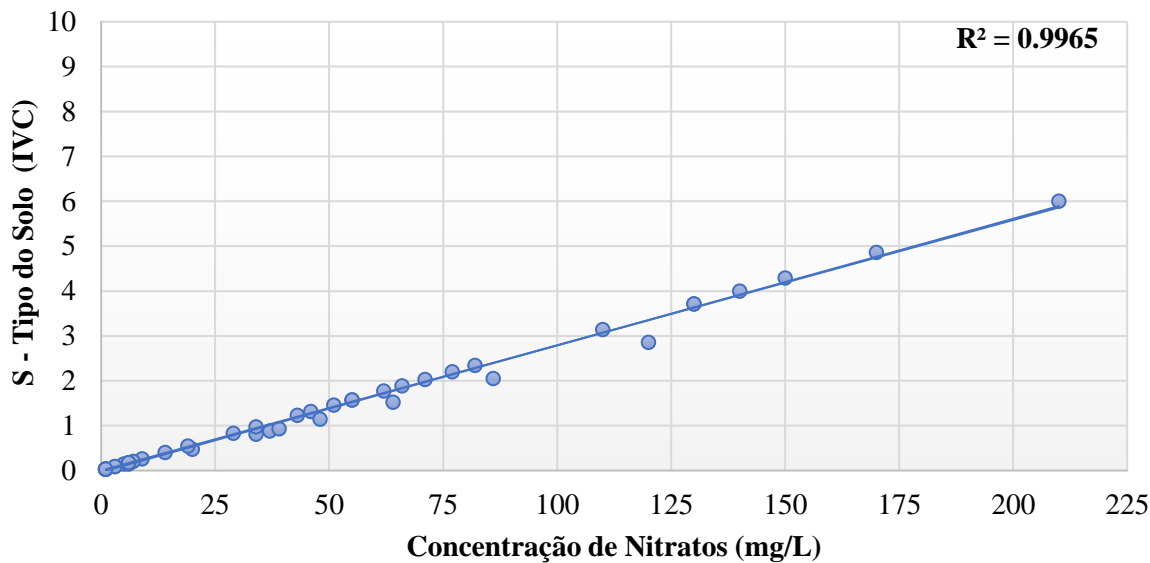


Figura 6.10: Correlação entre o parâmetro **S: Tipo do Solo** do DRASTIC e DRASTIC Pesticide normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

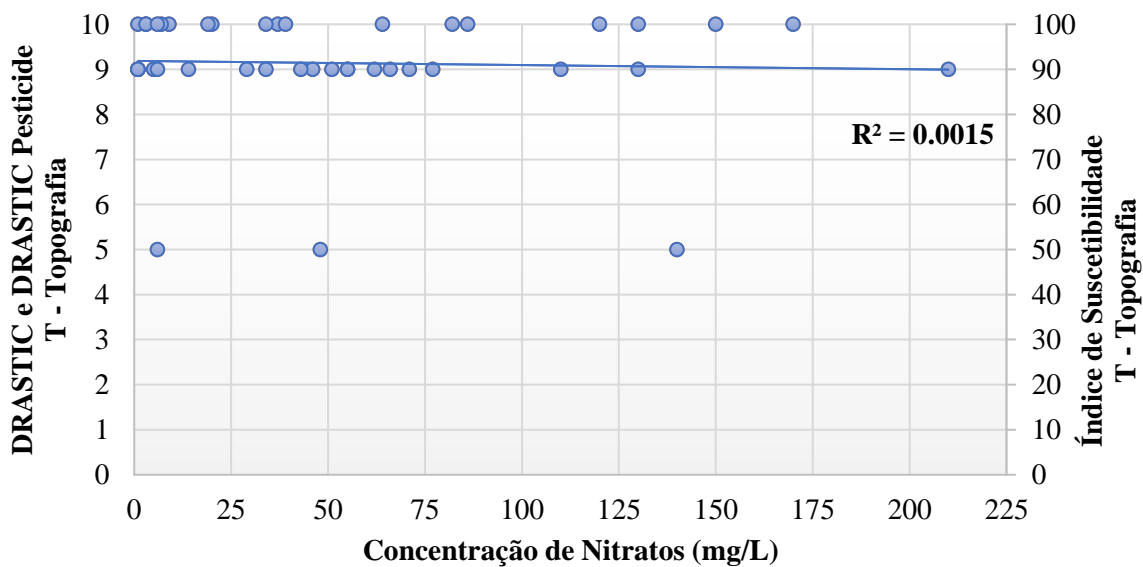


Figura 6.11: Relação entre o índice do parâmetro **T: Topografia** e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

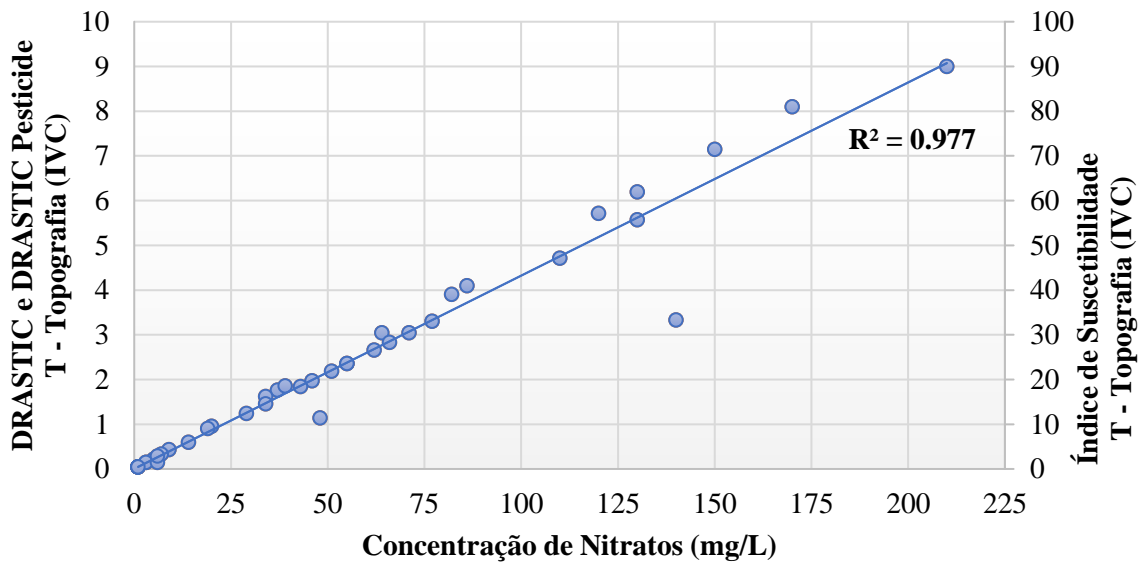


Figura 6.12: Correlação entre o parâmetro **T: Topografia** normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

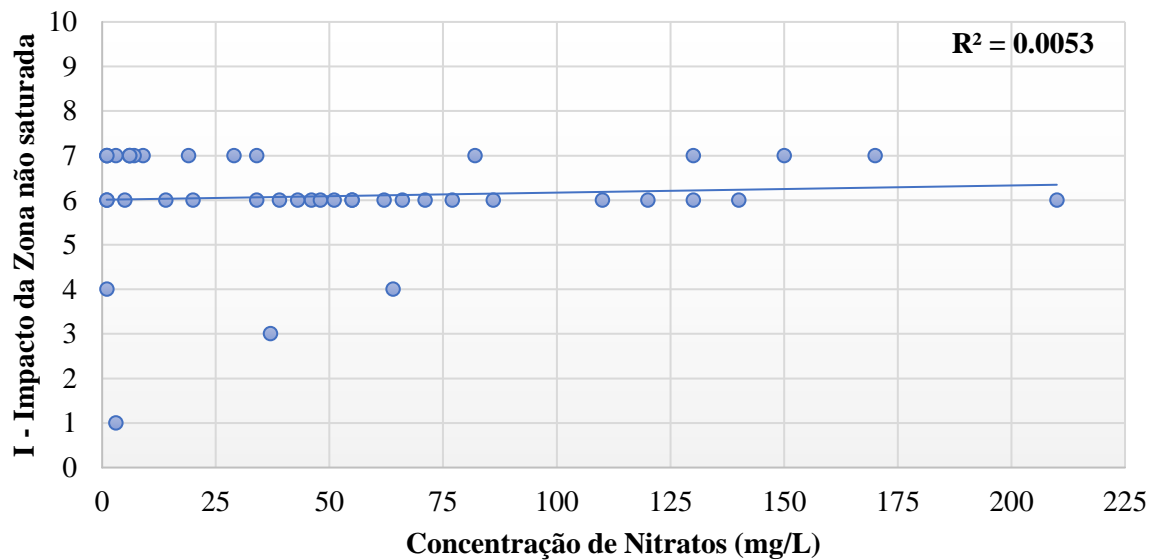


Figura 6.13: Relação entre o índice do parâmetro **I: Impacto da zona não saturada** do DRASTIC e DRASTIC Pesticide e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

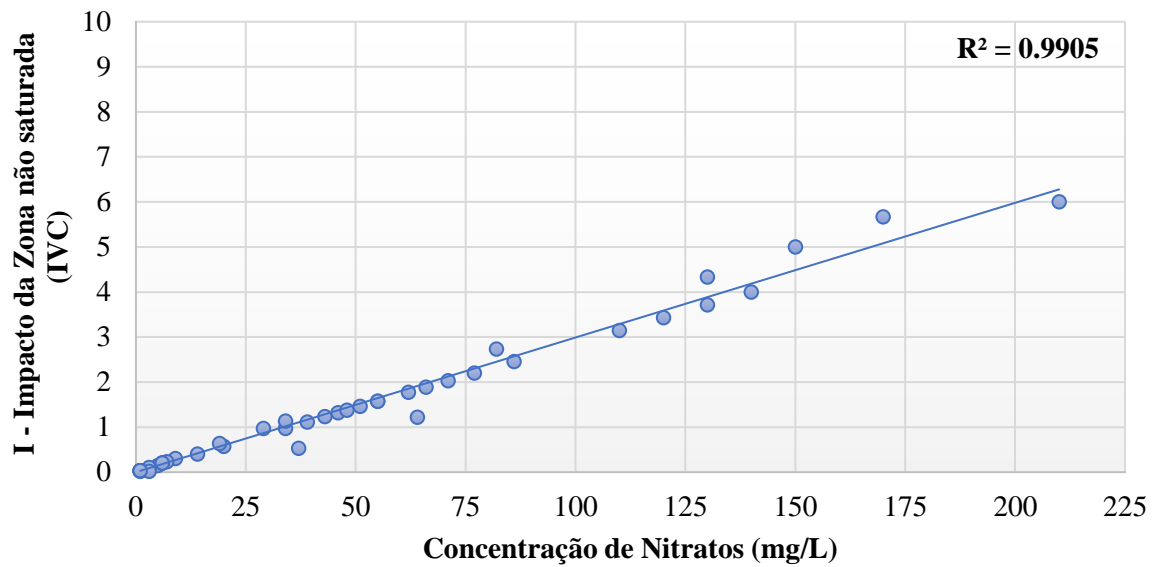


Figura 6.14: Correlação entre o parâmetro **I: Impacto da zona não saturada** do DRASTIC e DRASTIC Pesticide normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

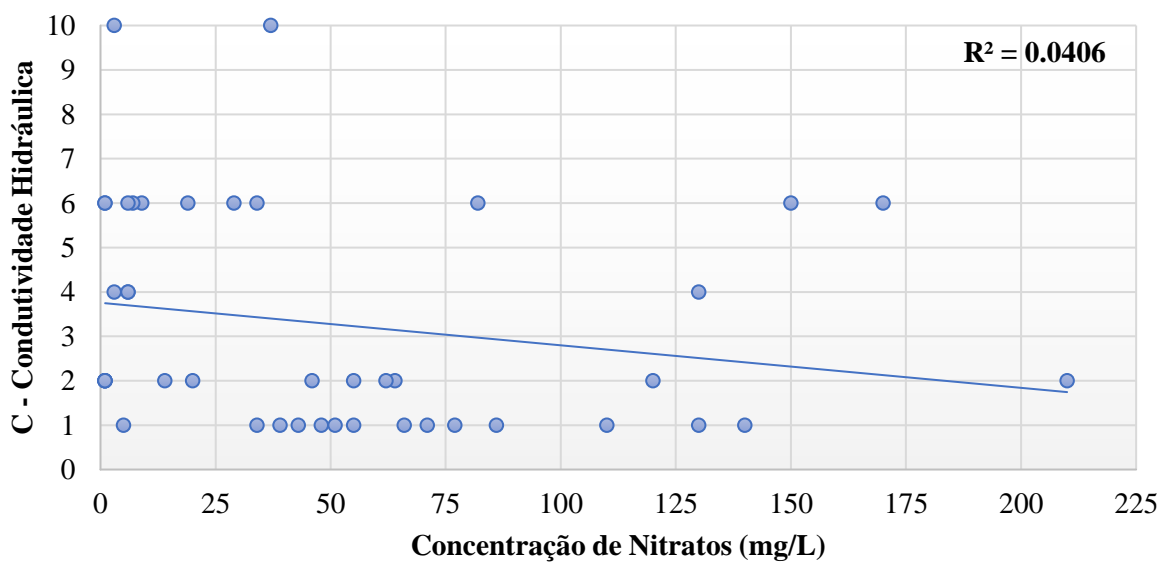


Figura 6.15: Relação entre o índice do parâmetro **C: Condutividade Hidráulica** do DRASTIC e DRASTIC Pesticide e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

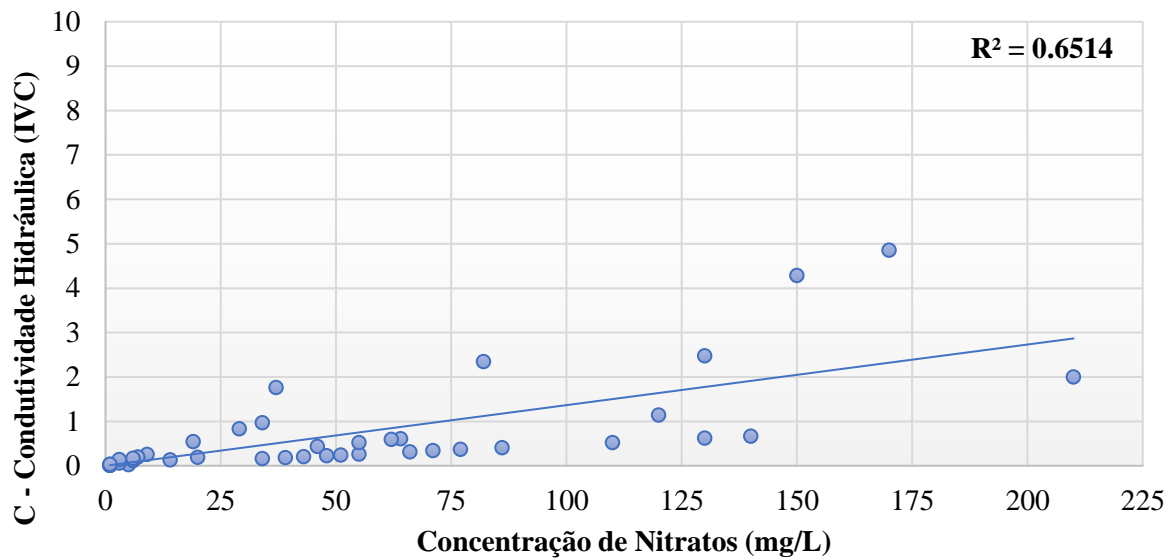


Figura 6.16: Correlação entre o parâmetro C: Condutividade Hidráulica do DRASTIC e DRASTIC Pesticide normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

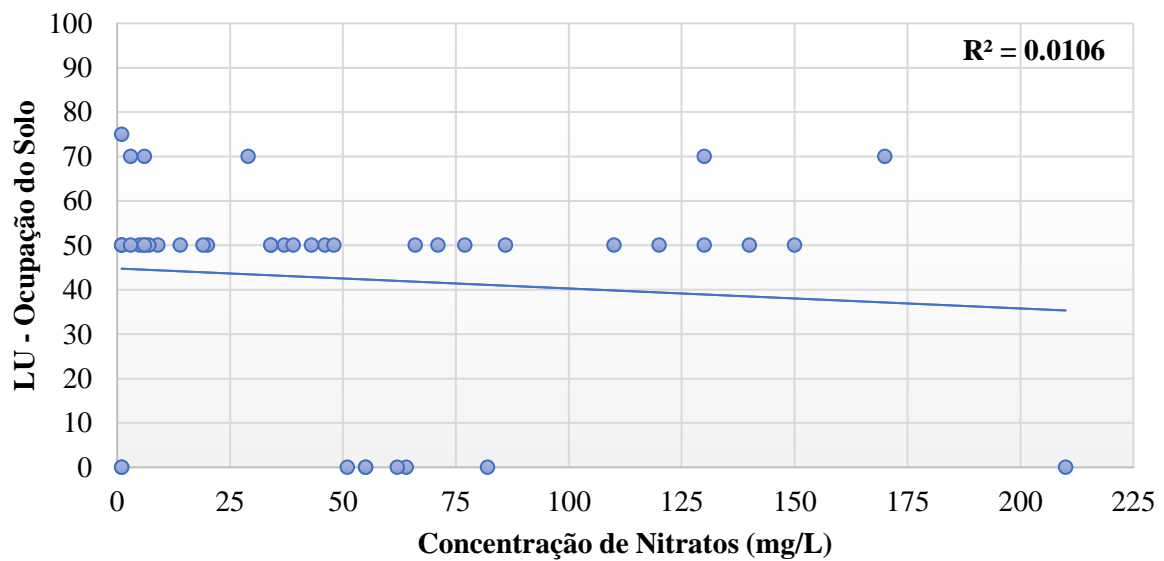


Figura 6.17: Relação entre o índice do parâmetro LU: Ocupação do Solo IS e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

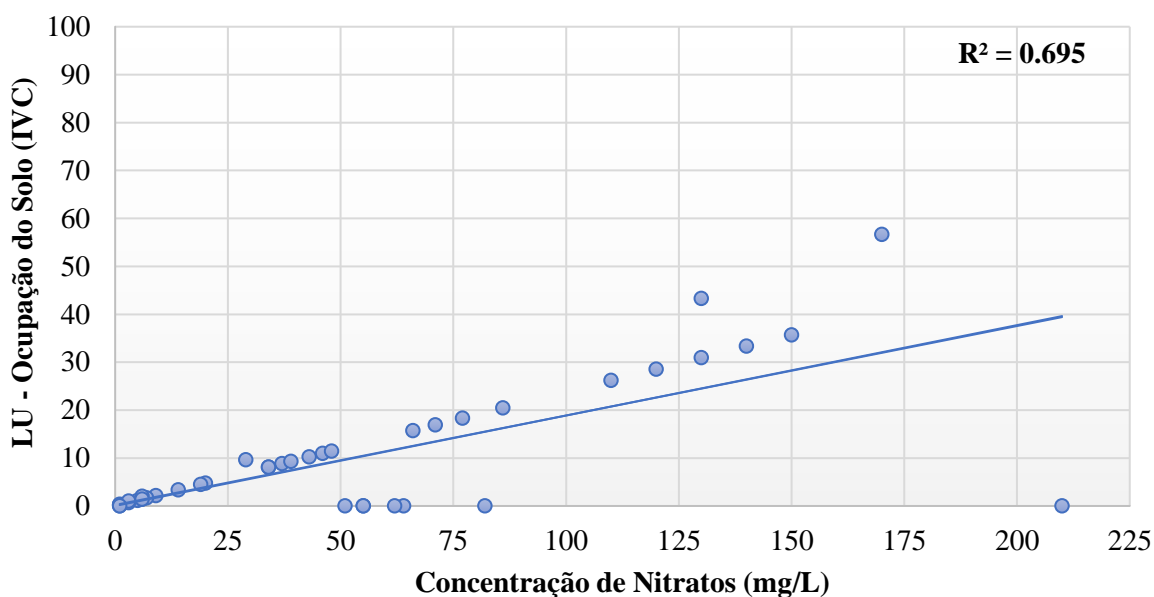


Figura 6.18: Correlação entre o parâmetro LU: Ocupação do Solo do IS normalizado e a concentração de nitratos na água subterrânea nos 43 pontos de observação na ZV Litoral Centro.

7. CONCLUSÃO

A melhor forma de proteger um aquífero de contaminação antrópica é conhecer a sua vulnerabilidade e condicionar a ocupação e utilização do solo. São vários os métodos de avaliação de vulnerabilidade e risco de contaminação a serem utilizados atualmente, no entanto, a aplicação desses modelos é complexa e imprecisa, conduzindo a conclusões discrepantes.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da aplicação dos métodos de determinação da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação, DRASTIC e DRASTIC Pesticide (Aller *et al.*, 1987), e o Índice de Suscetibilidade (Ribeiro, 2005) numa zona contaminada por nitratos de origem agrícola. A Zona Vulnerável do Litoral Centro foi a área escolhida por apresentar concentrações de nitratos nas águas subterrâneas superiores a 50 mg/L.

O mapeamento dos índices de vulnerabilidade dos aquíferos na ZV permitiu a observação detalhada da variação da vulnerabilidade e suscetibilidade do território. As classes de vulnerabilidade dos aquíferos não variam muito de método para método. As diferenças são relativamente pontuais e relacionadas com a amplitude das classes de vulnerabilidade. Na zona norte da ZV a vulnerabilidade varia de baixa a moderada, aumentando consideravelmente no centro, com vulnerabilidade moderada a elevada, na zona sul a vulnerabilidade é predominantemente moderada.

A eficiência da aplicação dos diferentes métodos de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos por nitratos foi avaliada utilizando-se dois métodos de cálculo de correlação entre os índices de vulnerabilidade calculados e a concentração de nitrato na água subterrânea da ZV em estudo. O método Índice de Correlação Qualitativo (ICQ) e o da Condição de Determinação do Índice de Vulnerabilidade (IVC).

O método ICQ expôs a eficiência dos métodos de avaliação através de uma comparação direta de mapas de classes de concentração de nitratos e de índices de vulnerabilidade. A comparação realizada nos 43 pontos de monitorização utilizados permitiu determinar a Correlação Qualitativa direta que leva a formular um cálculo do ICQ final. Para maior ICQ, maior a correlação entre o índice e a contaminação e, conseqüentemente, maior a eficácia do método de vulnerabilidade.

O método DRASTIC Pesticide foi o que apresentou maior valor de ICQ, de 102. Por sua vez o método DRASTIC tem ICQ de 96 e o método IS com um ICQ de 97.

Podemos neste caso dizer que através do ICQ, o método DRASTIC Pesticide é o que apresenta maior desempenho para a proteção de aquíferos porosos contaminados por nitratos.

O método IVC formula a correlação dos métodos de avaliação de vulnerabilidade através da utilização de classes de vulnerabilidade normalizadas com os dados de concentração de nitratos. A relação entre estas duas variáveis nos 43 pontos de monitorização na ZV é evidenciada pelos respetivos Coeficientes de Determinação (R^2).

Os índices obtidos pelo método DRASTIC Pesticide foram os que apresentaram maior R^2 , com o valor de 0,9906. Os índices DRASTIC apresentaram R^2 de 0,9854 e os índices IS de 0,9831. O índice DRASTIC Pesticide é o que apresenta maior correlação com a concentração de nitratos na ZV, isto é, as zonas de maior vulnerabilidade são as que se encontram mais contaminadas. Podemos neste caso dizer que através do IVC, o método DRASTIC Pesticide é o que apresenta maior desempenho para a proteção de aquíferos porosos contaminados por nitratos de origem agrícola.

A análise de sensibilidade dos diferentes parâmetros utilizados na determinação da vulnerabilidade e suscetibilidade dos aquíferos à contaminação por nitratos foi realizada, também através da aplicação do método IVC.

Os parâmetros com uma maior correlação com o grau de contaminação por nitratos foram S: Tipo do Solo ($R^2 = 0,9965$) e I: Impacto da zona não saturada ($R^2 = 0,9905$). O parâmetro que apresenta menor correlação é LU: Ocupação do solo ($R^2 = 0,6950$).

A correlação elevada dos parâmetros S e I com a concentração de nitratos nas águas subterrâneas da ZV reforça e explica o resultado obtido para o método DRASTIC Pesticide, tendo em consideração os pesos (ponderação) que estes parâmetros têm no cálculo dos índices de vulnerabilidade.

Os resultados do estudo aqui apresentado mostram que os três métodos, DRASTIC, DRASTIC Pesticide e IS, são fiáveis na avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação, mas que o método DRASTIC Pesticide é o que mostra maior eficiência. Deste modo, considera-se ser este o melhor método de avaliação de vulnerabilidade de aquíferos a ser aplicado em áreas onde a ocupação agrícola é preponderante e existe o risco de contaminação por nitratos.

8. BIBLIOGRAFIA

- Aller, L.; Bennet, T.; Lehr, J. H.; Petty, R. J.; Hackett, G. (1987). DRASTIC: A Standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. National Water Well Association. Dublin, Ohio.
- Almeida, C.; Mendonça, J. J. L.; Jesus, M. R.; Gomes, A. J. (2000). Sistemas aquíferos de Portugal Continental, Volume II. Centro de Geologia. Instituto da Água.
- Antunes, I. (2013). Proposta de Intervenção na Ria de Aveiro para a Requalificação Paisagística do Campus Universitário. Instituto Superior de Agronomia Universidade Técnica de Lisboa. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Arquitectura Paisagista. Lisboa, 2013.
- Araújo, M. A. Gomes, A. A., Chaminé, H. I., Fonseca P. E., Gama Pereira, L. C. & Pinto de Jesus, A. (2003). Geomorfologia e geologia regional do sector de Porto – Espinho (W de Portugal): implicações morfoestruturais na cobertura sedimentar cenozóica. Cadernos Lab. Xeol. Laxe, A Coruña, vol. 28, pp. 79-105.
- Barbosa, B. (1981). Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000 – Notícia explicativa da Folha 16-C Vagos. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Barbosa, B. (1988). Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000 – Notícia explicativa da Folha 19-A Cantanhede. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Barradas, J.M. (1992). Geoquímica de elementos maiores e vestigiais em amostras de solos, sedimentos de valas e águas subterrâneas. Contribuição para a caracterização ambiental da zona envolvente ao Complexo Químico de Estarreja. Universidade de Aveiro (Tese de Doutoramento).
- Carvalho, M. R.; Zeferino, J.; Silva, C.; Costa, L.; Monteiro, J. P.; Ferreira, J.; Fialho, R.; Carvalho, J. M. (2019). Metodologia para avaliação da evolução da qualidade das massas de água subterrâneas nas zonas vulneráveis aos nitratos de origem agrícola no âmbito da diretiva nitratos e diretiva quadro da água. Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências. Programa operacional sustentabilidade eficiência no uso de recurso (POSEUR).
- Chaminé H. I., Gomes A., Teixeira J., Fonseca P.E., Pinto de Jesus A., Gama Pereira L. C., Soares de Andrade A. A., Fernandes J. P., Moço L. P., Flores D., Araújo M. A. & Rocha F. T. (2004). Geologia, geomorfologia e estratigrafia dos domínios estruturais de Carvoeiro – Caldas de S. Jorge e de Soutelo – Arrancada do Vouga (faixa de cisalhamento de Porto – Coimbra – Tomar, NW de Portugal): implicações tectonoestratigráficas. Cadernos Lab. Xeol. Laxe, A Coruña, vol. 29, pp. 299-330.
- Chaminé, H. I. (2000). Estratigrafia e estrutura da faixa metamórfica de Espinho – Albergaria – a – Velha (Zona de Ossa-Morena): implicações geodinâmicas. Universidade do Porto. 497 pp. (Tese de doutoramento).

- CNIG – Carta CORINE Land Cover (1985 – 1987) [online]. 1ª Ed. [Lisboa, Portugal]: Centro Nacional de Informação Geográfica (CNIG), 1988.
- Condesso de Melo, M. T. (2002). Modelo matemático de fluxo e transporte de massa do sistema multiaquífero Cretácico da região Aveiro (Portugal). Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro. 206 pp. (Tese de Doutaramento).
- Diário da República, 1ª série – Nº 166 – 28 de agosto de 2012. Legislação, Portaria nº 259/2012, de 28 de agosto.
- Diário da República, 1ª série – Nº 105 – 31 de Maio de 2007. Decreto – Lei nº 226 – A/2007. “Lei da Água”.
- Diário da República, n.º 52/2010, Série I de 2010-03-16. Legislação, Portaria n.º 164/2010, de 16 março.
- Diretiva “Nitratos”. Diretiva 91/676/CEE de 12 dezembro de 1991, transposta para o quadro jurídico português pelo Decreto-Lei nº 235/97, de 3 de setembro. Política da União Europeia.
- Diretiva Quadro de Água. Diretiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de outubro de 2000. Política da União Europeia.
- Doerfliger, N.; Zwahlen, F. (1997). EPIK: A new method for outlining of protection areas in karstic environment, in: International symposium and field seminar on karst waters and environmental impacts. Günay, G. e Jonshon, A. I., Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam, 117-123 pp..
- DRAPCentro (Direção Regional de Agricultura e Pescas do Centro) (2020). Zonas Vulneráveis de Estarreja – Murto e do Litoral Centro. Ano Internacional da Sanidade Vegetal. República Portuguesa.
- Fadiran, O., Mamba, S. M., 2005. Analysis of nitrates and nitrites in some water and factory effluent samples from some cities in Swaziland. Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia. 19(1).
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), IUSS (International Union of Soil Sciences) (2015). World reference base for soil resources 2014, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps – Update 2015. World Soil Resources, Série nº106.
- Fernandes, A. J. (2003). “The Influence of Cenozoic tectonics on the groundwater production capacity and vulnerability of fractured rocks: a case study in São Paulo, Brazil”, in Krázny, Hrkal&Bruthans (eds), Groundwater in Fractured Rocks 61 - 62, Prague, Czech Republic.
- Ferreira da Silva, E. (1989). Impacte ambiental de elementos maiores e vestigiais no aquífero superficial de Estarreja: caracterização da zona envolvente ao complexo químico. Dissertação P.A.P.C.C., Universidade de Aveiro.
- Ferreira, P. (1995). Hidrogeologia do Quaternário da região norte da Ria de Aveiro. Tese de Mestrado. Universidade de Aveiro.

- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M.; Paris, M. Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities, and environment agencies. World Bank, GWMATE. Washington, 101p, 2002.
- INE (Instituto Nacional de Estatística) (2008). Estimativas Provisórias de População Residente: Portugal, NUTS II, NUTS III e Municípios. Lisboa.
- Leitão, T.B.E. 1996. Metodologia para a reabilitação de aquíferos poluídos. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (Tese de Doutaramento).
- Martins, A. (2016). Zonas Vulneráveis de Estarreja – Murtosa e Litoral Centro (Portaria 164/2010, de 16 março). Obrigações decorrentes do Programa de Ação das Zonas Vulneráveis (Portaria 259/2012, de 28 de agosto). Edital. DRAP Centro – Direção Regional de Agricultura e Pescas do Centro. República Portuguesa – Agricultura, Florestas e Desenvolvimento Rural.
- Nadiri, A. A.; Sedghi Z.; Khatibi, R.; Gharekhani, M. (2017). Mapping vulnerability of multiple aquifers using multiple models and fuzzy logic to objectively derive model structures. Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz. East Azerbaijan, Iran.
- Ordens, C. M. M. (2007). Estudo da contaminação do aquífero superior na região de Estarreja. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Departamento de Ciências da Terra. 191 pp.. Projecto BRIDGE, União Europeia.
- Pacheco, F. A. L.; Pires, L. M. G. R.; Santos, R. M. B.; Fernandes, L. F. S. (2014). Factor weighting in DRASTIC modeling. Departamento de Geologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Peixinho de Cristo, F. (1985). Estudo hidrogeológico do sistema aquífero do Baixo Vouga. Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos, Divisão de Geohidrologia, Coimbra.
- Perez, M.L., Mingo, S., Bosch, N., Peñuela, M.J., Garcia, M., 1998. Las verduras congeladas como fuente atenuada de nitratos y nitritos. Alimentacion, Equipos y Tecnologia Enero/febrero: 159-162..
- Rebelo, F. M. S. (1985). Nota sobre o conhecimento geomorfológico da área de Coimbra (Portugal). Mem. Not., Coimbra, Vol. 100, pp. 193 – 202.
- Resolução do Conselho de Ministros n.º 81/2012 – Diário da República, 1.ª série – N.º 192 – 3 de Outubro de 2012 26 pp..
- Ribeiro, L. (2012). Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis Integradas na Região Hidrográfica 4. Parte 2 – Caracterização Geral e Diagnóstico. ARH – Administração da Região Hidrográfica do Centro I.P.. Ministério da Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território.

- Ribeiro, L. (2005). Um novo índice de vulnerabilidade específica de aquíferos- formulação e aplicações. Publicações do VII Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SILUSBA).
- Ribeiro, L. (2005). Vulnerabilidade de Aquíferos, Conceitos, Métodos e Práticas. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Rocha, F. T. (1993). Argilas aplicadas a estudos litoestratigráficos e paleoambientais na Bacia Sedimentar de Aveiro. Universidade de Aveiro. 398 pp. (Tese de Doutoramento).
- Teixeira, C.; Zbyszewski, G. (1976). Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000 – Notícia explicativa da Folha 16-A Aveiro. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Teixeira, J.; Gomes, A.; Chaminé, H.; Rocha, F. (2007). Geomorfologia e morfotectónica de relevos quartzíticos: a megaestrutura de Caldas de S. Jorge – Águeda, NW de Portugal. Colaboração entre Universidade de Aveiro, Universidade do Porto e Instituto Superior de Engenharia do Porto. Xeográfica, Revista de Xeografia, Território e Médio Ambiente.
- Thirumalaivasan, D.; Karmegam, M. (2001). Aquifer vulnerability assessment using analytic hierarchy process and GIS for upper palar watershed. National University of Singapore.
- Zhou, H.; Wang, G.; Yang, Q. (1999). “A multi-objective fuzzy pattern recognition model for assessing groundwater vulnerability based on the DRASTIC system”. Hydrological Sciences Journal, vol. 44, nº 4, pp. 611-618.

9. WEBGRAFIA

APA (2016) – Agência Portuguesa do Ambiente. <https://apambiente.pt/agua/planos-de-gestao-de-regiao-hidrografica-2o-ciclo>. Acedido a 11 de Setembro de 2021.

APA (2021) – Agência Portuguesa do Ambiente. <https://rea.apambiente.pt/content/nitratos-de-origem-agr%C3%ADcola-em-%C3%A1guas-superficiais-e-subterr%C3%A2neas>. Acedido a 7 de Setembro de 2021.

COS (2018) – Carta de Uso e Ocupação do Solo 2018. <https://www.dgterritorio.gov.pt/Carta-de-Uso-e-Ocupacao-do-Solo-para-2018>. Acedido a 20 de Abril de 2022.

EPA – Environmental Protection Agency. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/200093PP.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EP&Index=1981+Thru+1985&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C81thru85%5CTxt%5C00000002%5C200093PP.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL>. Acedido a 13 de Janeiro de 2021.

SNIAmb – Sistema Nacional de Informação Ambiental. <https://sniamb.apambiente.pt/content/geo-visualizador>. Acedido a 13 de Outubro de 2021.

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. <https://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=2&idItem=1>. Acedido a 21 de Outubro de 2021.

10. ANEXO

Tabela 10.1: Método do Índice de Correlação Qualitativo (ICQ), dados utilizados para o Método DRASTIC

Ponto de controlo	Pontuação atribuída	Correlação atribuída (Nitrato - Vulnerabilidade)
1	3	Moderado - Moderado
2	3	Moderado - Moderado
3	2	Alto - Moderado
4	2	Alto - Moderado
5	2	Alto - Moderado
6	2	Alto - Moderado
7	2	Alto - Moderado
8	2	Baixo - Moderado
9	2	Alto - Moderado
10	2	Alto - Moderado
11	2	Alto - Moderado
12	2	Alto - Moderado
13	3	Moderado - Moderado
14	3	Moderado - Moderado
15	3	Moderado - Moderado
16	3	Moderado - Moderado
17	2	Moderado - Alto
18	3	Moderado - Moderado
19	2	Alto - Moderado
20	2	Alto - Moderado
21	2	Alto - Moderado
22	3	Moderado - Moderado
23	2	Moderado - Alto
24	2	Alto - Moderado
25	2	Baixo - Moderado
26	3	Alto - Alto
27	3	Alto - Alto
28	1	Baixo - Alto
29	1	Baixo - Alto
30	1	Baixo - Alto
31	3	Moderado - Moderado
32	3	Alto - Alto
33	2	Moderado - Alto
34	3	Alto - Alto
35	3	Moderado - Moderado
36	2	Alto - Moderado
37	3	Alto - Alto
38	2	Moderado - Alto
39	2	Baixo - Moderado
40	1	Baixo - Alto
41	1	Baixo - Alto
42	1	Baixo - Alto
43	3	Moderado - Moderado
	96	

Tabela 10.2: Método do Índice de Correlação Qualitativo (ICQ), dados utilizados para o Método DRASTIC Pesticide

Ponto de controlo	Pontuação atribuída	Correlação atribuída (Nitrato - Vulnerabilidade)
1	2	Moderado - Alto
2	3	Moderado - Moderado
3	3	Alto - Alto
4	2	Alto - Moderado
5	3	Alto - Alto
6	3	Alto - Alto
7	3	Alto - Alto
8	1	Baixo - Alto
9	3	Alto - Alto
10	3	Alto - Alto
11	3	Alto - Alto
12	3	Alto - Alto
13	2	Moderado - Alto
14	3	Moderado - Moderado
15	3	Moderado - Moderado
16	3	Moderado - Moderado
17	2	Moderado - Alto
18	2	Moderado - Alto
19	3	Alto - Alto
20	3	Alto - Alto
21	3	Alto - Alto
22	2	Moderado - Alto
23	2	Moderado - Alto
24	3	Alto - Alto
25	2	Baixo - Moderado
26	3	Alto - Alto
27	3	Alto - Alto
28	1	Baixo - Alto
29	1	Baixo - Alto
30	1	Baixo - Alto
31	2	Moderado - Alto
32	3	Alto - Alto
33	3	Alto - Alto
34	3	Alto - Alto
35	2	Moderado - Alto
36	3	Alto - Alto
37	3	Alto - Alto
38	2	Moderado - Alto
39	2	Baixo - Moderado
40	1	Baixo - Alto
41	1	Baixo - Alto
42	1	Baixo - Alto
43	2	Moderado - Alto
	102	

Tabela 10.3: Método do Índice de Correlação Qualitativo (ICQ), dados utilizados para o Método IS (Ribeiro, 2005)

Ponto de controlo	Pontuação atribuída	Correlação atribuída (Nitrato - Vulnerabilidade)
1	2	Moderado - Alto
2	3	Moderado - Moderado
3	3	Alto - Alto
4	2	Alto - Moderado
5	3	Alto - Alto
6	3	Alto - Alto
7	3	Alto - Alto
8	1	Baixo - Alto
9	3	Alto - Alto
10	3	Alto - Alto
11	3	Alto - Alto
12	3	Alto - Alto
13	2	Moderado - Alto
14	2	Moderado - Alto
15	2	Moderado - Alto
16	2	Moderado - Alto
17	2	Moderado - Alto
18	2	Moderado - Alto
19	3	Alto - Alto
20	3	Alto - Alto
21	3	Alto - Alto
22	2	Moderado - Alto
23	2	Moderado - Alto
24	3	Alto - Alto
25	1	Baixo - Alto
26	3	Alto - Alto
27	3	Alto - Alto
28	1	Baixo - Alto
29	1	Baixo - Alto
30	1	Baixo - Alto
31	2	Moderado - Alto
32	3	Alto - Alto
33	3	Alto - Alto
34	3	Alto - Alto
35	2	Moderado - Alto
36	3	Alto - Alto
37	3	Alto - Alto
38	2	Moderado - Alto
39	1	Baixo - Alto
40	1	Baixo - Alto
41	1	Baixo - Alto
42	1	Baixo - Alto
43	2	Moderado - Alto
	97	

Tabela 10.4: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o Método DRASTIC e DRASTIC Pesticide, PARTE 1

Ponto de controlo	Concentração de Nitratos (mg/L)	D Profundidade	D (IVC) Profundidade
1	20	9	0.86
2	37	9	1.59
3	120	9	5.14
4	64	7	2.13
5	140	7	4.67
6	110	7	3.67
7	77	7	2.57
8	1	9	0.04
9	86	7	2.87
10	46	9	1.97
11	51	9	2.19
12	55	9	2.36
13	43	9	1.84
14	48	7	1.60
15	34	5	0.81
16	39	5	0.93
17	19	9	0.81
18	5	10	0.24
19	71	9	3.04
20	130	9	5.57
21	66	9	2.83
22	14	9	0.60
23	9	9	0.39
24	62	10	2.95
25	1	10	0.05
26	82	10	3.90
27	150	10	7.14
28	6	9	0.26
29	1	10	0.05
30	7	10	0.33
31	1	10	0.05
32	130	9	5.57
33	210	9	9.00
34	3	9	0.13
35	1	9	0.04
36	55	9	2.36
37	170	9	7.29
38	29	7	0.97
39	3	5	0.07
40	6	7	0.20
41	6	7	0.20
42	1	7	0.03
43	34	3	0.49

Tabela 10.5: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o Método DRASTIC e DRASTIC Pesticide, PARTE 2

Ponto de controlo	Concentração de Nitratos (mg/L)	R Recarga	R (IVC) Recarga
1	20	6	0.57
2	37	1	0.18
3	120	6	3.43
4	64	3	0.91
5	140	6	4.00
6	110	6	3.14
7	77	6	2.20
8	1	6	0.03
9	86	8	3.28
10	46	6	1.31
11	51	6	1.46
12	55	6	1.57
13	43	6	1.23
14	48	6	1.37
15	34	6	0.97
16	39	6	1.11
17	19	8	0.72
18	5	6	0.14
19	71	6	2.03
20	130	6	3.71
21	66	6	1.89
22	14	6	0.40
23	9	8	0.34
24	62	6	1.77
25	1	3	0.01
26	82	8	3.12
27	150	8	5.71
28	6	8	0.23
29	1	8	0.04
30	7	8	0.27
31	1	6	0.03
32	130	8	4.95
33	210	6	6.00
34	3	8	0.11
35	1	6	0.03
36	55	6	1.57
37	170	8	6.48
38	29	8	1.10
39	3	1	0.01
40	6	8	0.23
41	6	8	0.23
42	1	8	0.04
43	34	8	1.30

Tabela 10.6: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o Método DRASTIC e DRASTIC Pesticide, PARTE 3

Ponto de controle	Concentração de Nitratos (mg/L)	A Litologia	A (IVC) Litologia
1	20	6	0.57
2	37	1	0.18
3	120	6	3.43
4	64	4	1.22
5	140	6	4.00
6	110	6	3.14
7	77	6	2.20
8	1	6	0.03
9	86	6	2.46
10	46	6	1.31
11	51	6	1.46
12	55	6	1.57
13	43	6	1.23
14	48	6	1.37
15	34	6	0.97
16	39	6	1.11
17	19	8	0.72
18	5	6	0.14
19	71	6	2.03
20	130	6	3.71
21	66	6	1.89
22	14	6	0.40
23	9	8	0.34
24	62	6	1.77
25	1	4	0.02
26	82	8	3.12
27	150	8	5.71
28	6	8	0.23
29	1	8	0.04
30	7	8	0.27
31	1	6	0.03
32	130	8	4.95
33	210	6	6.00
34	3	8	0.11
35	1	6	0.03
36	55	6	1.57
37	170	8	6.48
38	29	8	1.10
39	3	1	0.01
40	6	8	0.23
41	6	8	0.23
42	1	8	0.04
43	34	8	1.30

Tabela 10.7: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o Método DRASTIC e DRASTIC Pesticide, PARTE 4

Ponto de controlo	Concentração de Nitratos (mg/L)	S Tipo do Solo	S (IVC) Tipo do Solo
1	20	5	0.48
2	37	5	0.88
3	120	5	2.86
4	64	5	1.52
5	140	6	4.00
6	110	6	3.14
7	77	6	2.20
8	1	6	0.03
9	86	5	2.05
10	46	6	1.31
11	51	6	1.46
12	55	6	1.57
13	43	6	1.23
14	48	5	1.14
15	34	5	0.81
16	39	5	0.93
17	19	6	0.54
18	5	6	0.14
19	71	6	2.03
20	130	6	3.71
21	66	6	1.89
22	14	6	0.40
23	9	6	0.26
24	62	6	1.77
25	1	5	0.02
26	82	6	2.34
27	150	6	4.29
28	6	5	0.14
29	1	6	0.03
30	7	6	0.20
31	1	6	0.03
32	130	6	3.71
33	210	6	6.00
34	3	6	0.09
35	1	6	0.03
36	55	6	1.57
37	170	6	4.86
38	29	6	0.83
39	3	6	0.09
40	6	6	0.17
41	6	6	0.17
42	1	6	0.03
43	34	6	0.97

Tabela 10.8: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o Método DRASTIC e DRASTIC Pesticide, PARTE 5

Ponto de controlo	Concentração de Nitratos (mg/L)	T Topografia	T (IVC) Topografia
1	20	10	0.95
2	37	10	1.76
3	120	10	5.71
4	64	10	3.05
5	140	5	3.33
6	110	9	4.71
7	77	9	3.30
8	1	9	0.04
9	86	10	4.10
10	46	9	1.97
11	51	9	2.19
12	55	9	2.36
13	43	9	1.84
14	48	5	1.14
15	34	10	1.62
16	39	10	1.86
17	19	10	0.90
18	5	9	0.21
19	71	9	3.04
20	130	9	5.57
21	66	9	2.83
22	14	9	0.60
23	9	10	0.43
24	62	9	2.66
25	1	9	0.04
26	82	10	3.90
27	150	10	7.14
28	6	9	0.26
29	1	9	0.04
30	7	10	0.33
31	1	9	0.04
32	130	10	6.19
33	210	9	9.00
34	3	10	0.14
35	1	10	0.05
36	55	9	2.36
37	170	10	8.10
38	29	9	1.24
39	3	10	0.14
40	6	5	0.14
41	6	10	0.29
42	1	9	0.04
43	34	9	1.46

Tabela 10.9: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o Método DRASTIC e DRASTIC Pesticide, PARTE 6

Ponto de controlo	Concentração de Nitratos (mg/L)	I Impacto da Zona não Saturada	I (IVC) Impacto da Zona não Saturada
1	20	6	0.57
2	37	3	0.53
3	120	6	3.43
4	64	4	1.22
5	140	6	4.00
6	110	6	3.14
7	77	6	2.20
8	1	6	0.03
9	86	6	2.46
10	46	6	1.31
11	51	6	1.46
12	55	6	1.57
13	43	6	1.23
14	48	6	1.37
15	34	6	0.97
16	39	6	1.11
17	19	7	0.63
18	5	6	0.14
19	71	6	2.03
20	130	6	3.71
21	66	6	1.89
22	14	6	0.40
23	9	7	0.30
24	62	6	1.77
25	1	4	0.02
26	82	7	2.73
27	150	7	5.00
28	6	7	0.20
29	1	7	0.03
30	7	7	0.23
31	1	7	0.03
32	130	7	4.33
33	210	6	6.00
34	3	7	0.10
35	1	6	0.03
36	55	6	1.57
37	170	7	5.67
38	29	7	0.97
39	3	1	0.01
40	6	7	0.20
41	6	7	0.20
42	1	7	0.03
43	34	7	1.13

Tabela 10.10: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o Método DRASTIC e DRASTIC Pesticide, PARTE 7

Ponto de controlo	Concentração de Nitratos (mg/L)	C Condutividade	C (IVC) Condutividade
1	20	2	0.19
2	37	10	1.76
3	120	2	1.14
4	64	2	0.61
5	140	1	0.67
6	110	1	0.52
7	77	1	0.37
8	1	2	0.01
9	86	1	0.41
10	46	2	0.44
11	51	1	0.24
12	55	1	0.26
13	43	1	0.20
14	48	1	0.23
15	34	1	0.16
16	39	1	0.19
17	19	6	0.54
18	5	1	0.02
19	71	1	0.34
20	130	1	0.62
21	66	1	0.31
22	14	2	0.13
23	9	6	0.26
24	62	2	0.59
25	1	2	0.01
26	82	6	2.34
27	150	6	4.29
28	6	4	0.11
29	1	6	0.03
30	7	6	0.20
31	1	2	0.01
32	130	4	2.48
33	210	2	2.00
34	3	4	0.06
35	1	2	0.01
36	55	2	0.52
37	170	6	4.86
38	29	6	0.83
39	3	10	0.14
40	6	4	0.11
41	6	6	0.17
42	1	6	0.03
43	34	6	0.97

Tabela 10.11: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o IS (Ribeiro, 2005), PARTE 1

Ponto de controlo	Concentração de Nitratos (mg/L)	D Profundidade	D (IVC) Profundidade
1	20	90	8.57
2	37	90	15.86
3	120	90	51.43
4	64	70	21.33
5	140	70	46.67
6	110	70	36.67
7	77	70	25.67
8	1	90	0.43
9	86	70	28.67
10	46	90	19.71
11	51	90	21.86
12	55	90	23.57
13	43	90	18.43
14	48	70	16.00
15	34	50	8.10
16	39	50	9.29
17	19	90	8.14
18	5	100	2.38
19	71	90	30.43
20	130	90	55.71
21	66	90	28.29
22	14	90	6.00
23	9	90	3.86
24	62	100	29.52
25	1	100	0.48
26	82	100	39.05
27	150	100	71.43
28	6	90	2.57
29	1	100	0.48
30	7	100	3.33
31	1	100	0.48
32	130	90	55.71
33	210	90	90.00
34	3	90	1.29
35	1	90	0.43
36	55	90	23.57
37	170	90	72.86
38	29	70	9.67
39	3	50	0.71
40	6	70	2.00
41	6	70	2.00
42	1	70	0.33
43	34	30	4.86

Tabela 10.12: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o IS (Ribeiro, 2005), PARTE 2

Ponto de controlo	Concentração de Nitratos (mg/L)	R Recarga	R (IVC) Recarga
1	20	60	5.71
2	37	10	1.76
3	120	60	34.29
4	64	30	9.14
5	140	60	40.00
6	110	60	31.43
7	77	60	22.00
8	1	60	0.29
9	86	80	32.76
10	46	60	13.14
11	51	60	14.57
12	55	60	15.71
13	43	60	12.29
14	48	60	13.71
15	34	60	9.71
16	39	60	11.14
17	19	80	7.24
18	5	60	1.43
19	71	60	20.29
20	130	60	37.14
21	66	60	18.86
22	14	60	4.00
23	9	80	3.43
24	62	60	17.71
25	1	30	0.14
26	82	80	31.24
27	150	80	57.14
28	6	80	2.29
29	1	80	0.38
30	7	80	2.67
31	1	60	0.29
32	130	80	49.52
33	210	60	60.00
34	3	80	1.14
35	1	60	0.29
36	55	60	15.71
37	170	80	64.76
38	29	80	11.05
39	3	10	0.14
40	6	80	2.29
41	6	80	2.29
42	1	80	0.38
43	34	80	12.95

Tabela 10.13: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o IS (Ribeiro, 2005), PARTE 3

Ponto de controlo	Concentração de Nitratos (mg/L)	A Litologia	A (IVC) Litologia
1	20	60	5.71
2	37	10	1.76
3	120	60	34.29
4	64	40	12.19
5	140	60	40.00
6	110	60	31.43
7	77	60	22.00
8	1	60	0.29
9	86	60	24.57
10	46	60	13.14
11	51	60	14.57
12	55	60	15.71
13	43	60	12.29
14	48	60	13.71
15	34	60	9.71
16	39	60	11.14
17	19	75	6.79
18	5	60	1.43
19	71	60	20.29
20	130	60	37.14
21	66	60	18.86
22	14	60	4.00
23	9	75	3.21
24	62	60	17.71
25	1	40	0.19
26	82	75	29.29
27	150	75	53.57
28	6	75	2.14
29	1	75	0.36
30	7	75	2.50
31	1	60	0.29
32	130	75	46.43
33	210	60	60.00
34	3	75	1.07
35	1	60	0.29
36	55	60	15.71
37	170	75	60.71
38	29	75	10.36
39	3	10	0.14
40	6	75	2.14
41	6	75	2.14
42	1	75	0.36
43	34	75	12.14

Tabela 10.14: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o IS (Ribeiro, 2005), PARTE 4

Ponto de controlo	Concentração de Nitratos (mg/L)	T Topografia	T (IVC) Topografia
1	20	100	9.52
2	37	100	17.62
3	120	100	57.14
4	64	100	30.48
5	140	50	33.33
6	110	90	47.14
7	77	90	33.00
8	1	90	0.43
9	86	100	40.95
10	46	90	19.71
11	51	90	21.86
12	55	90	23.57
13	43	90	18.43
14	48	50	11.43
15	34	100	16.19
16	39	100	18.57
17	19	100	9.05
18	5	90	2.14
19	71	90	30.43
20	130	90	55.71
21	66	90	28.29
22	14	90	6.00
23	9	100	4.29
24	62	90	26.57
25	1	90	0.43
26	82	100	39.05
27	150	100	71.43
28	6	90	2.57
29	1	90	0.43
30	7	100	3.33
31	1	90	0.43
32	130	100	61.90
33	210	90	90.00
34	3	100	1.43
35	1	100	0.48
36	55	90	23.57
37	170	100	80.95
38	29	90	12.43
39	3	100	1.43
40	6	50	1.43
41	6	100	2.86
42	1	90	0.43
43	34	90	14.57

Tabela 10.15: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados dos parâmetros utilizados para o IS (Ribeiro, 2005), PARTE 5

Ponto de controlo	Concentração de Nitratos (mg/L)	LU Ocupação do Solo	LU (IVC) Ocupação do Solo
1	20	50	4.76
2	37	50	8.81
3	120	50	28.57
4	64	0	0.00
5	140	50	33.33
6	110	50	26.19
7	77	50	18.33
8	1	50	0.24
9	86	50	20.48
10	46	50	10.95
11	51	0	0.00
12	55	0	0.00
13	43	50	10.24
14	48	50	11.43
15	34	50	8.10
16	39	50	9.29
17	19	50	4.52
18	5	50	1.19
19	71	50	16.90
20	130	70	43.33
21	66	50	15.71
22	14	50	3.33
23	9	50	2.14
24	62	0	0.00
25	1	50	0.24
26	82	0	0.00
27	150	50	35.71
28	6	50	1.43
29	1	50	0.24
30	7	50	1.67
31	1	75	0.36
32	130	50	30.95
33	210	0	0.00
34	3	50	0.71
35	1	0	0.00
36	55	0	0.00
37	170	70	56.67
38	29	70	9.67
39	3	70	1.00
40	6	70	2.00
41	6	50	1.43
42	1	0	0.00
43	34	50	8.10

Tabela 10.16: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados utilizados para o Método DRASTIC

Ponto de controlo	Índice de Vulnerabilidade	Concentração de Nitratos (mg/L)	IVC
1	151	20	14.38
2	125	37	22.02
3	151	120	86.29
4	116	64	35.35
5	139	140	92.67
6	139	110	72.81
7	139	77	50.97
8	152	1	0.72
9	146	86	59.79
10	148	46	32.42
11	149	51	36.19
12	149	55	39.02
13	150	43	30.71
14	133	48	30.40
15	128	34	20.72
16	128	39	23.77
17	184	19	16.65
18	155	5	3.69
19	150	71	50.71
20	149	130	92.24
21	149	66	46.83
22	152	14	10.13
23	184	9	7.89
24	157	62	46.35
25	131	1	0.62
26	189	82	73.80
27	189	150	135.00
28	175	6	5.00
29	188	1	0.90
30	188	7	6.27
31	157	1	0.75
32	178	130	110.19
33	152	210	152.00
34	178	3	2.54
35	153	1	0.73
36	152	55	39.81
37	184	170	148.95
38	173	29	23.89
39	99	3	1.41
40	163	6	4.66
41	174	6	4.97
42	173	1	0.82
43	153	34	24.77

Tabela 10.17: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados utilizados para o Método DRASTIC Pesticide

Ponto de controlo	Índice de Vulnerabilidade	Concentração de Nitratos (mg/L)	IVC
1	178	20	16.95
2	147	37	25.90
3	178	120	101.71
4	146	64	44.50
5	168	140	112.00
6	168	110	88.00
7	168	77	61.60
8	180	1	0.86
9	171	86	70.03
10	168	46	36.80
11	178	51	43.23
12	178	55	46.62
13	178	43	36.45
14	151	48	34.51
15	156	34	25.26
16	156	39	28.97
17	209	19	18.91
18	186	5	4.43
19	178	71	60.18
20	178	130	110.19
21	178	66	55.94
22	168	14	11.20
23	209	9	8.96
24	185	62	54.62
25	158	1	0.75
26	211	82	82.39
27	214	150	152.86
28	197	6	5.63
29	211	1	1.00
30	214	7	7.13
31	185	1	0.88
32	205	130	126.90
33	180	210	180.00
34	205	3	2.93
35	180	1	0.86
36	180	55	47.14
37	209	170	169.19
38	199	29	27.48
39	124	3	1.77
40	180	6	5.14
41	199	6	5.69
42	199	1	0.95
43	176	34	28.50

Tabela 10.18: Método de Índice de Vulnerabilidade Condicionado (IVC), dados utilizados para o Método IS (Ribeiro, 2005)

Ponto de controlo	Índice de Vulnerabilidade	Concentração de Nitratos (mg/L)	IVC
1	71	20	6.76
2	49	37	8.63
3	73	120	41.71
4	48	64	14.63
5	68	140	45.33
6	69	110	36.14
7	69	77	25.30
8	71	1	0.34
9	73	86	29.90
10	71	46	15.55
11	60	51	14.57
12	60	55	15.71
13	73	43	14.95
14	63	48	14.40
15	64	34	10.36
16	65	39	12.07
17	81	19	7.33
18	74	5	1.76
19	71	71	24.00
20	71	130	43.95
21	71	66	22.31
22	71	14	4.73
23	81	9	3.47
24	62	62	18.30
25	64	1	0.30
26	71	82	27.72
27	82	150	58.57
28	79	6	2.26
29	81	1	0.39
30	82	7	2.73
31	79	1	0.38
32	81	130	50.14
33	60	210	60.00
34	81	3	1.16
35	60	1	0.29
36	60	55	15.71
37	85	170	68.81
38	81	29	11.19
39	78	3	1.11
40	75	6	2.14
41	77	6	2.20
42	66	1	0.31
43	68	34	11.01