



ARTIGO ORIGINAL

Estudo da dinâmica das águas subterrâneas usando tecnologias geoespaciais e hidrofísica em algumas áreas costeiras de Cuba

Study of groundwater dynamics using geospatial technologies and hydrophysics in some coastal areas of Cuba

García, P. P. L.^{1,3}; Chaves, J. M.¹; Batista, G. L. E²; Iribarren, M. J.¹ e Santos R. L.¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Meio Ambiente, Departamento de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Feira de Santana-UEFS, Av. Transnordestina, s/n - Feira de Santana, 44036-900, Novo Horizonte – BA.

² Empresa de Investigación y Proyectos Hidráulicos La Habana, Virtudes, 680 esq. Belascoain, Havana, Cuba.

³ Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba-UNAICC, Calle Humboldt, 104, Esq. Infanta, Vedado, Plaza da Revolución, 10400, Habana, Cuba.

*e-mail: pedroluis1664@gmail.com

Resumo: O estudo da dinâmica das águas subterrâneas é um grande desafio para a comunidade científica, no objetivo de garantir o uso adequado deste essencial recurso natural para manter a vida em nosso planeta. Aqui propomos implementar um sistema de informação geográfica (SIG) e um banco de dados (BD), para monitorar e controlar a gestão sustentável das águas subterrâneas, nas regiões costeiras de Havana, Artemisa e Mayabeque em Cuba. A aplicação das tecnologias geoespaciais são fundamentais na gestão de recursos hídricos, permitindo a integração e a análises de dados complexos para a tomada de decisões. Destacamos o caráter interdisciplinar da proposta que incluem a geomática, o sensoriamento remoto, a hidrologia e a gestão ambiental. A futura implementação desta nova proposta representará um avanço significativo na gestão e gerenciamento dos recursos hídricos, oferecendo ferramentas tecnológicas e científicas que aumentam a eficiência, a precisão e a sustentabilidade no uso desses recursos vitais para a comunidade.

Palavras-Chaves: sistema de informação geográfica (SIG); recursos hídricos; águas subterrâneas.

Abstract: The study of groundwater dynamics is a major challenge for the scientific community, with the aim of ensuring the correct use of this essential natural resource for sustaining life on our planet. Here we propose to implement a geographic information system (GIS) and a database (DB) to monitor and control the sustainable management of groundwater in the coastal regions of Havana, Artemisa and Mayabeque in Cuba. The application of geospatial technologies is fundamental in water resource management, allowing the integration and analysis of complex data for decision-making. We highlight the interdisciplinary nature of the proposal, which includes geomatics, remote sensing, hydrology and environmental management. The future implementation of this new proposal will represent a significant advance in the management and administration of water resources, offering technological and scientific tools that increase efficiency, precision and sustainability in the use of these vital resources for the community.

Keywords: geographic information system (GIS); water resources; groundwater dynamics.

1. Introdução

No contexto da gestão sustentável dos recursos hídricos e da preservação ambiental, o uso de tecnologias de informações geoespaciais é uma ferramenta fundamental. Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) e os bancos de dados espaciais oferecem a capacidade de integrar e analisar dados complexos relacionados à distribuição e à qualidade da água, permitindo a tomada de decisões informadas e eficientes no gerenciamento desses recursos vitais. A evolução e a convergência de disciplinas como geomática, sensoriamento remoto, hidrologia e gestão ambiental levaram ao desenvolvimento de metodologias interdisciplinares para enfrentar os desafios associados à gestão de águas subterrâneas e à prevenção da intrusão salina em zonas costeiras. Essa abordagem integrativa busca não apenas compreender os aspectos técnicos e científicos dos sistemas hídricos, mas também considerar as dimensões socioeconômicas e ambientais que influenciam sua dinâmica e gestão.

De acordo com estudos recentes (Rodríguez et al., 2020), os SIGs passaram por uma transformação significativa em sua capacidade de analisar e visualizar dados espaciais em tempo real, tornando-os ferramentas estratégicas para a tomada de decisões no campo da gestão da água. Além disso, a colaboração e o compartilhamento de informações entre entidades governamentais, instituições acadêmicas e partes interessadas locais são fundamentais para o sucesso dessas iniciativas (Pérez & Gómez, 2019).

Recebido: 15/06/2024

Aceito: 11/07/2024

Publicado: 31/07/2024



Copyright: © 2024 Este trabalho está licenciado sob uma licença Creative Commons Attribution (CC BY) license

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

O principal objetivo deste artigo é analisar e documentar o processo de implementação de um Sistema de Informações Geográficas e de um Banco de Dados (BD), especificamente projetados para fortalecer a gestão e o gerenciamento sustentável das águas subterrâneas e evitar a intrusão salina nas províncias de Havana, Artemisa e Mayabeque. Serão abordados aspectos técnicos, metodológicos e socioeconômicos, bem como os desafios e as oportunidades decorrentes dessa iniciativa interdisciplinar.

2. Princípios Físicos da lei de Darcy

Na dinâmica de fluidos um dos conceitos mais importantes para determinar os diferentes regimes de escoamento é o conhecido número de Reynolds (R_e) (Cengel, e Cimbala., 2015). Este pode definir-se como sendo a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas do fluido. Se considerarmos um fluido com uma velocidade média (V_m), com viscosidade dinâmica (μ) e densidade (ρ), escoando por um conduto de diâmetro D , o número de Reynolds pode ser escrito como,

$$R_e = \rho V_m D / \mu \quad (1)$$

onde, ρ é a densidade do fluido em (kg m^{-3}); V_m é a velocidade média de escoamento em (m s^{-1}); D é o diâmetro interno do tubo em (m) e μ é a viscosidade dinâmica do fluido em (Pa s ou $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$).

A lei de Darcy é válida para escoamentos laminares, ou seja, na faixa: $1 < R_e < 10$ (faixa normalmente adequada para estudos de reservatórios), por exemplo para escoamentos viscosos dentro de um meio poroso, ou seja, quando o fluido se move de forma suave e ordenada, sem turbulências. Além disso, a lei é válida para meios porosos homogêneos e isotrópicos, ou seja, que possuem as mesmas propriedades em todas as direções. Logo, maiores resistências ao escoamento são provenientes de fluidos mais viscosos, aonde uma permeabilidade igual a zero, significaria uma resistência infinita. Também podemos afirmar que a lei de Darcy é uns dos princípios físicos fundamentais da hidrodinâmica que descreve o fluxo de fluidos através de meios porosos. Ela é muito importante para compreendermos os fenômenos na área da hidrologia subterrânea.

A lei foi formulada por *Henry Darcy* apoiado nos resultados de experimentos, publicado em 1856 sobre o fluxo de água através de leitos de areia. Constitui também a base científica da permeabilidade de fluidos utilizados em ciências da terra. Os meios porosos são constituídos por uma matriz porosa composta por uma fase sólida e estacionária e preenchida por uma fase gás ou líquida ou ambas. A resistência ao escoamento dos líquidos pode ser representada pelo coeficiente de permeabilidade, que é uma medida da capacidade do meio de permitir o fluxo do fluido. Quanto maior o coeficiente de permeabilidade, menor a resistência e maior o fluxo através dos poros.

Na Figura 1, ilustramos um diagrama esquemático do princípio Físico da Lei de Darcy. Nele podemos observar um aparato experimental composto por um cilindro de seção transversal A que é preenchido com areia, tamponado em cada extremidade e equipado com tubos de entrada e saída do fluxo de água e um par de manômetros. A água é introduzida no cilindro e deixada fluir através dele até o momento em que todos os poros estão preenchidos por água e a taxa de entrada de fluxo Q (vazão) é igual à taxa de fluxo de saída. Escolhendo um *datum* arbitrário na elevação $z = 0$, as medidas dos manômetros são P_1 e P_2 para z_1 e z_2 , respectivamente e as elevações dos níveis de fluido são h_1 e h_2 .

A distância entre as tomadas do manômetro é Δl , como bem podem ser vistos na mesma figura 1. O fluxo de Darcy q ou vazão específica através do cilindro, define-se como:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

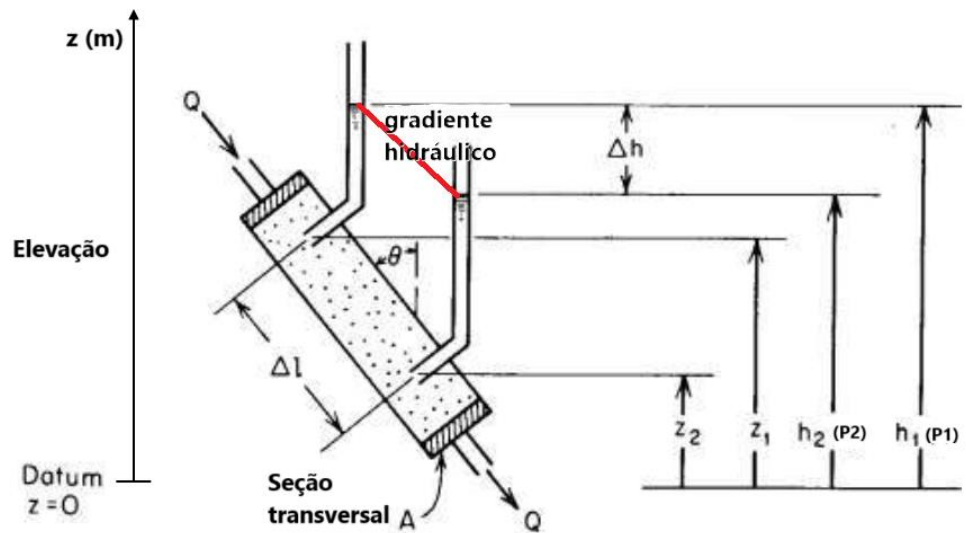


Figura 1. Diagrama esquemático do princípio Físico da Lei de Darcy.

De acordo com as experiências de Darcy o fluxo do fluido ou vazão específica por unidade de área é diretamente proporcional à queda de pressão ($\Delta P = P_2 - P_1$) e ($\Delta h = h_2 - h_1$), quando Δl é mantido constante e inversamente proporcional à Δl e a viscosidade dinâmica do fluido μ , quando Δh é mantido constante, matematicamente expressa pela seguinte equação (Filho, J. M., 1997)

$$q = -K/\mu \frac{\Delta P}{\Delta l} \quad (3)$$

aqui ΔP e Δh são chamados de carga hidráulica, $\frac{\Delta P}{\Delta l}$ ou $\frac{\Delta h}{\Delta l}$ são o conhecido gradiente hidráulico (na figura 1 é ilustrada como sendo a tangente da curva em vermelho) e, K é uma constante de proporcionalidade, chamada de condutividade ou permeabilidade hidráulica. A lei estabelece uma relação entre a velocidade do fluxo, a área de seção transversal do meio poroso, as diferenças de pressão e as propriedades do fluido em questão. O gradiente hidráulico pode ser interpretado como a variação de pressão em relação à distância. Outra alternativa de escrevermos a Lei de Darcy, em função do é o fluxo volumétrico do fluido (Q), pode ser obtida pela substituição da Eq. (2) na Eq. (2), isto é:

$$Q = -K/\mu A \frac{\Delta P}{\Delta l} \quad (4)$$

Ou mais compactada como,

$$Q = -K/\mu iA \quad (5)$$

onde i representa o gradiente hidráulico, e A é a área de seção transversal do meio poroso, por exemplo um aquífero.

Esta lei é amplamente utilizada em diversas áreas, na engenharia civil, por exemplo, é utilizada para estudar o fluxo de água em solos e rochas, auxiliando no projeto de sistemas de drenagem e na prevenção de problemas como erosão e instabilidade das contenções de taludes. Na indústria petrolífera, a lei é fundamental para entender o fluxo de óleo e gás em reservatórios subterrâneos, auxiliando na exploração e produção de petróleo. Como mencionado anteriormente, a Lei de Darcy é amplamente aplicada na hidrogeologia, que estuda a distribuição e o movimento da água subterrânea. Ela é utilizada para determinar

a vazão de poços, a recarga de aquíferos e a contaminação de águas subterrâneas por poluentes. Também é utilizada em estudos de filtração, como a purificação de água em estações de tratamento e a remoção de contaminantes em solos.

3. Métodos e Materiais

Na Figura 2, mostramos a zona de estudo sobre uma área de aproximadamente 700 km² localizada entre as províncias de Mayabeque e Artemisa, na região costeira sudoeste de Havana, Cuba. Essa área, conhecida como Bacia Sul, é de grande importância estratégica, pois constitui uma fonte crucial de água subterrânea e abastecimento de água para a cidade de Havana, representa uns significativos 17,3% do volume total de abastecimento de água para a capital.

As coordenadas do plano retangular da área são X= (335 750; 365 150) e Y= (315 150; 340 150), colocando-a em uma posição geográfica estratégica que a torna um ponto focal para o estudo e a gestão dos recursos hídricos, especialmente no que diz respeito ao controle da intrusão salina e à gestão sustentável das águas subterrâneas.

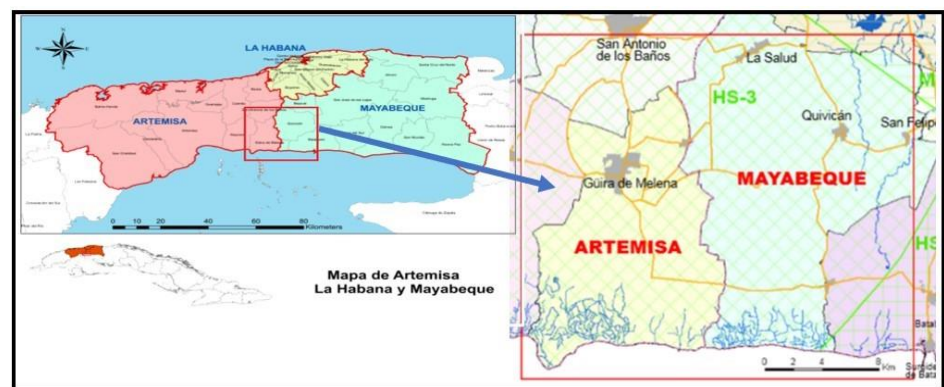


Figura 2. Mapa da zona de estudo sobre uma área de aproximadamente 700 km² localizada entre as províncias de Mayabeque e Artemisa, na região costeira sudoeste de Havana, Cuba.

O primeiro passo para implementar o SIGs e o BD para monitorar e controlar a gestão sustentável das águas subterrâneas, foi justamente a criação de um banco de dados geoespacial no *Microsoft Access*. O uso desta ferramenta se justifica devido à sua capacidade de gerenciar grandes volumes de dados e à sua interoperabilidade com outras ferramentas Informáticas, e assim facilitar à entrada, a edição e a visualização de dados pelos usuários. Isto incluiu a criação de tabelas, campos e chaves primárias/estrangeiras. Também foram criados, relatórios, macros e módulos, para garantir a apresentação integrada e a consistência dos dados, projetados de forma intuitiva e ergonômica. Na Figura 3, podemos ver um exemplo de tabela do BD dos poços pertencentes à rede de amostragem hidroquímica vertical da bacia Sul e na Figura 4, os seus correspondentes formulários.

O seguinte passo foi a montagem da base cartográfica temática para conexão com o banco de dados alfanumérico. Esta base cartográfica temática é um processo crucial na integração de informações geoespaciais com dados alfanuméricos. Esse processo envolve a atribuição de atributos a elementos cartográficos, o ajuste de escalas e a garantia do posicionamento espacial adequado dos dados. O planejamento cuidadoso do banco de dados alfanumérico é essencial para garantir a eficiência na recuperação e no armazenamento de informações, evitando redundâncias e otimizando a representação dos dados de acordo com o problema em questão.

Municipios	Sigla	Cuenca	Pozos	X	Y	Cota	MHV	Profundidad
Alquízar	ALB-38	H5-3	Molino de Viento	337800	327800	5,22	SI	38
Alquízar	HSC-514A	H5-3	Granja Avícola	338750	331100	16,49	SI	88
Alquízar	TS-122	H5-3	La Juanilla	336400	325100	4,88	SI	49
Guira de Melena	HSC-542	H5-3	Sotolongo Diaz	351000	326800	10,86	SI	55
Guira de Melena	HSC-545	H5-3	Santa Ana	350700	322550	4,9	SI	40
Guira de Melena	HSC-546	H5-3	Alvaro Barba	349200	320700	1,87	SI	34
Guira de Melena	HSC-539	H5-3	Fajardo	351600	322750	32,18	SI	62
Guira de Melena	HSC-525	H5-3	El Junco	343180	324370	5,04	SI	41
Guira de Melena	HSC-523	H5-3	Rancherita	345625	333200	20,1	SI	75
Guira de Melena	HSC-530	H5-3	Amaros	348750	332500	23,53	SI	90
Guira de Melena	C-10	H5-3	Morenita	347300	322300	1,97	SI	37
Guira de Melena	C-9	H5-3	Boca de Cajío	349130	322000	1,56	SI	31
Guira de Melena	C-18	H5-3	Playa Cajío	349430	317900		SI	23
Guira de Melena	C-8	H5-3	Pozo Cala B	351940	321360	1,71	SI	19
Guira de Melena	TS-125	H5-3	L. Dimitrova	347400	326610	8,58	SI	53
Guira de Melena	TS-45	H5-3	Arboles Frutales	344200	328300	11,27	SI	70
Guira de Melena	HSC-543	H5-3	Seguí	350600	324250	7,49	SI	25

Figura 3. Banco de dados dos poços pertencentes à rede de amostragem hidroquímica vertical (MHV) da Bacia Sul.

Hydrological Observing Stations of Groundwater

Provincia: Artemisa | GEOGOS: GCS_North_American1 | Observed element: Profundidad del nivel d | Type well: Manual station

Municipality: Alquízar | Latitude: | Longitude: | Instrument: Sonda de contacto ekt | Diameter: |

Hydrographic basin: 0 | PROJCS: NAD 1927 Cuba Norte | Recording station: | Depth: |

Groundwater basin: HG-9 | Sequence: | x: 334700 | Program observat: Mensual | Present d: |

Code: HG-16 | y: 331750 | Operator: EAHMy | Plug: |

Name: Bejirano | VERTOS: MEL_height | Observer: | Reference: |

Classification: De aguas subterráneas | Elevation point me: | Inspections: | Seal or gr: |

Category network: Basica | Elevation ground: 23.38 | Open station: | Strainer or: |

Observing: | Debris sur: |

Maintenance: Ninguno | Paint: |

Label: |

Maintenan: |

Date	Time	Depth water	Temperature
2015-01-28	10:00	22.25	0.0
2014-12-28	10:00	22.23	0.0

Figura 4: Exemplo de formulário no *Microsoft Access*.

O banco de dados alfanumérico exige um planejamento meticuloso para determinar a estrutura ideal para a integração significativa das informações. De acordo com os pesquisadores Navathe e Elmasri (2011), o planejamento do banco de dados é um processo fundamental que influencia diretamente a capacidade de recuperação e o armazenamento eficientes das informações. Nesse sentido, é necessário considerar o número de tabelas a serem criadas de acordo com as informações disponíveis, bem como a determinação do número de campos por tabela e a avaliação dos dados contidos nelas. Isso implica analisar os atributos representativos de cada tabela e evitar redundâncias que possam afetar a integridade das informações (Codd, 1970). O desenho das tabelas no modelo de banco de dados deve ser cuidadoso para garantir a consistência e a eficiência no gerenciamento de informações. Tabelas separadas são criadas para armazenar informações sobre diferentes tópicos, garantindo que a relação entre as tabelas seja significativa e permita a integração de dados de forma coerente e eficiente (Esri, 2020). É importante destacar que a análise dos atributos de cada tabela foi exaustiva, selecionando aqueles que são representativos do problema apresentado e que permitem uma análise abrangente das informações geoespaciais e alfanuméricas (Navathe & Elmasri, 2011).

Após as análises das informações existentes, o banco de dados e as camadas temáticas do SIGs foram projetados. Isso envolveu a atualização e o processamento das informações, o georreferenciamento dos dados, a vetorização das informações geoespaciais, a limpeza topológica e o controle e a correção de arquivos. Esses processos são essenciais para garantir a qualidade e a precisão da cartografia digital gerada (Esri, 2020). A tabela 1 a seguir foi

elaborada para o conteúdo das informações para a criação da base do SIGs e dos mapas temáticos:

Tabela 1 - Conteúdo da base de informações e dos mapas temáticos.

Coleta de dados		Criação do mapa base	Criação do mapa temático
Condições sociais	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Limites administrativos <input type="checkbox"/> Estatísticas da população <input type="checkbox"/> Ruas e ferrovias <input type="checkbox"/> Setores <input type="checkbox"/> Uso da terra <input type="checkbox"/> Irrigação e terras aráveis 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Limites administrativos <input type="checkbox"/> Mapa de ruas e ferrovias <input type="checkbox"/> Mapa de densidade populacional <input type="checkbox"/> Uso da terra 	
Condições naturais	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Mapa topográfico <input type="checkbox"/> Dados DEM (modelo de elevação digital) <input type="checkbox"/> Geologia (estratos e estrutura geológica) <input type="checkbox"/> Classificação do solo <input type="checkbox"/> Hidrologia (cursos d'água/escoamento, volume de armazenamento dos reservatórios) <input type="checkbox"/> Localização das estações 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Mapa de elevação topográfica <input type="checkbox"/> Mapa geológico <input type="checkbox"/> Mapa de classificação do solo <input type="checkbox"/> Mapa de distribuição de rios 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Distribuição de chuvas (contorno e área de Thiessen)
	hidrológicas e precipitação (mensal, nos últimos 10 anos)		

<p>Águas subterrâneas</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Relatório/documento/mapa hidrogeológico <input type="checkbox"/> Bacia de águas subterrâneas <input type="checkbox"/> Classificação dos aquíferos <input type="checkbox"/> Nível de água subterrânea (mensal, nos últimos 10 anos) <input type="checkbox"/> Qualidade da água subterrânea (mensalmente, nos últimos 10 anos) <input type="checkbox"/> Qualidade da água subterrânea por profundidade (mensalmente, nos últimos 10 anos) <input type="checkbox"/> Inventário de poços <ul style="list-style-type: none"> - Registros de sondagem / Colunas geológicas - Coordenadas - Limites administrativos - Profundidade - Nível de água estático - Volume de descarga - Nível de descarga - Profundidade da peneira - Dados do teste de bombeamento - Condutividade hidráulica - Transmissividade - Coeficiente de armazenamento - Qualidade da água subterrânea 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Mapa de distribuição dos poços de observação <input type="checkbox"/> Divisão de bacias hidrográficas <input type="checkbox"/> Mapa de classificação de aquíferos <input type="checkbox"/> Mapa hidrogeológico <input type="checkbox"/> Instalações de abastecimento de água 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Capacidade específica <input type="checkbox"/> Transmissividade <input type="checkbox"/> Sólidos solúveis totais em águas subterrâneas <input type="checkbox"/> Condutividade elétrica da água subterrânea (CE) <input type="checkbox"/> Mapa com linhas de contorno de águas subterrâneas <input type="checkbox"/> Distribuição de diferentes tipos de qualidade da água
<p>Uso da água</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Dados sobre os poços operacionais existentes (para as estações chuvosa e seca) <input type="checkbox"/> Condições de uso da água subterrânea para consumo humano e agricultura <input type="checkbox"/> Volume de entrada <input type="checkbox"/> Índice de consumo <input type="checkbox"/> Dados do sistema de gerenciamento e monitoramento de águas subterrâneas 		<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Mapa de uso da água

As análises detalhadas dos conteúdos das informações e seu processamento adequado são elementos fundamentais para o desenvolvimento de um GIS. A integração de dados geoespaciais e alfanuméricos, juntamente com a criação de mapas básicos e temáticos, possibilita a geração de análises significativas para a tomada de decisões em vários campos, como o gerenciamento de recursos hídricos e de terras.

3. Resultados e Discussões

O desenvolvimento e a implementação do SIGs e do BD produziram resultados significativos em termos científicos-técnicos, econômicos e sociais. Os mapas e o banco de dados gerados permitiram as análises e previsões eficientes e rápidas sobre uma variedade de tópicos. A implementação do sistema provou ser uma ferramenta fundamental para armazenar, gerenciar, consultar, recuperar, validar, exportar, atualizar, analisar, monitorar, controlar, supervisionar e georreferenciar informações em um tempo reduzido, resultando em maior produtividade e qualidade do trabalho. Para a implementação do SIGs foram implementadas as seguintes ações:

1. Coleta de Dados: Utilizar informações geoespaciais para obtenção de dados topográficos e geológicos da área de estudo.
2. Modelação Hidrogeológica: Integrar dados de permeabilidade do solo (k) no SIG para representar a distribuição espacial da permeabilidade no aquífero.
3. Simulação de Fluxo: Aplicar a fórmula de Darcy no SIG para simular o fluxo de água subterrânea no aquífero, considerando variáveis como recarga de água e extração de bombeamento.
4. Análise de Intrusão Salina: Utilize o modelo de fluxo para prever a intrusão salina no aquífero, considerando a influência de fatores como o nível do mar e a extração excessiva de água doce.
5. Validação e calibração: Verifique e ajuste o modelo de fluxo usando dados observados, como níveis de água e concentrações de salinidade, para garantir a precisão e confiabilidade do modelo.
6. Cenários de Gestão: Utilizar o modelo calibrado para desenvolver cenários de gestão, como a implementação de poços de extração estratégicos ou a regulação da extração de água, e avaliar o seu impacto na intrusão salina e na gestão sustentável do aquífero.
7. Monitoramento Contínuo: Integrar dados em tempo real de sensores e estações de monitoramento ao GIS para atualizar e melhorar constantemente o modelo de fluxo e a gestão dos recursos hídricos.
8. Interpretação dos Resultados: Análise dos mapas gerados para identificar áreas críticas, possíveis pontos de intrusão salina e avaliar a eficácia das medidas preventivas ou de gestão propostas.

Como resultado destas implementações podemos ver na Figura 5 o mapa do e contornos dos níveis de água e do fluxo de água subterrânea, através das linhas de fluxo, nas regiões costeiras de Havana, Artemisa e Mayabeque em Cuba. Isto fornece uma ferramenta visual chave para a tomada de decisões na gestão sustentável das águas subterrâneas.

Esta abordagem física no contexto de um SIG fortalece a capacidade das autoridades para tomar decisões e estratégias na gestão das águas subterrâneas e combina a robustez científica dos modelos hidrogeológicos com a capacidade analítica e de visualização do SIG, fornecendo uma ferramenta abrangente para a gestão sustentável da água nas regiões de estudo.

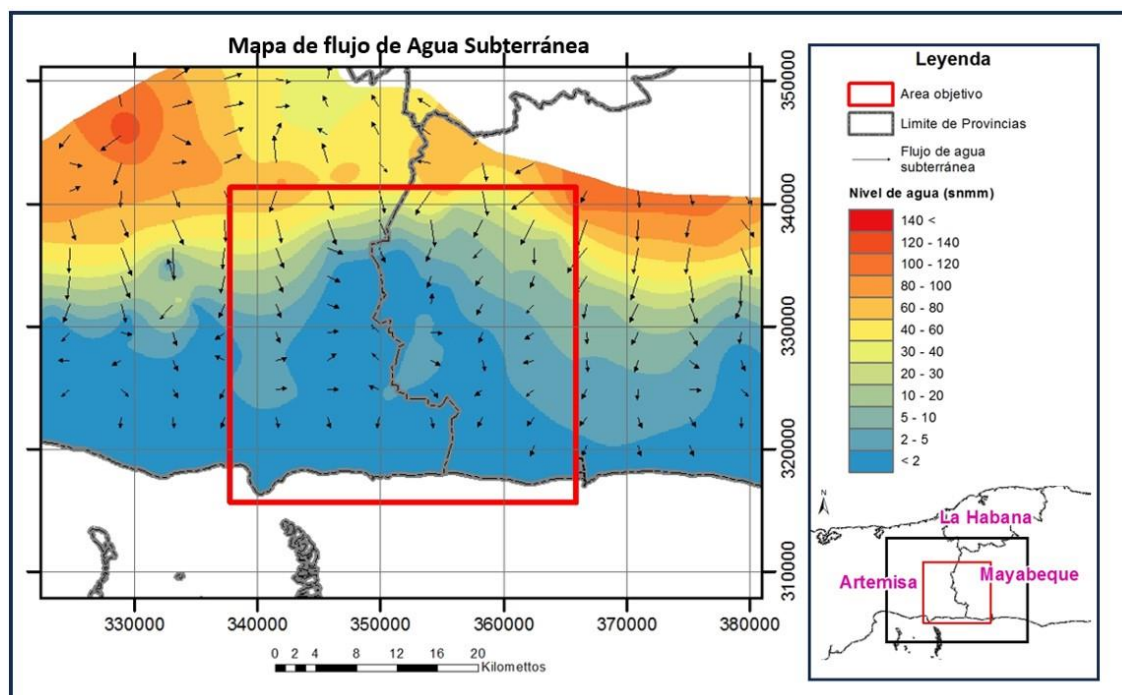


Figura 5: Mapa de fluxo de águas subterrâneas.

Foram criados os seguintes bancos de dados para serem integrados ao SIGs,

- banco de dados exclusivo em Access que integra informações sobre poços, rede hidrográfica, estradas, pontos povoados, entre outros.
- banco de dados compartilhado entre os escritórios da EAH Mayabeque, EAH-Artemisa e EIPH-Habana para melhorar a colaboração e o gerenciamento de informações.

Também foi estabelecida uma rede subterrânea básica e uma rede de furos de sondagem mensais, incluindo áreas baixas e assentamentos. Os mapas temáticos criados foram,

- Mapa da rede hidrográfica, estradas e áreas povoadas.
- Mapa de contorno do nível da água.
- Mapa de localização dos poços.
- Mapa hidrológico.
- Mapa do solo.
- Mapa de imagem digital do terreno.
- Mapa de bacias de superfície.
- Mapa de diferença de nível de água.

Os resultados obtidos após a implementação do projeto demonstram a utilidade e a eficácia do Sistema de Informações Geográficas e do banco de dados desenvolvidos. A criação desse banco de dados exclusivo facilitou o acesso e o gerenciamento de informações relacionadas aos recursos hídricos e a outros aspectos geográficos da região estudada. Os mapas temáticos gerados fornecem uma representação visual clara e detalhada das informações, permitindo uma análise mais aprofundada e a tomada de decisões fundamentadas no gerenciamento de recursos naturais e no planejamento territorial.

Nas Figuras 6 e 7 mostramos os mapas topográficos e hidrológicos da região de estudo, e os mapas dos níveis de água subterrânea na da região de estudo, usando a proposta apresentada neste trabalho de integração de banco de dados e SIGs.

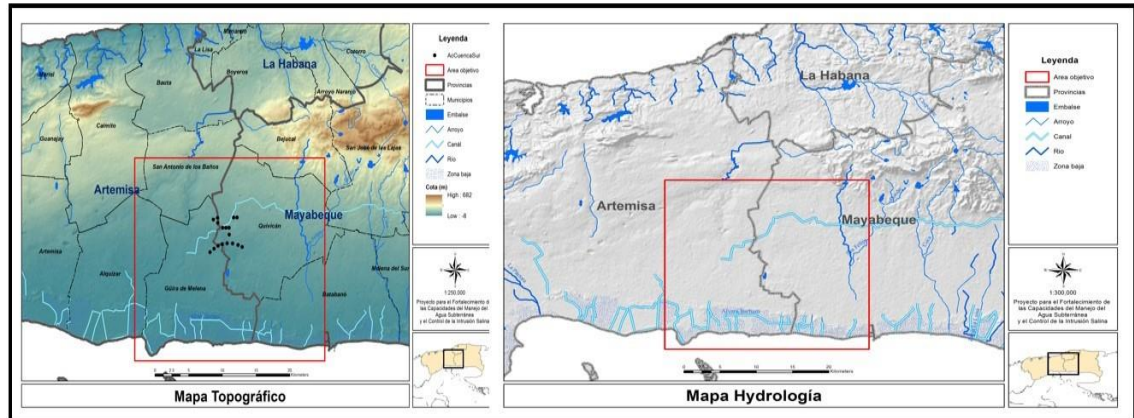


Figura 6: Mapas topográficos e hidrológicos da região de estudo.

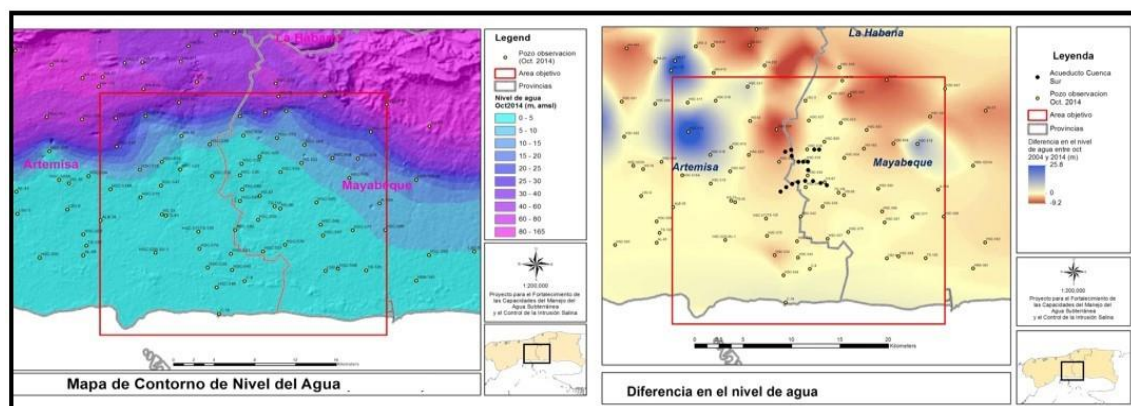


Figura 7: Mapas dos níveis de água subterrânea na da região de estudo.

5. Conclusões

Foi apresentada uma proposta computacional que integra Sistemas de Informação Geográfica e Bancos de Dados, com o objetivo de gerenciar dados geospaciais de forma mais eficiente e precisa, facilitando a criação, o armazenamento, gerenciamento e a atualização de dados relacionados à gestão de águas subterrâneas e ao controle de intrusão salina, nas regiões costeiras de Havana, Artemisa e Mayabeque em Cuba. Esta nova proposta representa um avanço tecnológico e científico significativo. Vários mapas topográficos e hidrológicos e de níveis de água subterrânea na da região de estudo. A implementação do projeto GIS/DB na Bacia Sul representou um avanço significativo na gestão e no gerenciamento dos recursos hídricos, oferecendo ferramentas tecnológicas e científicas que aumentam a eficiência, a precisão e a sustentabilidade no uso desses recursos vitais para a comunidade. E pode ser usada como uma ferramenta fundamental para melhorar o gerenciamento dos recursos hídricos e enfrentar os desafios associados à sua gestão em um contexto de mudanças climáticas.

Referências

- Cengel, Y. A., and J. M. Cimbala. "Mecânica dos Fluidos: fundamentos e aplicações. 3° ed." Porto Alegre: AMGH (2015).
 Filho, J M. Hidrogeologia: conceitos e aplicações." Fortaleza, CPRM, LABHID-Universidade Federal de Pernambuco (1997).

- Codd, E. F. (1970). A relational model of data for large shared data banks (Um modelo relacional de dados para grandes bancos de dados compartilhados). *Communications of the ACM*, 13(6), 377-387.
- Coppock, J. T., & Rhind, D. W. (1991). The history of GIS (A história do GIS). Em D. J. Maguire, M. F. Goodchild, & D. W. Rhind (Eds.), *Geographical Information Systems: Principles and Applications* (pp. 21-43). Longman Scientific & Technical.
- Esri (2020). ArcGIS Desktop: Criar um banco de dados no Microsoft Access. Recuperado de <https://desktop.arcgis.com/>
- ESRI (2021). Sobre o ArcGIS. Recuperado de <https://www.esri.com/enus/arcgis/about-arcgis/overview>
- Fariñas, J. I., & Santos, C. (2005). Desenvolvimento de sistemas de informação geográfica em Cuba: Experiência do grupo empresarial GEOCUBA. *Revista Cubana de Geografía*, 30(2), 95-112.
- Foresman, T. W. (1998). The history of geographic information systems (A história dos sistemas de informações geográficas): Perspectives from the pioneers (Perspectivas dos pioneiros). Prentice Hall.
- Goodchild, M. F., & Janelle, D. G. (2010). The history of geographical information systems: Perspectives from the pioneers (Perspectivas dos pioneiros). Routledge.
- Kuhn, W. (2016). Introduction to thematic cartography (Introdução à cartografia temática). Routledge.
- Liu, Y., et al. (2019). Aplicações de GIS na gestão de desastres: uma revisão. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(7), 310.
- Navathe, S. B., & Elmasri, R. (2011). *Fundamentals of database systems* (Fundamentos dos sistemas de banco de dados). Pearson Education India.
- Pérez, J., & Gómez, L. (2019). Desafios na adoção de tecnologias geoespaciais na América Latina. *Revista Latino-Americana de Geoinformação*, 7(1), 23-38.
- Rodríguez, A., Pérez, M., & Gómez, R. (2020). Advances in Geographic Information Systems for natural resource management (Avanços em sistemas de informação geográfica para gestão de recursos naturais). *Journal of Applied Geomatics*, 15(2), 45-60.

Isenção de responsabilidade/Nota do editor: As declarações, opiniões e dados contidos em todas as publicações são exclusivamente de responsabilidade do(s) autor(es) e colaborador(es) individual(is) e não do Caderno de Física da UEFS e/ou do(s) editor(es). O Caderno de Física da UEFS e/ou do(s) editor(es) isentam-se de responsabilidade por qualquer dano a pessoas ou propriedades resultante de quaisquer ideias, métodos, instruções ou produtos mencionados no conteúdo.