

# Open Source GIS tools for local administrations: pursuing the economic sustainability of Solid Waste Management in low-income countries<sup>1</sup>

## Sommario

*La maggioranza delle decisioni ambientali non sono fatte da scienziati, ma da coloro che risiedono in un luogo. La nostra sfida è trovare strumenti e modi per combinare la competenza scientifica con l'esperienza e la conoscenza locale, per intraprendere strade migliori e più sostenibili nella gestione delle risorse naturali, e migliorare le condizioni delle popolazioni.*

*Simon Maddocks*

L'importanza della gestione dei rifiuti è largamente riconosciuta in letteratura, date le sue conseguenze in termini di igiene pubblica e impatti ambientali. Queste conseguenze diventano particolarmente rilevanti quando guardiamo ai paesi a basso reddito, dove la gestione dei rifiuti spesso manca di soddisfare i basilari requisiti di sicurezza e tutela dell'ambiente. L'importanza della gestione dei rifiuti traspare anche dagli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite, perché molti degli indicatori enunciati includono risultati che dipendono fortemente da sostanziali miglioramenti in questo settore.

Da un punto di vista tecnico, la gestione dei rifiuti è scomponibile in diverse fasi: la generazione del rifiuto stesso, la raccolta, il trasferimento del rifiuto agli impianti di trattamento o di disposizione finale, gli impianti di trattamento e la loro conduzione, la gestione del residuo finale attraverso discariche sanitarie o termovalorizzazione.

Nei paesi a basso e medio-basso reddito, la raccolta e il trasferimento dei rifiuti sono generalmente gestiti dai Comuni o dalle autorità locali, sui bilanci dei quali pesano in maniera rilevante. In confronto con i paesi a reddito alto o medio-alto, infatti, le fasi di trattamento e disposizione corretta in discariche protette sono spesso trascurate, e lo sforzo maggiore è incentrato sull'eliminazione dei rifiuti dai centri urbani.

I costi di raccolta e trasferimento includono il costo del carburante e del personale, le spese amministrative, la manutenzione e i costi di investimento quando i veicoli o in generale l'equipaggiamento necessita di essere riparato o sostituito. L'ottimizzazione delle fasi di raccolta e trasferimento, come discusso da diversi autori in letteratura, può avere un impatto positivo sulla riduzione dei costi.

Il primo passo nell'implementazione di qualsiasi azione, comunque, è la comprensione della situazione attuale. Questo passo può essere molto difficile, e richiedere molto tempo, a causa della cronica mancanza di dati che affligge le aree a basso e medio-basso reddito. Da un punto di vista tecnico, per esempio, una stima realistica della produzione e della composizione del rifiuto rappresenta il primo ostacolo. La stessa organizzazione della raccolta dei rifiuti può risultare di difficile comprensione, richiedendo ad esempio una mappatura dei percorsi e dei punti di raccolta, o la redazione di quadri orari in base a tempistiche spesso incerte. Da un punto di vista economico, il bilancio relativo alla gestione dei rifiuti è spesso accorpato al bilancio collettivo dei Comuni, e le voci di costo non sono chiaramente riconoscibili. Strumenti per il monitoraggio delle spese, come ad esempio il registro dei consumi per ogni veicolo, o l'inventario dei beni, dei mezzi e degli strumenti in dotazione, vengono raramente utilizzati, dimostrando una scarsa propensione in materia gestionale.

Tutti questi aspetti influiscono direttamente sulla possibilità prima di tutto di descrivere correttamente la situazione attuale, e in seconda battuta di comprendere gli effetti di ogni possibile intervento, anche volto al miglioramento della situazione.

Nel mio percorso di ricerca ho sperimentato diverse volte situazioni simili, mentre ero coinvolta nel supporto tecnico di organizzazioni non governative e autorità locali all'interno di progetti per il miglioramento della gestione dei rifiuti. Molti dei progetti di cooperazione allo sviluppo hanno importanti limiti temporali, con durate che variano tra uno e tre anni, e la necessità di dedicare un grosso sforzo nella costruzione di un quadro della situazione attuale spesso porta ad una diminuzione drammatica del tempo da dedicare alla successiva implementazione del progetto, o ad altre attività correlate. D'altra parte, ho avuto anche occasione di vedere decisioni prese in base ad una conoscenza parziale della situazione, sulla spinta dei vincoli temporali. La scelta forzata tra queste due strategie non solo genera frustrazione, ma rischia di influire negativamente sui risultati dei progetti.

Questa è la ragione per cui ho deciso di lavorare ad una strategia che consenta un approccio preliminare allo studio del contesto attraverso dati prontamente disponibili e analisi spaziale su dati geografici. Questa strategia dovrebbe permettere un livello di analisi territoriale tale da supportare (ma non sostituire) gli studi successivi sul contesto locale, allo stesso tempo fornendo al ricercatore o alla ricercatrice uno strumento robusto per indirizzare la raccolta dei dati, e per l'interpretazione dei dati raccolti.

Lo strumento principale che ho deciso di utilizzare per la mia ricerca sono i GIS (Geographical Information Systems), anche conosciuti come Sistemi Informativi Territoriali (SIT). I possibili campi di applicazione dei GIS alla gestione dei rifiuti sono diversi, e spaziano dalla modellazione della produzione dei rifiuti all'ottimizzazione dei percorsi di raccolta.

In particolare, ho sviluppato dei moduli all'interno del software open source QGIS, che ha un Model Builder integrato nell'interfaccia grafica. Il Model Builder consente di concatenare gli algoritmi esistenti e le operazioni desiderate per il raggiungimento del risultato. L'utilizzo di questo strumento, la creazione cioè di moduli, garantisce la ripetibilità della procedura, come richiesto dall'approccio scientifico. L'investimento in termini di tempo richiesto dallo sviluppo dei pacchetti dovrebbe poi essere ripagato dallo svolgimento delle analisi in maniera rapida e efficace.

Dal momento che la generazione dei rifiuti è il punto di partenza per l'organizzazione della gestione dei rifiuti, il primo pacchetto di moduli ha avuto l'obiettivo di simulare la distribuzione della generazione dei rifiuti partendo da informazioni di base sulla popolazione residente e da immagini satellitari. Il secondo pacchetto, partendo dalla distribuzione della produzione così ipotizzata, effettua invece la localizzazione dei punti di raccolta, tenendo in considerazione la distanza dagli edifici, e il reticolo stradale. Il terzo gruppo di moduli invece serve per

<sup>1</sup> Francesca Villa, Ph.D., Dottorato Di Ricerca in Ingegneria Civile, Ambientale, della Cooperazione Internazionale e di Matematica, Metodologie e Tecniche Appropriate nella Cooperazione Internazionale allo Sviluppo, XXXII CICLO, Difesa finale 21 luglio 2020

l'ottimizzazione dei percorsi di raccolta dei rifiuti, tenendo in considerazione l'influenza della pendenza delle strade e delle caratteristiche dei veicoli sul consumo del carburante.

La fonte principale per i dati geografici relativi al reticolo stradale è OpenStreetMap, una mappa generata da una ampia comunità mondiale che contribuisce al suo aggiornamento in maniera volontaria. Proprio per via di questa caratteristica di volontarietà, a seconda delle aree OpenStreetMap può raggiungere un elevato livello di dettaglio o limitarsi a pochi, semplici elementi.

La scelta di QGIS e OpenStreetMap per questa ricerca non è casuale. Infatti, il software libero e open source, così come gli open data, sono stati ipotizzati come strumenti appropriati per lo sviluppo. La prima ragione è l'ovvia mancanza di una barriera di accesso economica, dal momento che nessuna licenza deve essere acquistata per l'utilizzo del software. D'altra parte ci sono altre ragioni, come la possibilità di modificare e condividere liberamente il software, che sono considerate opportunità per quanto riguarda l'incorporamento di elementi culturali, e il superamento della barriera linguistica che caratterizza i software più diffusi per le persone non anglofone.

Le fonti di informazione utilizzate per questa ricerca sono state diverse, a seconda dell'ambito di interesse. Per esempio, un'analisi della letteratura scientifica è stata fatta per tutti gli aspetti alla base della ricerca (i concetti di sostenibilità e tecnologie appropriate, i GIS e l'open source), e per quanto ha riguardato invece gli aspetti spaziali della gestione dei rifiuti. Per quanto riguarda la gestione dei rifiuti nei contesti a basso e medio-basso reddito, oltre alla lettura scientifica ho fatto ricorso anche alla cosiddetta letteratura "grigia", che include le pubblicazioni delle organizzazioni internazionali che si occupano di cooperazione allo sviluppo, così come i report delle autorità locali. Molte informazioni sui GIS e sul software open source sono state trovate online, nei forum degli sviluppatori o dei cultori della materia, una comunità scientifica molto attiva e viva, che utilizza il web come principale strumento di discussione. Infine, per quanto riguarda l'analisi dello specifico caso studio presentato, ho fatto ricorso a tutti gli strumenti possibili per raccogliere informazioni, dalla letteratura scientifica e "grigia", alla raccolta di dati sul campo.

I contenuti di questa tesi sono presentati di seguito:

- **“Research background”** contiene l'analisi della letteratura e una discussione sui "pilastri" alla base della ricerca: la gestione dei rifiuti nei contesti a reddito basso e medio-basso, anche considerando gli aspetti economici, i concetti di sostenibilità e tecnologie appropriate, le potenzialità dei GIS e le ragioni dietro alla scelta degli strumenti informatici "open". Alla fine, sono elencati i questi di ricerca.
- **“Materials and methods”** è diviso in tre sezioni:
  - le prime due (“Spatial aspect of SWM” e “GIS and Data”) riassumono i problemi scientifici sottesi alla modellazione spaziale dei sistemi di gestione dei rifiuti. La ricerca intercetta una moltitudine di argomenti, dalla gestione dei rifiuti alla disponibilità dei dati, agli strumenti matematici dietro alle operazioni di analisi delle reti. Per ognuno di questi aspetti una breve analisi della letteratura viene presentata.
  - La sezione relativa alla procedura (“Applied procedure”) rappresenta il vero e proprio cuore della ricerca: si introduce l'ambiente di QGIS, insieme agli strumenti e agli algoritmi utilizzati. Tutti i moduli sono spiegati nel dettaglio, insieme agli ostacoli incontrati nel corso dello sviluppo.
- **“Application”**
  - La procedura è applicata in questa sezione ad un caso studio reale, un progetto attualmente in fase di svolgimento nel distretto di Tiro (Sour o Tyre), in Libano. Il capitolo include una descrizione del contesto, inclusa la fase di raccolta dati, la validazione della procedura stessa e la costruzione di scenari ottimizzati. Infine, nella sezione “Dissemination and appropriateness” viene accennata la progettazione delle attività di sensibilizzazione e formazione che seguiranno il perfezionamento dei moduli sviluppati in GIS, insieme agli strumenti per indagarne l'appropriatezza e l'utilizzabilità.
- **“Conclusion and follow-up”**
  - Questo capitolo sintetizza i risultati dell'applicazione della procedura sviluppata al caso studio, suggerendo i successivi sviluppi.

## Summary

*The vast majority of environmental management decisions are not made by scientists, but by local people. Our challenge is to find ways of combining scientific understanding with fine-grained local knowledge and experience to develop better and more sustainable ways of managing natural resources and improving human livelihoods.*

*Simon Maddocks*

Importance of waste management is widely recognized in the literature, as per its consequences in terms of public hygiene, population health and environmental impacts (UNEP, 2015; UN, 2015). These consequences are relevant especially in low and low-middle income countries, where waste management is usually not responding to safety criteria (UNHABITAT, 2010). The importance of waste management is also visible while analyzing Sustainable Development Goals (SDGs) because results related to improvement in these sectors are embedded in many indicators.

Solid waste management goes through different stages: the generation of the waste itself, the collection, the transfer of the collected waste to treatment facilities, sanitary landfills or dumpsites, the treatment, and the final disposal.

In low and middle-low income countries, collection and transfer are usually managed by Municipalities or local authorities and have a big influence on local budgets. In comparison with middle and high income countries, in fact, proper treatments and sanitary landfilling are not frequent, and the bigger effort is focused on moving the waste from urban areas to dumpsites.

Costs of collection and transfer include fuel cost, labor cost and administrative expenses, and also maintenance and investment costs when vehicles need to be fixed or substituted. The optimization of the collection and transfer can have a positive impact on reducing costs, as discussed by many authors.

The first step in the implementation of any action, anyway, is the assessment of the current situation. This step may be very difficult and time-requiring, because of the chronic lack of data which affect low and middle-low income areas. From the technical point of view, the estimate of waste production is the first obstacle, together with its composition. The organization of the collection can be difficult to understand and requires, for example, the mapping of collection points. From the financial point of view, the budget related to waste collection is often aggregated with the overall budget of the Municipality, and costs items are not recognizable. Tools for the monitoring of expenses, such as logbooks on vehicles to maintain a trace for fuel consumption, are rarely implemented, and this happens also for inventories of existing assets and equipment. These are symptoms of a general lack of competence in financial management.

All these aspects affect directly the possibility to firstly assess the current situation, and secondly, understand the impacts of further actions aimed to improve the situation.

In my research, I experienced several times similar situations while supporting Non Governmental Organizations and local public authorities in projects related to the improvement of the waste management systems. Most of the development projects have relevant time limits, with a duration from one to three years, and the necessity to invest a huge effort in the assessment of the current situation leads to a dramatic erosion of the time available for implementation and other activities. On the other hand, I have seen decisions made with partial knowledge of the local situation, because of time constraints. Besides being frustrating, results of projects may be affected by both the strategies.

This is the reason why I have decided to develop a strategy to approach the first assessment of a case study by getting profit of available data and performing spatial analysis on remote sensing data. This strategy would allow a territorial analysis supporting and not substituting further investigations on the local context, providing the researcher with robust tools to direct field data collection and to interpret properly gathered data.

For this purpose, I decided to use Geographical Information Systems (GIS). The possible fields of application of GIS to waste management are several, ranging from the modeling of waste generation to the optimization of collection routes.

Waste generation is the entry point for waste management, and the distribution of waste generation within urban and rural areas is crucial to organize a proper collection system. So, the first package of tools has been developed to emulate solid waste production given basic information about the resident population and from satellite images, such as the distribution of buildings and their characteristics. The second package of tools was prepared to simulate the disposition of collection points within the study area, taking into account both the disposition of buildings and the road network. The third package of tools was created for the optimization of routes, taking into account the influence of the road gradient on the fuel consumption of light commercial and heavy-duty vehicles.

These tools have been developed in a GIS open source environment, more specifically QGIS. Its embedded Model Builder consents to concatenate existing algorithms and operations on spatial data to reach the result. The use of this tool consents to have a procedure which can be repeated, which is fundamental for a scientific approach. The time investment required while developing the packages of tools will be subsequently paid back with rapid and smooth implementation of the analysis.

The main source for geographical data related to features such as the road network has been OpenStreetMap, a world map generated by a huge community of volunteers around the world which constantly update the map thanks to their knowledge and their efforts. Depending on areas, OpenStreetMap can be very detailed, or just some fundamental features can be available. Nonetheless, it is worth to keep it as a reference, also contributing to its development, as an accessible and peer-reviewed tool.

The choice of both QGIS and OpenStreetMap for the research is not casual. In fact, free open source software and open data may be considered as appropriate instruments for the development. The first reason is the lack of an economic access barrier since no licenses have to be purchased for the use of this software. Besides this evidence, there are other reasons, such as the possibility to modify and share the software, which can be also localized incorporating cultural elements and solving the language gap affecting the usability from non-English speaker users.

Coming to the sources of information for this research, these have been different depending on the sector. For example, a comprehensive literature review has been done to consolidate the research background and for the chapter related to spatial aspects of solid waste management. Here, the main source has been peer-reviewed literature. For what concerns solid waste management aspects in low and

middle-low income countries, I used also grey literature, which includes publications from international agencies following developing projects. Open source and GIS have been analyzed also with abundant use of web sources, such as the forums of developers since the community behind open source is lively and provide continuously active contributions. When coming to case studies analysis, all available instruments for the gathering information have been used, from peer-reviewed and grey literature to data field collection.

Contents of this thesis are presented as follows:

- **“Research background”** contains a review of the literature and a discussion about the pillars behind the research, which are the solid waste management in low-income countries, also considering economic aspects, the concept of sustainability applied to appropriate technologies, the potentiality of GIS and the reason for choosing open tools. Finally, the research questions are presented.
- **“Materials and methods”** is divided into three sections.
  - Spatial aspect of SWM and GIS and Data investigate the the scientific problems behind the spatial modeling of a Solid Waste Management system. The research intercepts a multitude of topics, moving from solid waste management in developing countries to the accessibility of information technology tools. For each of these topics, a short review of the literature will be presented, and their spacial aspects analyzed.
  - The section related to the **“Applied procedure”** is to explain the procedure developed within the research. The QGIS environment is introduced, together with tools and algorithms used. All modules will be explained in details, and issues related to their development presented as well.
- **“Application”**
  - The procedure is applied to a case study, a project currently on-going in the district of Sour, in Lebanon. This chapter includes a description of the context, including the baseline and the efforts and results reached during on-field data collection, the validation of the procedure itself and the construction of optimization scenarios for the case study.
- **“Dissemination and appropriateness”**
  - In this chapter, the design of training activities with the purpose of disseminate the developed procedure are explained, together with the tools (questionnaires, in-depth interviews) to be used to understand the appropriateness of the proposed instrument.
- **“Conclusion and recommendations”**
  - The conclusive chapter synthesizes the results of the application of developed tools to the case study, suggesting further analysis to be done, and possible implementations of the tools.