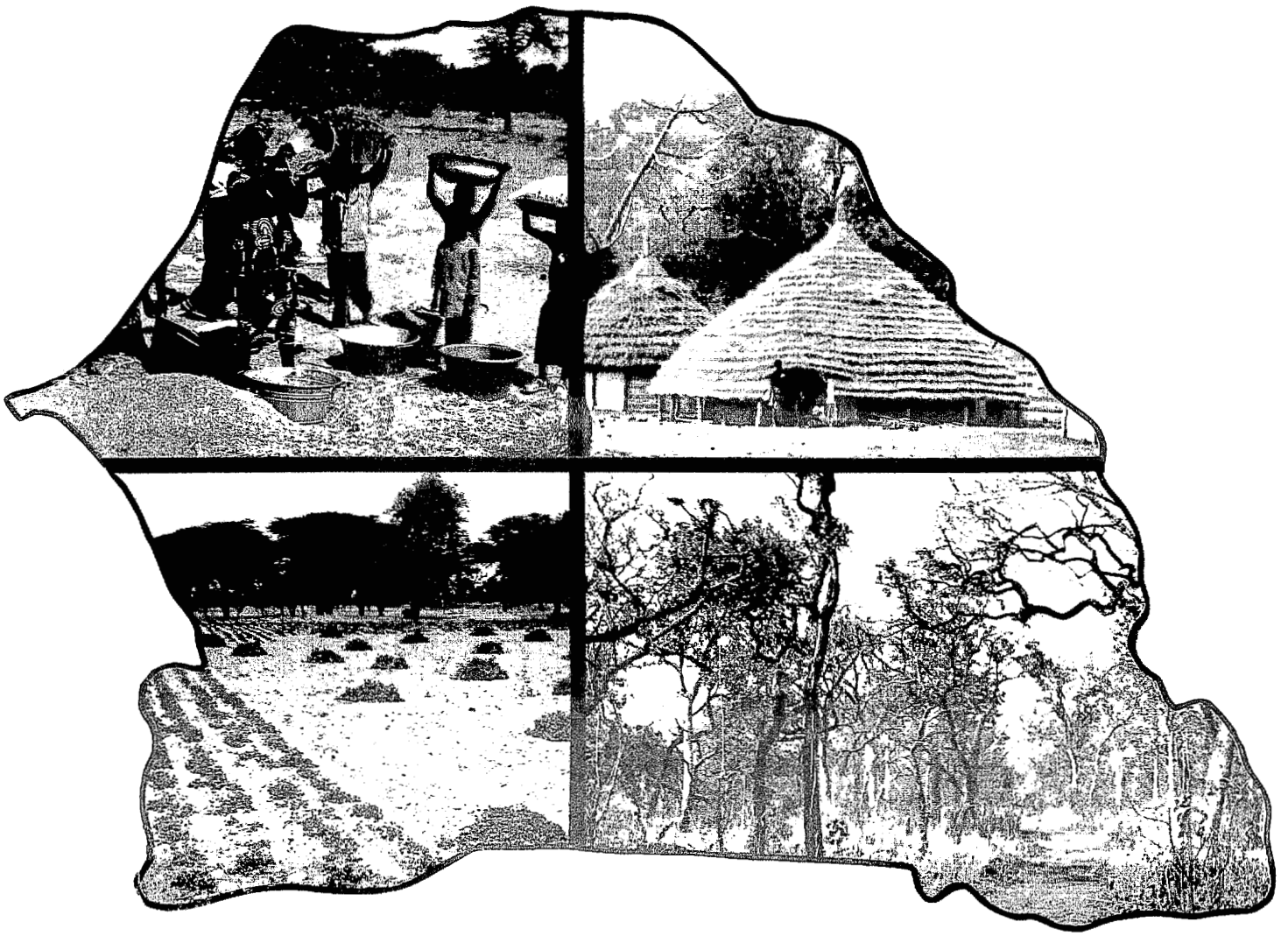
PN-ACB-567

Geographic Modeling of Human Carrying Capacity from Rainfed Agriculture:

Senegal Case Study

Modèle Géographique de la Charge Humaine Alimentable par l'Agriculture Sous Pluie:

Etude Pilote du Sénégal



EROS Data Center
U.S. Geological Survey
Sioux Falls, South Dakota 57198

PN-ACB-567

Technical Report

GEOGRAPHIC MODELING OF HUMAN CARRYING CAPACITY FROM RAINFED AGRICULTURE: SENEGAL CASE STUDY

Prepared under USAID PASA No. AFR-0510-P-IC-7022

Submitted to:

Office of Technical Resources
Bureau for Africa
U.S. Agency for International Development
Washington, D.C.

and

U.S. Agency for International Development
Dakar, Senegal

Submitted from:

EROS Data Center
National Mapping Division
U.S. Geological Survey
Sioux Falls, South Dakota

First Edition: March 1991
Revised Edition: May 1992

GEOGRAPHIC MODELING OF HUMAN CARRYING CAPACITY FROM RAINFED AGRICULTURE: SENEGAL CASE STUDY

Authors:

Donald G. Moore
EROS Data Center - U.S. Geological Survey

G. Gray Tappan, Stephen M. Howard, Ronald W. Lietzow, and C. Andrew Nadeau
EROS Data Center - Hughes STX Corporation

William Renison and Jonathan Olsson
Bureau for Africa - Agency for International Development

Rod Kite
USAID/Senegal - Agency for International Development

(French Translation by Anne Espinasse-Gellner)

NOTICE:

The document is an internal project report and has not been edited or reviewed for conformity with U.S. Geological Survey standards or nomenclature.

Any use of tradenames and/or trademarks in this publication is for descriptive purposes only and does not constitute endorsement by the U.S. Geological Survey.

TABLE OF CONTENTS

page

LIST OF FIGURES AND TABLES iii

EXECUTIVE SUMMARY iv

1.0 Introduction 1

2.0 The Physical, Demographic and Agricultural Setting 2
2.1 Climate 2
2.2 Physiography 3
2.3 Population 3
2.4 Agriculture 4

3.0 Geographic Information System Approach to Resource-Based Analysis of Carrying Capacity 4

4.0 The Model: Estimating Human Carrying Capacity 5

5.0 Data Sources 6
5.1 Natural Resources Data 6
5.1.1 Soils 6
5.1.2 Vegetation 7
5.1.3 Land Use and Land Cover 8
5.1.4 Climate 8
5.2 Demographic Data 8
5.3 Political Division Data 9
5.4 Agricultural Data 9
5.5 Health Data 10
5.6 Other Data 10

6.0 Methodology and Analysis 10
6.1 Location of Current Rainfed Agriculture Lands 10
6.2 Determining Average Annual Rainfall 11
6.3 Determining Potential Rainfed Agriculture Lands 12
6.3.1 Potential Based Upon Soils 12
6.3.2 Potential Based Upon Climate 13
6.3.3 Map of Potential Rainfed Agricultural Lands 13
6.4 Current and Potential Agricultural Land Use 13
6.5 Soil Susceptibility to Wind Erosion 14
6.6 Current and Potential Distribution of Specific Crops 14
6.7 Range and Forest Resources 15
6.8 Human Carrying Capacity from Rainfed Agriculture 16
6.8.1 Baseline Data and Assumptions 16
6.8.1.1 Crop Production 16
6.8.1.2 Crop Yields 17
6.8.1.3 Cropped Area 17
6.8.1.4 Crop Mixtures 18
6.8.1.5 Crop Production Values 19
6.8.2 Carrying Capacity from Current Yield, Current Area, Current Mixture 19

6.8.3 Projections from Improved Yield, Current Area, Current Mixture 20
6.8.4 Projections from Current Yield, Expanded Area, and Current Mixture 21
6.8.5 Projections from Improved Yield, Expanded Area, Current Mixture 21
6.8.6 Projections from Improved Yield, Expanded Area, Allocated Mixture #1 21
6.8.7 Projections from Current Yield, Maximum Area, Allocated Mixture #3 21
6.8.8 Projections from Current Yield, Maximum Area, Allocated Mixture #2 22
6.8.9 Projections from Improved Yield, Expanded Area, Allocated Mixture #3 22
6.8.10 Projections from Increased Yield, Maximum Area, Allocated Mixture #2 22
6.9 Population Density 22
6.9.1 Current Population Density 23
6.9.2 Projected Population Density 23
6.10 Human Carrying Capacity Related to Population 24
6.10.1 Current Yield, Current Area, Current Mixture Related to 1988 Population 24
6.10.2 Improved Yield, Current Area, Current Mixture Related to 2010 Population 25
6.10.3 Current Yield, Expanded Area, Current Mixture Related to 2010 Population 25
6.10.4 Improved Yield, Expanded Area, Current Mixture Related to 2010 Population 25
6.10.5 Improved Yield, Expanded Area, Allocated Mixture #1 Related to 2010 Population 25
6.10.6 Current Yield, Maximum Area, Allocated Mixture #3 Related to 2010 Population 26
6.10.7 Current Yield, Maximum Area, Allocated Mixture #2 Related to 2010 Population 26
6.10.8 Improved Yield, Expanded Area, Allocated Mixture #3 Related to Population 26
6.10.9 Increased Yield, Maximum Area, Allocated Mixture #2 Related to 2010 Population 26

7.0 References 27

APPENDIX A - Figure/Tables

APPENDIX B - Memorandum of December 19, 1991, from Rod Kite, USAID/Senegal

LIST OF FIGURES AND TABLES

Figure 1. Summary of the Human Carrying Capacity Processing Algorithm

Figure 2a. Soil Associations of Senegal

Figure 2b. Major Soil Divisions of Senegal

Figure 3. Vegetation Associations of Senegal

Figure 4. Range and Forest Resources of Senegal

Figure 5. Current Rainfed Agricultural Lands of Senegal

Figure 6. Senegal Average Annual Rainfall, 1930 - 1987

Figure 7. Senegal Average Annual Rainfall, 1950 - 1979

Figure 8. Potential Rainfed Agricultural Lands

Figure 9. Current and Potential Rainfed Agriculture of Senegal

Figure 10. Soil Susceptibility to Wind Erosion

Figure 11. Current and Potential Sorghum Producing Areas of Senegal

Figures 12a and 12b. Human Carrying Capacity by Rainfed Cereal Grain Production

Figures 13a and 13b. Population Density of Senegal

Figures 14a and 14b. Human Carrying Capacity from Rainfed Cereal Grain Production Related to Population

Table 1. Summary of Development Alternatives and Resulting Human Carrying Capacities

EXECUTIVE SUMMARY

GEOGRAPHIC MODELING OF HUMAN CARRYING CAPACITY FROM RAINFED AGRICULTURE: SENEGAL CASE STUDY

Statement of the Problem:

The United States Agency for International Development's Mission in Senegal (USAID/Senegal) needed to evaluate the agricultural potentials of Senegal by crop and by region to support their Agricultural Sector Analysis (ASA), as part of their Country Program Strategic Plan (CPSP). The analysis was limited to rainfed cereal and cash crops. The development alternatives considered for boosting rainfed agricultural production were to increase the cropped area, to increase technology (and thereby crop yields), and a combination of both.

The alternatives were evaluated as forecasts of agricultural production in terms of human carrying capacity (HCC) and gross domestic product (GDP). The resulting information was to be reproduced as national and subnational statistics, and thematic maps showing national distributions. The results were to provide information appropriate at the national planning level.

Specific questions included:

- What are the potentials for cereal and cash crop production?
- How are these potentials currently being used?
- What production increases could result from investments in different development alternatives?
- What is the relationship between projected production and population increases?
- How are these potentials distributed within the country?

Approach:

The Office of Technical Resources (TR) of the Bureau for Africa in Washington (AID/W) responded to the USAID/Senegal request for analytical support. Existing arrangements with the U.S. Geological Survey's EROS Data Center (EDC) and U.S. Bureau of Census (BUCEN) facilitated a timely response. A meeting of experts from USAID/Senegal, TR, and EDC was held at EDC to clarify the specific assumptions and products, outline the analytical framework for deriving the information, and specify the data necessary to support the model.

Data were acquired from a variety of sources. Many data existed in map-registered digital files obtained from AGRHYMET, FEWS, BUCEN, and USGS. Interception of these data bases was crucial to the timely completion of the analysis. Other data available from a variety of AID-sponsored investigations were provided by USAID/Senegal.

The EDC completed the geographic information system (GIS) analyses according to a prescribed analytical framework. This required frequent interaction with USAID/Senegal and TR to address a variety of assumptions and decisions throughout the process.

Products:

Initial products were available to USAID/Senegal within 3 months after the project was initiated. Page-sized maps to support the CPSP, larger scale national maps, and statistical tables were delivered. A computerized data base was provided for use in Dakar. The data, in electronic form and the computer model, were provided to the Mission in Dakar. The data included aggregate statistics and map boundaries which permitted the Mission to continue to adjust key parameters within the context of the interpretation models in order to obtain new results under a variety of development alternatives.

Some of the basic resource maps display the occurrence and extent of natural resources and socio-economic data of Senegal. These maps and associated tabular information served as basic inputs to the analytic model. They also will be a useful guide during implementation of an agricultural development program, in that they provide information on biodiversity, environmental constraints, and co-occurrence of resources. The maps presented in this report were reduced from their original 1:1,000,000 scale.

The HCC and GDP estimates were computed for various development alternatives. The HCC from rainfed cereal production ranged from 3.9 million people under current production to 17.4 million under a scenario that would use all possible lands for production. Likewise, the GDP from cash crops ranged from zero to 128 billion FCFA. The HCC of two development alternatives of particular interest were: (1) increasing the area under cultivation to support 5.6 million people and (2) improving the yields of the current cultivation to support 5.4 million people. Selected HCC potentials to current and projected populations (2010) are presented.

Thematic map information are represented in statistical tables with aggregations to the arrondissement, departmental, regional, and national levels. These tabulations are necessary for further quantitative economic and impact analyses. The tables were delivered to USAID/Senegal in electronic and hardcopy form. Only national aggregate statistics are included in this report.

The analytical framework was deliberately constructed for use as a starting point by USAID/Senegal and Senegalese Ministries for future analyses. Summaries of the data base and many of the linear programming models used for the products displayed in this report were delivered to USAID/Senegal. The data are in a form that USAID could easily develop new models to work on the data. These provide a capacity for additional on-site analytical work and refinement of the applications model. These techniques serve as a mechanism for continuing on-going policy dialogue with the Government of Senegal and other donors.

Significance of the Study:

USAID/Senegal asked for and received information and an analytical framework to support decision making on their 1992-1997 economic assistance program. The effort provided the best possible information from available data on a timely basis. The approach integrated field knowledge of Mission staff with experts in AID/W and key U.S. Federal Government agencies. This interagency cooperation was crucial to obtaining credible results which were responsive to specific Mission needs.

The long-term importance for AID lies outside the actual numeric and cartographic country-specific results. The approach was a significant departure from past analytical work of AID, and points towards a new path to support the Development Fund for Africa's (DFA) program directions. AID is moving away from an individual project approach to a broader "program focus". The GIS approach to evaluating diverse sectoral and cross-sectoral issues provides the base for prioritizing and shaping AID investment programs, and for monitoring their field impact. Many AID-sponsored projects, such as the Famine Early Warning System (FEWS) and AGRHYMET, are currently developing and evaluating GIS approaches for accomplishing AID needs for information management and analysis. These will assist in determining appropriate approaches for implementing GIS technology.

The GIS is an efficient method to link knowledge and data bases, and to provide for their institutional memory. The system provides an effective line of communication between resource technicians and decision makers. Application of the technological advances should serve to encourage a broader use of data in the decision making process influencing wise and sustainable use of a country's resources.

GEOGRAPHIC MODELING OF HUMAN CARRYING CAPACITY FROM RAINFED AGRICULTURE: SENEGAL CASE STUDY

1.0 Introduction

The long-term objective of the U.S. Agency for International Development (USAID) in Senegal is to increase private incomes from natural resources. The Mission's portfolio includes projects to diversify and increase the production of cereal crops.

Programs such as these are helping increase Senegal's food production in absolute terms. Yet Senegal, like most sub-Saharan African countries, is facing a long-term decline in per capita food production as population growth outpaces agricultural growth. This is the current trend despite some expansion of land under cultivation over the past several decades. If Senegal is to make significant strides towards food self-reliance, it must take a hard look at its physical resource and socio-economic management options, and act quickly to overcome the major obstacles. If one is to look at options for narrowing the food gap between food production and the demands of an increasing population, one must assess the potential of Senegal's resource base to determine the realistic upper limits of the land's carrying capacity, and to identify those interventions which will provide the best return.

Estimates of agricultural potential and national carrying capacity from a land resource perspective have often been based on very general, small scale (typically 1:5,000,000) maps of soils, vegetation, land use, and rainfall. In most cases, these general data are all that are available for synoptic, national coverage. Analyses and conclusions drawn from such maps represent crude generalizations. The United Nations Economic Commission for Africa commented that data on national resources and the environment are, if available, in a very rudimentary state (World Bank, 1989a). Where possible, resource management and planning should be based on a strong data base with accurate assessments of the location and quality of individual resources (AAAS, 1983).

The baseline resource information for Senegal increased substantially in 1986 when the results of a 3-year USAID-sponsored integrated resource inventory were published (Stancioff, Staljanssens, and Tappan, 1986). The national level, detailed resource maps were produced for Senegal's National Plan for Land Use and Development and included inventories on the geology, hydrology, soils, vegetation, and land use. The resource data base for Senegal is one of the more detailed, comprehensive ones in sub-Saharan Africa. Despite this, the major constraint among resource managers and development planners has been the lack of knowledge and experience in linking resource information to resource management, the form and format of the available data, the translation of these data into economic terms, and the tying together of multisectoral spatial information into meaningful interpretations.

USAID/Senegal took a major step recently by incorporating natural resource information into its Strategic Plan and project assessment efforts. As part of its efforts to prepare its Country Program Strategic Plan (CPSP), the Mission initiated a study to determine the impact of various development options on human carrying capacity from rainfed agricultural production. The Mission requested technical assistance from the U.S. Geological Survey's EROS Data Center (EDC), and the USAID Bureau for Africa, Office of Technical Resources, to help interpret and integrate the multisectoral geographic data and to help construct a model using a Geographic Information System (GIS) approach.

The goal of the present study was to conduct a planning level country study on the current and projected relationship of human carrying capacity from rainfed agriculture. This includes relating current and potential rainfed agricultural development alternatives to current and projected population. The model is resource-based, relying heavily upon the detailed integrated resource inventory of Senegal. The study strives to provide some answers and guidelines for the mission's Agriculture Sector Analysis (ASA), part of the overall CPSP.

Some of the basic agriculture development questions include: should the mission continue to provide major support to the agriculture sector; what is the potential for increasing agricultural production in Senegal; what is the human carrying capacity based on rainfed agriculture; how much arable land remains in Senegal; can Senegal significantly narrow the food gap within the context of an expanding population base; what is the potential for sustainable agricultural development through improved management of natural resources; what are the consequences of doing nothing to increase the diffusion of sustainable agricultural practices; what are the projected trends (to the year 2010) and relationships between various food production options and the food requirements of an increasing population; what are the limits of agricultural expansion given the need to preserve the biodiversity of Senegal's natural ecosystems?

2.0 The Physical, Demographic and Agricultural Setting

2.1 Climate

Although Senegal is a relatively small country of 196,722 square kilometers (NGS, 1990), it spans three distinct ecological zones - the Sahelian, the Sudanian, and the Guinean. These bioclimatic regions are the result of extreme annual rainfall differences between the semi-arid north (with 200 mm of average annual rainfall from 1950-1979), and the well-watered south (1500 mm). The Gambia forms an enclave of 11,295 square kilometers situated along the Gambia River in the Sudanian zone. The annual rainfall is almost entirely limited to the summer wet season, which lasts up to six months in the south and decreases to three months in the north. Like many of its Sahelian neighbors, Senegal suffers from extremely variable rainfall. While the quantity of rainfall for a certain year may approach the norm, it can also vary greatly in its time of onset, periodicity and termination, especially in

central and northern Senegal. Such variations play havoc with agricultural practices and may result in disastrously low crop production.

2.2 Physiography

Senegal's topography is relatively flat except for moderate relief in the southeast. Most of the country is a Tertiary sedimentary subsidence basin. There are four major rivers which flow west into the Atlantic - the Senegal, Saloum, Gambia, and Casamance. They are wide and meandering with broad estuaries at their mouths.

Geologically, Senegal is composed of two primary relief features. The first is a dissected, elevated region of Paleozoic and Precambrian folded and faulted rocks in the southeast. These are rocks of the "African Shield." They are primarily quartzite, granite, and granitized schists. The second is a sedimentary basin of Tertiary and Quaternary rocks and sediments occupying the western and northeastern part of the country. This is the "Continental Terminal" formation, which occupies by far the largest part of the country. This sedimentary layer is composed of heterogeneous clay sandstones of varying thickness. It consists of a low plateau and plains overlain by wind-blown sediments, alluvial deposits, and intermittent laterite hardcap (Stancioff, Staljanssens, and Tappan, 1986).

2.3 Population

The population of Senegal is estimated (1988) at 6.88 million with an annual growth rate of 2.7 percent (République du Sénégal, 1988). The growth rate has been relatively stable since the first national census in 1976. About 61 percent of the population is rural with about 70 percent of the population employed in agriculture.

While the overall population growth rate is stable, there is a large difference in rates for the urban and rural populations. The urban growth rate has averaged 3.83 percent in the 12 years between the 1976 and 1988 censuses, while the rural population has averaged 2.07 percent. This suggests that there is considerable continuing migration from the rural areas to the towns and cities (République du Sénégal, 1988). As a result, the distribution of the Senegalese national population is becoming increasingly unbalanced. The west central regions are growing at the expense of the rest of the country. This is occurring despite efforts by the Government of Senegal (GOS) to decentralize industry from the Dakar Region to other Regions.

As the overall population increases, so does the population density. In 1976, there were an average of 25 persons per square kilometer. In 1988, the figure had increased to 35 persons per square kilometer. The uneven distribution of population has resulted in six administrative departments having over 100 persons per square kilometer in 1988 (République du Sénégal, 1988).

The Senegalese population is made up of at least 12 ethnic groups of which the major ones are: Wolof, Serer, Toucouleur, Manding, Diola, and Peul. The Wolof make up a considerable majority of the population, more than a third of the total. Despite the diversity of Senegalese peoples, there is relative harmony among the groups and is well known for its politically stable democratic nation (Arid Lands Information Center, 1980).

2.4 Agriculture

Agriculture is the dominant economic activity in Senegal, providing employment for about 70 percent of the labor force. It is dominated by rainfed cultivation whose vegetative cycle coincides with the short wet season. The distribution and kinds of crops are closely tied to the amount, distribution, and timing of rainfall. Crops in the northern half of the country are particularly prone to the effects of erratic rainfall and drought. In addition to rainfed cultivation, two other types of traditional agriculture are practiced. One depends on flooding of low-lying areas from runoff. This type is found in the humid south and is associated with paddy rice cultivation. The second is the flood recessional agriculture associated mainly with the Senegal River. A non-traditional form of cultivation is irrigated agriculture. It is found mainly along the Senegal River where water is available year-round (Pélissier, 1983).

Agriculture plays an essential role in both the national food supply and in the national economy. Rainfed (dryland) cultivation consists of cash crops dominated by groundnuts (peanuts), and subsistence crops dominated by millet and sorghum. Groundnuts are the main cash crop grown in Senegal and, although its share of total export value has fallen drastically in recent years, it is still a major source of rural income and critical to one of Senegal's major industries - the groundnut oil mills - which produce groundnut oil for the domestic market and for export. Climatic conditions and the world price for groundnuts are dominant in determining Senegal's balance of trade. There is a chronic shortage of foodstuffs in the country, and much of it must be imported to cover domestic food requirements.

The performance of the agriculture sector and thus the economic health of Senegal has been poor since independence in 1960. According to The World Bank (1989b), the performance can be attributed to poor agricultural policies, a poor natural resource base, adverse climatic conditions, the energy price shocks of the 1970's, a high population growth rate, and falling terms of trade. Rapidly increasing population, exacerbated by internal migration, has accelerated deforestation, decreasing use of fallow periods, and led to soil degradation.

3.0 Geographic Information System Approach to Resource-Based Analysis of Carrying Capacity

An analysis of the human carrying capacity from various agricultural development options requires the integration and linkage of multi-sector physical and socio-economic data. On the physical side, an evaluation of

national resource assets and limitations must be made, including soils, vegetation, and climate resources. On the socio-economic side, demographic data, farming and land use practices, infrastructure, commodity pricing data, and nutritional requirements are among the key inputs. These disparate data types all have a common feature that link them together: they can all be geographically referenced and thus lend themselves to geographic analysis.

The approach was to take advantage of automated techniques to enter, store, manipulate, analyze, and display geographically referenced information. The GIS is a computer-based system including hardware, software, and graphics that can integrate and analyze multiple data layers. A GIS was used to assemble and analyze the detailed spatial data gathered for this study. The processing system selected for this study was ARC/INFO and PC-ARC/dBASE, both general purpose geographic information software systems.

An added benefit of using a GIS is its ability to support the planning, modeling, and policy-making processes of an organization. It is particularly appropriate for evaluating various "what if" questions that cannot be readily visualized by other means. By changing some of the basic assumptions that contribute to the model, one can immediately see the consequences. This flexibility may become particularly useful in supporting the findings of this study during discussions with the GOS.

Administratively, a GIS can provide a single location for an organization's resource information. This can extend an organization's institutional memory that survives staff changes.

4.0 The Model: Estimating Human Carrying Capacity

The model for computing human carrying capacity was developed jointly by technical staff from USAID/Senegal, the USAID Africa Bureau Office of Technical Resources, and the U.S. Geological Survey. The tentative model was extensively reviewed and modified by those most knowledgeable of agriculture, development, and the Senegal resource base.

The goal of this study was to develop and apply a model which estimates human carrying capacity from rainfed cereal grain production. The model needed to be national in scope, yet capable of incorporating detailed map and statistical data. It should be stressed that the model estimates carrying capacity only from rainfed cereal grain production. This excludes other important types of agricultural production, including irrigated, flood recessional, and market garden. Also excluded are the food producing livestock and fishing activities.

Rainfed (dryland) agriculture is, currently, the most important form of agricultural activity in Senegal, both from an economic and food production standpoint. It is estimated that 80 percent of the caloric needs of the Senegalese diet, taken nationally, are satisfied from cereal grains (Cogill et al., 1989).

Human carrying capacity is defined as the total annual caloric production of a given agricultural area divided by the annual human caloric consumptive needs. The minimum daily consumption requirement of an average of 2300 calories per person (Cogill et al., 1989), with 80 percent (1840 calories) from cereal grains, was used for this study. This is based on a regional estimate; these figures can be adjusted in future analyses as more specific data become available.

In order to evaluate the current and potential carrying capacity from rainfed agriculture, it was necessary to consider the current situation, and potential options for food production in Senegal. There are essentially two approaches to increasing production: a) increase crop yields through improved technology and b) expand the area under cultivation onto arable soils. Both approaches were investigated, singly and in combination, and both required a number of qualifying assumptions for constructing the analytical framework.

Estimating human carrying capacity from current production levels required such data inputs as current locations and cropland areas, by crop type, milling rates and post harvest losses, crop yields and production figures, caloric value of the major food crops, agricultural fallowing practices, and human consumptive needs. Predictions of carrying capacity from increased production scenarios draw heavily on soils and climate interpretations about where crops can and cannot feasibly grow. Thus, it was necessary to rely upon and integrate multiple data sources. Figure 1 presents an overview of the data sources, the processes used to integrate and analyze the data, and the resulting products.

5.0 Data Sources

The data required for the model fall into six distinctive groupings: natural resources data, demographic data, political division data, agricultural data, health data, and other data. This section describes the sources and characteristics of each of these geographic data types.

5.1 Natural Resources Data

5.1.1 Soils

Soils data are one of the key types of natural resource data because of their importance for making agricultural interpretations. There have been two national soil surveys of Senegal, one conducted by ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer) (Maignien, 1965) at a reconnaissance scale of 1:1,000,000, and one completed in 1986 by South Dakota State University (SDSU) at the more detailed scale of 1:500,000 (Stancioff, Staljanssens, and Tappan, 1986). Both use the French/ORSTOM soil classification system. The present study used results of the USAID/Senegal-sponsored detailed SDSU survey.

The SDSU soil map (Carte Morpho-pédologique du Sénégal) was prepared from manual interpretation of Landsat images of Senegal. Multi-date Landsat Multispectral Scanner (MSS) images acquired in the 1970's and early 1980's were used to delineate physiographic types; these were further subdivided into

soil associations. Physical and chemical characteristics of each soil association were collected during extensive ground surveys conducted throughout the country in 1982-1985. The soil delineations were confirmed or adjusted using conventional survey techniques.

The result was a spatially detailed national soil inventory with a considerable set of supporting soil attribute data. The attribute data consist of 11 first order soil parameters (examples are slope, soil depth, texture), and 10 second order parameters (these include permeability, water-holding capacity, wind erosion susceptibility, chemical fertility). These files form the basis for making agricultural (and other) interpretations. The minimum size of a soil polygon is approximately 4 square kilometers.

In order to use the soils data in a GIS, the maps and their soils attributes were digitized by the EROS Data Center using ARC/INFO. Figure 2a shows the spatial density of the soils coverage following digitization.

5.1.2 Vegetation

Discussions of agricultural development must take into consideration the impact of cultivation (particularly expanding cultivation) on natural vegetation. Indeed, agricultural development plans must be carefully weighed against the obvious need to preserve the natural environment and maintain the biodiversity of the region. The Government of Senegal has made significant efforts since independence to set aside major tracts of land as natural preserves. The present study takes the current extent and condition of natural vegetation formations into consideration.

Prior to the SDSU survey (Stancioff, Staljanssens, and Tappan, 1986), national maps of the vegetation of Senegal were both outdated and spatially very general. The best of the early inventories was published in 1962 as part of a vegetation map series on tropical West Africa (Roberty, 1962). Later surveys, also supported by France, provided detailed maps of some of the regions of Senegal, but did not result in national coverage.

The SDSU survey published a detailed map of vegetation cover: Carte du Couvert Végétal at 1:500,000 scale (Stancioff, Staljanssens, and Tappan, 1986). The mapping approach was the same as that for the SDSU soil map described above. The vegetation map is based upon a physiognomic classification of vegetation types, using the "Yangambi" convention for nomenclature of tropical African vegetation (Trochain, 1957; Monod, 1963). In addition, the vegetation map provides floristic information, subdividing vegetation formations into communities. Thus, the map is based on a combined physiognomic-floristic system.

The vegetation map is already somewhat dated, since it is based upon Landsat imagery collected no later than 1982, and extensive field surveys conducted from 1982 to 1985. Nevertheless, it is one of the best available spatial references on vegetation cover. It is estimated that the vegetation cover has changed slightly in some of the regions of high agricultural pressure.

However, these changes are not expected to have a significant impact on the findings of this study conducted at the national level.

Like the soils map, the vegetation map was digitized at EDC for use in a GIS. A generalized map output of the vegetation coverage is presented in Figure 3.

The SDSU vegetation map shows official forest and rangeland preserves. This information was provided by the GOS. These boundaries were digitized by EDC as a separate layer for use in the present model. A generalized map was produced from the vegetation data base for the present study. The resulting map is entitled "Range and Forest Resources of Senegal." The map is presented in Figure 4.

5.1.3 Land Use and Land Cover

The SDSU survey produced a map of land use and land cover of Senegal at 1:500,000 scale (Carte de l'Occupation et l'Utilisation du Sol). The map delineations are essentially the same as those presented on the vegetation map with different polygon attribute information. The attributes refer to the various types of cultivation, and to crop mixtures found during the early 1980's.

The land use and land cover information is an essential layer of the present model. This type of spatial information is often missing from national resource surveys of African countries. For the present study, it provides the key to the location and extent of rainfed agriculture. We did not use the crop mixture information from the SDSU survey, preferring to use the more recent (1986-1989) data from the GOS crop reporting statistics. The land use and land cover attribute data were encoded by EDC and tagged to the vegetation polygon coverage.

5.1.4 Climate

Rainfall, producing available soil moisture, is a very important limiting factor to natural and agricultural vegetation growth in the West African environment. An understanding of the climatic regimes of the region, particularly rainfall, is essential for considering current and potential crop production alternatives. Rainfall plays a primary role in determining "which crops can grow where."

The model used rainfall data provided by the regional AGRHYMET (Agriculture-Hydrology-Meteorology) Program. Ten-day rainfall summaries from each synoptic weather station in Senegal were used to compute statistics on average annual rainfall for Senegal. This study examined rainfall data from the period 1930 to 1987. Computations and interpretations from these data are discussed later.

5.2 Demographic Data

Demographic data were brought into the analytical framework in order to compare current and projected population with estimated human carrying capacity. The demographic data were based on preliminary results from the

1988 census (République du Sénégal, 1988). Preliminary growth rates, current and projected, were provided by U.S. Bureau of the Census (BUCEN) from comparisons of the first national census of 1976 to the preliminary 1988 census. Population figures and growth rates were reported on the basis of an arrondissement, a fourth order administrative unit. Population statistics were further broken out into rural and urban. For this study, we used the total population (rural and urban) reported by arrondissement. Computations and projections made from these data are discussed later.

5.3 Political Division Data

Senegal is divided into a hierarchy of political divisions, a result of internal reorganization at the time of independence. The following outlines the administrative hierarchy, using the official French terms. Within the national borders (limites d'état) (first order boundaries), the country is divided into ten régions (second order); regions are divided into départements (third order); the next finer subdivision is the arrondissement (fourth order); arrondissements are subdivided into the communauté rurale (fifth order); the communauté rurale is composed of lands administered by villages (sixth order).

Many of the data collected for this study were reported at the arrondissement level. The official administrative map (Carte Administrative) of Senegal was provided by a joint GOS - United Nations Development Programme study (UNDP-DAT, 1984). Boundaries were digitized to the arrondissement level (there are 93 arrondissements in Senegal).

5.4 Agricultural Data

The agricultural data used here fall into two groups: agricultural statistics and price data. The agricultural statistics were one of the primary sources for determining current and projected human carrying capacity. HCC was computed by relating crop production amounts to human consumption requirements. The agricultural data used here were provided by the GOS Ministry of Agriculture (République du Sénégal, 1987, 1988, 1990). The data consisted of crop reporting statistics by arrondissement for the years 1986, 1987, and 1989. Statistics on specific cash and food crops included yields, areas under cultivation, and production. Crop mixture ratios were derived from the basic data. Post harvest losses for all crops were estimated at 15 percent (Cogill et al., 1989). The milling rates were determined and reported by region (Martin, 1988).

Areas devoted to fallow in a given year, an indicator of crop use intensity, were not reported. The fallow factor was estimated from aerial photographs of the major agricultural regions in Senegal, and from GOS crop reporting statistics (additional discussion below).

Agricultural price data are those used by USAID/Senegal; the original source are the CSA Monthly Price Reports. The present study used producer prices in FCFA (CFA Francs) per kilogram, representing an average over the October 1989 to July 1990 period. The data are crop specific, reported on a per region basis.

5.5 Health Data

The only facet of health data required by this analysis was human consumption requirements. These data result from a USAID Food Needs Analysis (Cogill, 1989). The analysis reports on the minimum food consumption requirements for Senegal (2300 calories per person per day), and the percentage of calories, taken as a national average, provided by cereal grains (estimated at 80 percent).

5.6 Other Data

Several types of polygonal, linear, and point data were integrated into the final map products to serve as geographic references to the thematic maps. These include roads, cities and towns, rivers, lakes, and geographic tic marks. Most of these locational features were digitized from Operational Navigation Charts (ONC), and from the map: Senegal: Carte au 1:1,000,000 (IGN, 1980), a general purpose road map.

6.0 Methodology and Analysis

This section describes the steps taken to derive the final human carrying capacity estimates from rainfed cereal grain production (refer to Figure 1). It presents the approach used to integrate the various data sources defined above. Qualifying assumptions made about the data, and about operations on the data are specified.

Intermediate map and tabular products are described. These intermediate products build upon one another to achieve the final results. The discussion will not delve into the sequence of ARC/INFO commands and processes used to produce the maps and tables. In some cases, however, key geographic analysis terms are mentioned in describing the map compilation process.

6.1 Location of Current Rainfed Agriculture Lands

One of the first tasks after data collection and digitization of source maps was to answer the question: Where does rainfed agriculture currently occur in Senegal? This involved identifying and delineating all areas that were labeled as "rainfed agriculture". Descriptive or statistical information describing a map unit will be subsequently called "attributes". This information was tagged to the vegetation cover map (see Section 5.1.2), originally an attribute of the land use and land cover map (Section 5.1.3). Using ARC/INFO, the approach was to search through the polygonal vegetation coverage to identify the rainfed agriculture polygons. All polygons which matched the desired attribute were assigned a color code, (yellow, on original color maps). All remaining polygons with non-matching attributes were assigned a second color code, grey.

The result was a new map entitled "Current Rainfed Agriculture Lands of Senegal" (Figure 5). Locational features were added to the map to extend its usefulness. These included nature preserves, administrative boundaries to the arrondissement level, roads, and cities.

Several assumptions were made about the data and the resulting map. First, the agricultural polygons represent delineations based on data collected no later than 1982. Thus, "current" refers to the latest available information. It is assumed that the extent and location of agriculture has not changed greatly at this map scale between 1982 and 1988, the year designated as the current baseline.

The map excludes irrigated, flood recessional, and market garden forms of cultivation, falling into the grey background class. Rainfed agriculture includes both cash crops and food crops. Individual fields and fallow lands were not mapped in the original survey and cannot be shown here. Fallow lands are considered part of a rainfed agriculture polygon.

6.2 Determining Average Annual Rainfall

Climate has much to do with crop distribution. In tropical Africa, rainfall is a primary limiting factor. Seasonal distribution and amount of rainfall are critical for producing agricultural crops. Both are highly variable from year to year.

The approach was to produce a series of maps (Figure 6) that summarize average annual rainfall amounts for Senegal for the six decades from 1930 to 1987. Additional maps were made showing annual rainfall averages over the 30 year period of 1950 to 1979 (Figure 7).

The rainfall data were provided by the regional AGRHYMET Program. First, decadal (10-year) averages were computed from 10-day rainfall summaries from each weather station using RAINMAN, a rainfall database management system developed for the AID-sponsored Famine Early Warning System Project (FEWS). A 3-dimensional surface of values was then computed through automated interpolation of the geographically referenced point rainfall data using SURFER surface generation and plotting software. Interpolation was based on an inverse distance squared approach which creates a full raster of values. Grid cell size was set at one tenth of a degree of latitude and longitude. The final process was to produce isohyets of average annual precipitation in 100 mm increments by converting the precipitation values to lines or contours of equal value.

For simplicity, only a subset of the 100 mm isohyets are shown on the maps. Criteria for selecting them was based on crop specific rainfall requirements (e.g., the 400 mm is commonly accepted as the minimum for short season millet and groundnuts). The decadal maps show the weather stations which provided the point data for producing a each map. The series of decadal average rainfall maps (Figure 6) show the dramatic southward shift of isohyets over time.

In order to show a longer term average, the maps in Figure 7 represent the 1950-1979 average rainfall period. This time frame has been used by other investigators in Senegal and was adopted for the present human carrying capacity model. It incorporates the relatively wet 1950's and 60's with the dry 70's. The present study focuses on the 400 mm and 500 mm isohyets. The 400 mm isohyet (bold red line) was adopted for the present study to delimit

the minimum threshold for rainfed agriculture in Senegal. The 500 mm isohyet is shown for comparison, as requested by USAID/Senegal Mission, because of its close correlation with a concept of "reliable rainfall" (400 mm, 80 percent of the years). Finally, the positions of the 400 mm and 500 mm isohyets from the individual decades are shown for comparison.

6.3 Determining Potential Rainfed Agriculture Lands

Rainfall and soils are the dominant factors which determine if lands are arable. Rainfall amounts are adequate over much of Senegal to support crops, but in many areas the soils are too poor or insufficiently developed. This section describes a parametric approach taken to determine soil potential for rainfed cultivation.

6.3.1 Potential Based Upon Soils

The original study by Stancioff, Staljanssens, and Tappan (1986) evaluated all the soils for their agricultural suitability. This suitability was determined by evaluating soil parameters in conjunction with the climatic regime in which the soil was found. First order soil parameters are those that are observed or measured. They include slope, texture, depth, stoniness, rockiness, coarse fragments, soil drainage, pH, salinity, sodicity, and actual soil erosion. First order parameters are combined to produce second order parameters. These include permeability, wind and water erosion susceptibility, chemical fertility, water holding capacity, potential irrigability, workability, seeding establishment, and potential mechanization. Interval classes were prepared for each parameter during the original survey.

The procedure was to examine all parameters of each soil association in conjunction with known data on climatic/rainfall regimes in Senegal and rate each soil for its suitability to support general rainfed cultivation. If any one parameter posed a major limitation to crop development, the soil was classified as less than moderately suited. For example, soil association Oa6 is a hydromorphic, weakly developed, deposited soil on gravelly material in east central Senegal. It was judged as having low suitability because the soil depth falls into depth class 4, too shallow to support acceptable crop yields. Furthermore, the organic matter content and chemical fertility are low. Polygons representing soil association Oa6 are therefore excluded from consideration for potential agricultural expansion.

The food crops considered in the model were millet, sorghum, corn, cowpeas, and rainfed paddy rice. The cash crops considered were peanuts and cotton. Although there is some local consumption of peanuts, this model treats them as strictly a cash crop. Clearly, there are some differences in the soil requirements of these rainfed crops (for example, peanuts do better in coarser soils than in finer textured soils). For the most part, the soil requirements are similar. All do well on soils that are nearly level or gently rolling, deep, medium textured, and supplied with fertilizer elements (Westin, 1990).

Only the characteristics of the major component of a soils association were considered in the soil suitability ratings. Ironstone is a small but extremely important component of many mapping units since it is unsuitable for

any kind of cultivation. The unmapped minor soil inclusions (with low suitability) were taken into consideration in the agriculture expansion options discussed later.

The judgement as to which soil associations are "moderately suited" versus "less than moderately suited" is not entirely objective. The classification represents an interpretation made from parameters by soil scientists with considerable field experience in Senegal, and with extensive experience in soil taxonomy and soil interpretations.

6.3.2 Potential Based Upon Climate

Known climatic/rainfall regimes in Senegal were considered when evaluating each soil for its agricultural potential. To be considered moderately suited for agriculture, a soil must receive approximately 400 mm of rainfall. The northern extent of rainfed cultivation corresponds approximately to the 400 mm average annual rainfall isohyet (using the 1950-1979 period; Figure 7). While there are many suitable soils, the northern quarter of Senegal is excluded from consideration for potential rainfed cultivation due to moisture limitations. The map of Potential Rainfed Agriculture Lands (Figure 8) represents an integration of the soils and rainfall characteristics.

6.3.3 Map of Potential Rainfed Agricultural Lands

The map of Potential Rainfed Agriculture Lands (Figure 8) was generated by simply selecting from the soils database all soils that were identified in the SDSU study as having moderate potential for agriculture. These were shaded green while the others were shaded grey.

6.4 Current and Potential Agricultural Land Use

It was convenient to compare the above two interpretation maps to show the relation between current areas of rainfed agriculture and potential areas of expansion. To facilitate comparison, the coverages were combined to produce the map "Current and Potential Rainfed Agriculture Lands" (Figure 9). The map shows four land use situations: a) lands currently cultivated; b) lands of potential cultivation; c) lands currently cultivated on soils of less than moderate potential; and d) lands not cultivated with little potential for cultivation.

The map indicates that some areas are presently cultivated on soils that are marginal for that use (orange areas). Most of these areas are in the northwest, where cultivation occurs in a zone of less than the 400 mm average annual rainfall requirement established for this model. Some of the soil associations in the area have major limitations for cultivation, including steep slopes, a relic of an ancient erg. Certainly, cultivation in these areas is possible in "good" years, but the risk of crop failure is very high. The carrying capacity analyses based on "current area," define "current area" as all lands presently under rainfed cultivation, including the farming of these marginal production areas.

As a management tool, the map should be used only as a general indicator of suitable (or unsuitable) land uses, not as a definitive implementation document.

6.5 Soil Susceptibility to Wind Erosion

Many arable (and non-arable) soils are highly prone to wind erosion. If not properly protected, the top soil is blown away, causing a decline in soil productivity. Many areas of the "Peanut Basin," a region of intensive cultivation in west-central Senegal, have suffered irreversible damage from wind erosion. As new lands are cleared for agriculture, soils with high erosion potential must be carefully managed.

While not a direct input to the present carrying capacity study, a map of Soil Susceptibility to Wind Erosion (Figure 10) was compiled from the soil texture parameter of the soils data base. Each soil association was grouped into one of eight classes of wind erosion potential. The ratings are based on conditions that occur when vegetation cover is removed. This map was not used to further exclude lands from potential cultivation. Rather, it was designed as a soil conservation and management planning input. Where soils are highly erodible, practices to maintain windbreaks, intercropping, or maintaining vegetation cover as long as possible must be adopted for sustainable development.

6.6 Current and Potential Distribution of Specific Crops

One of the final analyses required before computing human carrying capacity from rainfed agriculture was to determine the current and potential geographic distribution of specific food and cash crops. For example: Where is sorghum presently grown and what is its production? Where can sorghum potentially be grown on the basis of rainfall and soils? Such questions needed to be answered for all crops considered by the model. Rainfed sorghum is an important subsistence crop in Senegal, and was chosen to illustrate the approach taken for determining current and potential crop distributions.

Sorghum does well on a variety of soil textures and is relatively tolerant to periodic waterlogging. The main West African varieties (gros mil) require at least 700 mm of rainfall in the growing period for acceptable yields (Traoré, 1983).

The first task was to determine the current sorghum producing areas. The determination was based on averages computed from the 1986, 1987, and 1989 GOS crop reporting statistics (République du Sénégal, 1987, 1988, 1990). All arrondissements reporting the production of sorghum were flagged. A polygon attribute table was created, listing arrondissements with and without sorghum production. If the reported area of sorghum cultivation within an arrondissement was less than 5 percent of the total reported area (of all crops) under cultivation, the area was deemed insignificant and sorghum was not considered to occur in that arrondissement. Each agricultural polygon (from the vegetation coverage) was then tagged as sorghum producing areas for those arrondissements reporting sorghum.

The second part of the process was to determine potential sorghum producing areas. The procedure was essentially the same as that for determining potential rainfed agriculture discussed in Section 6.3. Potential areas for production were defined by favorable soil and climatic regions. Soils were limited to those having at least moderate agricultural potential. The distribution was further limited to the north by the 700 mm isohyet (from the 1950 to 1979 period). Finally, the range and forest preserves were intersected with the preceding coverages in order to exclude those areas from production.

The final step was to merge the current and potential sorghum map coverages into a final map: "Current and Potential Sorghum Producing Areas of Senegal" (Figure 11).

The procedures followed for sorghum were repeated for the other crops addressed in the model. The distributions of these crops were not shown in map form, but polygon attribute tables tagged crops to agricultural polygons by arrondissements.

Geographic limitations of the other crops were defined by the soil suitability interpretations (Section 6.3.1) and average annual rainfall. The rainfall limitations used for the other crops were: peanuts and millet were restricted to areas of greater than 400 mm; corn was restricted to 800 mm or greater; rice was set at 1000 mm or more; cowpeas were limited to the 400 to 700 mm zone. The isohyet positions were based on the 1950 to 1979 period of average annual rainfall. The rainfall thresholds adopted for each crop were based on comparing general crop distribution maps from the UNDP-DAT (1984) study to the average annual rainfall maps prepared for the present effort.

Due to current production trends, areas of cotton and rainfed rice cultivation and production were held constant in all projections. Areas, yields, and production figures were based on the GOS 1986, 1987, and 1989 averaged arrondissement crop statistics. Official range and forest preserves were excluded from all crop production.

6.7 Range and Forest Resources

Options for increasing agricultural production through expanding the area of cultivation must take into account impacts on the natural environment. Throughout Africa, agricultural expansion is impinging upon natural habitat, in quantitative and qualitative terms.

In order to provide project managers with a national picture of the vegetation resources, we compiled the "Range and Forest Resources of Senegal" map (Figure 4) from the vegetation data base (refer to Section 5.1.2). The map represents a spatial and thematic generalization of the extensive original data base. Vegetation units were generalized by grouping vegetation community (floristic) units into the more general vegetation formation (physiognomic) units. The reduced number of map units resulted in a reduced number of polygons (spatial generalization). The range and forest preserve boundaries also shown. The purpose of the map was to capture the natural vegetation patterns and to determine where and what natural vegetation would be consumed

by agricultural expansion. It should be noted that the charcoal industry has (and continues to) cut large forest areas so some of the reserve areas and vegetative coverage information are no longer accurate.

The map distinguishes between rangeland and woodland (forest) formations. The division between these is somewhat arbitrary, although rangeland formations are relatively open grasslands with scattered shrubs and trees, and woodlands have denser woody cover. A concrete boundary does not usually exist between these since the natural vegetation forms a gradual transition from open savanna to dense woodlands and forests as one proceeds south into higher rainfall regimes. The present study defined rangeland formations as having less than 20 percent woody cover, and forest formations at over 20 percent. The division was based on data from the original survey (Stancioff, Staljanssens, and Tappan, 1986). Under this definition, rangeland formations may possess considerable woody resources, and woodlands offer valuable forage (woodlands are used for grazing throughout Senegal).

6.8 Human Carrying Capacity from Rainfed Agriculture

At this point, we addressed the questions: What is the estimated human carrying capacity from current rainfed agriculture? What is the potential human carrying capacity from increased production alternatives? What is the estimated geographic distribution of human carrying capacity from current and projected rainfed production?

The first task was to compute carrying capacity from a baseline of current rainfed agriculture. The current baseline was 1988, established as an average of 1986, 1987, and 1989 agricultural conditions, and from the 1988 Senegal census. Subsequent tasks involved estimating potential carrying capacity from three basic development alternatives. One alternative is to limit cultivation to the current area while increasing yield through improved technology. The second is to expand the area under cultivation fully utilizing Senegal's potential, while maintaining current levels of technological input. The third option is to combine the two: increase yields and the area under cultivation to estimate a maximum carrying capacity.

6.8.1 Baseline Data and Assumptions

Computations of carrying capacity from the baseline situation and from agricultural production options required making a number of assumptions about the data and its geographic distribution. Before examining the specific options, it is necessary to discuss the assumptions made on the baseline data. The assumptions made can be grouped into the following headings: crop production, crop yields, cropped area, crop mixtures, and crop production values.

6.8.1.1 Crop Production

Current crop production was derived from averaged crop reporting statistics (Section 5.4). Production figures were averaged for the five food crops and two cash crops, at the arrondissement level. National production was aggregated by summing arrondissement level figures.

Projected production (for expanded area options) is the yield times the cropped area, computed by agricultural polygon and aggregated to administrative subdivisions.

The food crops, contributing directly to carrying capacity, are millet, sorghum, maize, rice, and cowpeas (locally known as niébé). The cash crops are groundnuts and cotton.

Production figures are adjusted using post harvest loss, milling rates, and retained seed amounts. The model assumes a post harvest loss factor of 15 percent per food crop. Milling rates of 0.82 for millet and sorghum, 0.72 for maize, 0.67 for paddy rice, and 1.00 for cowpeas were used (Martin, 1988). Retained amounts for seed in kg/ha were: 8 for millet and sorghum, 16 for maize, 100 for paddy rice, 18 for cowpeas, 120 for groundnuts, and 50 for cotton.

Caloric yields by crop, after milling rate adjustments, were 3300 calories per kg for millet and sorghum, 3680 for maize, 3530 for whole grain paddy rice, and 3420 for cowpeas (Cogill et al., 1989).

6.8.1.2 Crop Yields

Crop yields were also derived from averaged 1986-1989 GOS arrondissement crop statistics. For the expanded area of cultivation options, yield figures were taken from the 1986-1989 averages of adjacent arrondissements having similar rainfall.

The 1986-1989 averaged crop yields were considered as attained under medium levels of farm technology. For increased yield options under high technology, yields were computed on the basis of a percentage increase from current (1986-1989) yields. The high yield figures were based on data from ISRA, which shows yields for high, medium, and low levels of technology applications for an average rainfall year (Martin, 1988).

6.8.1.3 Cropped Area

Cropped area is based on averaged crop reporting statistics at the arrondissement level. Thus, current production figures are based on these.

Rainfed agriculture is not permitted in range and forest preserves in either current or projected situations.

Cropped area for the expanded area option was computed in two steps:
(1) Current area: the locations of cropped area was determined by lands currently used for agriculture. A fallow factor of 50 percent of an agricultural polygon was used. The assumption was that in a given year, 50 percent of the land area is actually cultivated in crops, the remainder left in fallow. This level of fallow is found commonly in western Senegal. It represents intensive use of the land. Cropped area was not adjusted for the area required for human needs (e.g., living space, infrastructure), or for unfarmed poor soil inclusions. These were considered part of the fallow area;
(2) Expanded area: the locations of the expansion of cropped area was

determined by the moderate potential soils for rainfed agriculture (from Section 6.3). In order to maintain some of the local habitat and biodiversity, 50 percent (by area) of the natural vegetation was retained. The resulting landscape would be a mosaic of natural and agricultural areas. The natural areas contain unfarmed poor soil inclusions. Within the cropped areas, 50 percent of the area was assumed to be fallow, and includes areas for human needs.

A third scenario of agricultural expansion onto moderate potential soils was investigated: maximum area. In this scenario, only 15 percent of the natural habitat (rangelands, woodlands, etc.) is retained. Hence, natural vegetation is left only on the poor soil inclusions. A 50 percent fallow factor is maintained for the cultivated area.

6.8.1.4 Crop Mixtures

Current crop mixtures were derived from the GOS averaged crop statistics. The mixtures were extended into the expanded and maximum area options. They were determined by crop, by arrondissement, as a percentage of the total area reported under cultivation.

Projected crop mixtures (referred to below as allocated mixture) were based on several assumptions and operations (their order is significant). Three variations of the allocated mixture theme were implemented:

Allocated Mixture #1) This scenario is based on the allocation of both cereal crops and cash crops. First, 50 percent of the land area is left in fallow in a given growing season. Second, if cotton or rice are currently reported in an arrondissement, they are allocated to the cropped areas at the current levels. The area (and production) of cotton and rice remains constant over time, again using current figures on an arrondissement basis. Third, 50 percent of the remaining area is planted in groundnuts (they may be grown on all moderate potential soils). Fourth, the remaining land is devoted to rainfed cereal crops on the basis of optimizing caloric production. The crop with the highest caloric value is assigned to 75 percent of the remaining area, if the crop can be grown in the particular rainfall zone. The crop with the second highest caloric value is assigned to the remaining 25 percent area, if the rainfall regime can support that crop. For crop distribution limitations by rainfall, refer to Section 6.6.

Allocated Mixture #2) This option allocates only cereal crops (no cash crops are grown). As above, 50 percent of the land is left in fallow. Second, if rice is currently reported in an arrondissement, it is allocated at current levels, and its area is kept constant over time. Third, the remainder is devoted to rainfed cereal crops on the basis of optimizing caloric production using the 75/25 percent proportions described above.

Allocated Mixture #3) This option allocates only cereal crops, while cash crops are retained in their original areas. The first operation is to set 50 percent of the farmable area aside for fallow. Second, groundnuts and cotton are allocated to arrondissements at their current reported levels.

Remaining land is assigned to rainfed cereal crops using the 75/25 percent approach described above.

6.8.1.5 Crop Production Values

Crop production values were computed for both food and cash crops for current and projected situations. These were based on crop producer prices in FCFA per kilogram (see Section 5.4). Price figures used in production projections were based on the 1989-1990 FCFA. Prices were held constant for all projections.

6.8.2 Carrying Capacity from Current Yield, Current Area, Current Mixture

The current (1988 baseline) human carrying capacity was computed using current yields, current areas, and current mixtures, as defined in Section 6.8.1. At the national level, the computed (estimated) human carrying capacity was 3,879,600 people.

The basic approach was, first, to compute crop production (in total kilograms, by crop, by arrondissement) using the averaged yields times the reported areas. Second, the arrondissement yield data of the five food crops were converted to their caloric equivalents. For example, for millet, the caloric value per hectare was computed as follows:

millet calories/hectare = ((yield * 0.85) - 8) * 3300
where, 0.85 is the post-harvest loss factor, 8 is the retained seed amount per hectare, and 3300 is the caloric value/kg after milling. The computation was repeated for the other four food crops using the quantities presented in Section 6.8.1.1.

Third, the total calories produced per hectare were computed by summing the calories per hectare of the food crops that occur in a given arrondissement.

Fourth, the human carrying capacity (HCC) per hectare per arrondissement was calculated using equation (see Section 4.0):

HCC = (Kcal / 671.6 Kcal per person-year)

where, Kcal is the total kilocalories produced per hectare, per arrondissement, and 671.6 Kcal per person-year are the human needs per annum from cereal grains. This value was precomputed using:

$$\frac{2300 \text{ cal}}{\text{person day}} * \frac{365 \text{ day}}{\text{year}} * \frac{\text{Kcal}}{1000 \text{ cal}} * \frac{0.8 \text{ cal from grains}}{1 \text{ cal required}}$$

Finally, it was more convenient to express HCC in terms of people per square kilometer. The HCC per hectare was multiplied by 100 to convert the units to square kilometers.

The results were summarized in map form (Figures 12a and 12b). The range of HCC per square kilometer was divided into 7 classes. Current agricultural areas were also shown for reference.

Although the main thrust of the study was to estimate human carrying capacity from rainfed agriculture, a series of parallel calculations were undertaken to estimate the production value from rainfed agriculture, using the same current and projected agricultural options. Under the current yield, current area, current mixture situation, the production value was computed by multiplying the producer value (FCFA/kg) of each crop times the total production (kg) per crop per arrondissement. This was first done for the food crops, then for the cash crops. The production values were summed for the crops reported in each arrondissement. The figures were aggregated to the national level. The result was a report on the producer value of rainfed cereals, estimated at 65.9 billion FCFA, the producer value of cash crops: 62.6 billion FCFA, and the total producer value: 128.5 billion FCFA.

6.8.3 Projections from Improved Yield, Current Area, Current Mixture

The second agricultural option investigated was human carrying capacity from improved yield, current area, and current mixture. The improved yields were derived from ISRA research as presented by Martin, 1988. Their reports indicated that higher yields could be obtained using high technology. The national carrying capacity under the improved yield option was estimated at 5,425,200 people. The total producer value was computed at 161.8 billion FCFA. Refer to Figure 12a.

The approach to computing human carrying capacity mirrored the approach described above (Section 6.8.2). The sole difference was the substitution of higher yields by factoring in percentage increases from current yields. A high technology management regime to increase yields assumes that soil fertility, structure, and moisture conservation properties can be improved and sustained. Without considerable inputs and conservation practices, this approach may prove difficult to sustain over large areas in the long-term. The ferruginous and ferralitic soils, which are the dominant types in Senegal, are susceptible to degradation when natural vegetation is cleared for new cultivation. ORSTOM studies have shown that these soils experience nutrient loss and loss of structure resulting in loss of available soil moisture capacity. Charreau (1974) reported that the clearing of perennial vegetation results in the loss of soil organic matter quantity and quality. This results in the overall decline of soil productivity, with yields falling off. Soil organic matter appears to be a critical parameter for gaging soil productivity.

The present model did not consider scenarios of declining soil productivity associated with agricultural practices. Future work building upon this study should consider scenarios of declining yields associated with soil degradation, drawing upon the extensive Sahelian literature. The intent here was to point out the pressing need for increased soil management to sustain agricultural development and to obtain higher yields. This will not occur unless smallholders adopt practices that have short-, medium-, and long-term

impacts on soil fertility, soil and moisture conservations, and management of the vegetative cover (McGahuey, 1990).

Refer to Table 1 for a summary of this and subsequent development scenarios.

6.8.4 Projections from Current Yield, Expanded Area, and Current Mixture

The third option was to estimate carrying capacity from current yield, expanded area, and current mixture. The national carrying capacity was estimated at 5,563,000 people; total producer value of food and cash crops was 182.3 billion FCFA. This agricultural alternative is summarized in map form (Figure 12b).

The approach to expanding the area of cultivation was presented in Section 6.8.1.3. Human carrying capacity was computed in the manner described above, converting current yield levels from current and expanded areas to caloric value, and dividing these by the human yearly consumption needs from cereal grains.

6.8.5 Projections from Improved Yield, Expanded Area, Current Mixture

The fourth alternative was to examine carrying capacity from improved yield, expanded area, current mixture. The national carrying capacity was 7,785,000 people; total producer value was 231.3 billion FCFA. The areas of agricultural expansion are shown as a shaded overlay to the carrying capacity information. The reader is reminded that the expanded area option maintains 50 percent of the natural vegetation cover.

The approach parallels the one used in the preceding scenario, substituting percentage increases in yields as discussed in Section 6.8.3.

6.8.6 Projections from Improved Yield, Expanded Area, Allocated Mixture #1

The fifth scenario is based upon improved yield, expanded area, allocated mixture #1. This development option endeavored to increase carrying capacity by optimizing the caloric food value of cereal crops using improved crop mixtures. It also placed considerable importance on continued cultivation of groundnuts as a cash crop. The national carrying capacity from this option was estimated at 7,191,000 people; the total producer value was 246.4 billion FCFA.

The approach to allocating crops to current and expanded areas of cultivation for the allocated mixture was presented in Section 6.8.1.4.

6.8.7 Projections from Current Yield, Maximum Area, Allocated Mixture #3

The sixth scenario is computed from current yields, maximum area, and allocated mixture #3. The maximum area option uses virtually all land that can be farmed, reducing natural habitat to 15 percent of the area of moderate potential soils. Natural habitat also remains on poor soils, on preserves, and in areas of less than 400 mm average annual rainfall. Under allocated

mixture #3 (Section 6.8.1.4), only cereal crops are allocated (optimizing caloric production), with cash crops retained in original areas.

The national carrying capacity was calculated at 10,341,000 people; the total producer value is 236.4 billion FCFA.

6.8.8 Projections from Current Yield, Maximum Area, Allocated Mixture #2

The seventh scenario is derived from current yields, maximum area, and allocated mixture #2. The sole difference between this scenario and the previous one is the allocation of cereal crops to all areas (and the absence of cash crops). This produces a jump in the HCC to 13,084,000 people; the total producer value is computed at 214.3 billion FCFA.

6.8.9 Projections from Improved Yield, Expanded Area, Allocate Mixture #3

The eighth scenario is based on improved yields, expanded area, and allocated mixture #3. It represents a variation of scenarios 2 and 4. Cash crops retain the same areas as in current area of scenario 2 (see 6.8.3), but the cereal crops are allocated to the expanded area of scenario 4 (see 6.8.5). It is important to note that cash crops remain in their current (from 1986, 1987, and 1989 averages) areas, and do not expand into new areas. The HCC was computed at 10,213,000 people; total producer value is 241.4 FCFA.

6.8.10 Projections from Improved Yield, Maximum Area, Allocated Mixture #2

In the ninth scenario, all parameters are maximized in order to extend HCC to the limits of the resource base. The approach is based on improved yields, maximum area, and allocated mixture #2. This is a variant of the seventh scenario, the difference being improved yields. HCC jumps to 17,440,000, and total producer value is 284.6 FCFA (producer value of cash crops is 0.).

Note that the scenarios based on maximum area exclude the fundamental need to preserve the natural habitat, and leave little room for activities of such other sectors as the livestock/pastoral sector, forestry and wood production, etc.

6.9 Population Density

The final phase of the model examines the question: What is the relation of the estimates of human carrying capacity to the current and projected population of Senegal? This is the fundamental issue - relating human carrying capacity from rainfed agriculture to the realities of today and tomorrow. The comparison is critical to measuring the food gap between production and demand from a growing population. Ultimately, it is one measure of Senegal's progress towards the goal of achieving food security and self-reliance.

Factoring in population data required processing it into a form that could be related to human carrying capacity (people per square kilometer). The solution was to generate a current and projected population density map, by

arrondissement, from summed urban and rural population figures from the preliminary 1988 census data.

6.9.1 Current Population Density

The current map of "Population Density of Senegal," Figure 13a, was based on the total population figures reported by arrondissement. The model made two simplifying assumptions with regard to population distribution within an arrondissement: 1) Population is distributed uniformly within an arrondissement, irrespective of the land use, and 2) Population does not occur in the range and forest preserves. The first operation was to overlay the administrative boundary coverage onto the protected (preserve) areas coverage. The area of each arrondissement was adjusted by subtracting the areas of the preserves. Population density, reported in people per square kilometer, was then computed for each arrondissement:

$$\text{Population Density} = \frac{\text{Arrondissement Population}}{\text{Adjusted Arrondissement Area}}$$

The range of population density values was divided into 7 classes to produce a choropleth map.

6.9.2 Projected Population Density

USAID/Senegal requested that projected carrying capacity options be related to population projected to the year 2010. The map of projected population density (Figure 13b) used the same approach and assumptions outlined above. However, a series of precalculations were carried out to project population to 2010 by arrondissement.

First, population was projected to the year 2001 by BUCEN, using the 1976 and preliminary 1988 census data (1990). Their approach was to use a standard methodology for projecting the rural residual population of the various regions of a country. The method is based on the extrapolation of the change in the proportion of a given region to the country's total population. For example, if a region or an arrondissement had 10 percent of a country's population in 1976 and 11 percent in 1988, it would be projected to have 12 percent in the year 2000. Likewise, if it had 12 percent in 1976 and 11 percent in 1988, it would have 10 percent by 2000. A problem arises when a region loses population at a significantly faster rate; for example, a region with 4 percent in 1976, falling to 2 percent in 1988, would be reduced mathematically to zero by the year 2000. Therefore, extreme negative growth rates are held at the actual intercensal rate during the projection period, which produces a small surplus of population. This is compensated for by applying a factor to the increments in all regions that gained population that proportionally reduces the sum of the increments to equal the total growth for the country.

For Senegal, each arrondissement was assigned a code and then treated as if it had been a separate region. The proportion of each arrondissement to the total population of Senegal at the April 1976 and preliminary May 1988 census

data was calculated, and the average annual change was extrapolated to 1990 and then for each year in the period 1991 through 2001. The few negative growth rates were adjusted, the increments were raked to compensate for the adjustments, and all the results were then rounded to the nearest hundred. The final computer program calculates the adjustments needed to make the sums of the individual urban and rural projections add up to the national projected totals.

Projections to the year 2010 were computed at the EDC by applying a linear extrapolation of growth rates, by arrondissement, determined by comparing population changes between the preliminary 1988 census data and the 2001 projections. The projected 2010 population data were converted into population density as defined above.

6.10 Human Carrying Capacity Related to Population

The above process converted current (1988) and projected (2010) population statistics into population density. At this point, the final comparison became possible: relating the 9 human carrying capacity scenarios (Section 6.8) to population. The comparison was achieved by computing the difference between human carrying capacity and current and projected population, on an arrondissement basis. The basic operation was:

HCC - Population

where positive numbers (people per arrondissement) indicate arrondissements where the human carrying capacity exceeds population (surplus production), and negative values indicate arrondissements where population exceeds human carrying capacity (deficit production). This is an indicator of the ability of rainfed agriculture to support the population. The range of results were grouped into 8 classes and presented in map form in Figures 14a and 14b.

The relation was established for the 9 agricultural development options. The reader must be cautious when interpreting the results. First, the reader is reminded that carrying capacity is restricted to the cereal grains production sector, and does not represent the total carrying capacity from all food producing sources. Certainly, there are other important food producing activities, including animal husbandry, fishing, market gardening, irrigated agriculture, etc. Secondly, revenues from the rainfed cash crops are used to purchase food, both from local sources and from imports.

Population projection figures do not account for the migration of population into rural areas associated with expanding areas of cultivation. Under the expanded and maximum area situations, rural populations will likely be higher than those given in the projections, but the national population figures are not expected to change significantly.

6.10.1 Current Yield, Current Area, Current Mixture Related to 1988 Population

The current yield, current area, current mixture option (see Section 6.8.2) was related to current (1988) population. The resulting map (Figure 14a)

shows that human carrying capacity generally exceeds the current population in the central and southeastern areas of Senegal, where population is predominantly rural and the density is relatively low. In the rest of the country, population generally exceeds current carrying capacity. At the national level, the difference between carrying capacity (3,879,600) and 1988 population (6,869,232) indicates that the population exceeds the carrying capacity by 2,989,632 people. This is an indication of the current situation in Senegal.

6.10.2 Improved Yield, Current Area, Current Mixture Related to 2010 Population

The improved yield, current area, current mixture option was related to the projected 2010 population. This assumes that yields can be improved by the amounts indicated above in the next 20 years. Despite the improvement in yields, population growth outpaces the increase in carrying capacity, resulting in arrondissement populations that exceed production capacity over most of the country (Figure 14a). The national summary indicates that the 2010 population (14,680,412) exceeds carrying capacity (5,425,200) by 9,255,212 people. The food gap widens from the current situation.

6.10.3 Current Yield, Expanded Area, Current Mixture Related to 2010 Population

The third agriculture development option, current yield, expanded area, current mixture was related to the 2010 projected population. The national summary indicates that the carrying capacity is exceeded by 9,117,000 people.

6.10.4 Improved Yield, Expanded Area, Current Mixture Related to 2010 Population

The fourth option, improved yield, expanded area, current mixture was related to the 2010 population. Food surplus areas are concentrated in the southeast and central parts of Senegal, but these are more than offset by deficit areas in most of the rest of the country (Figure 14b). Nevertheless, the national summary indicates that the food gap was significantly lessened by this option. The projected population exceeded HCC by 6,895,000 people.

6.10.5 Improved Yield, Expanded Area, Allocated Mixture #1 Related to 2010 Population

A fifth comparison was to relate HCC from improved yield, expanded area, and allocated mixture #1 to 2010 population (Figure 14b). The carrying capacity dropped somewhat from the previous situation, resulting in a greater gap (population exceeded HCC by 7,490,000). This occurred because of the importance given to growing groundnuts as a cash crop, reducing the area devoted to food crops.

6.10.6 Current Yield, Maximum Area, Allocated Mixture #3 Related to 2010 Population

The sixth comparison measures current yield, maximum area, and allocated mixture #3 to 2010 population. The difference dropped significantly (population exceeded HCC by 4,339,000 people) due to the restriction of cash crops to current areas, and the maximum expansion of food crops.

6.10.7 Current Yield, Maximum Area, Allocated Mixture #2 Related to 2010 Population

The seventh scenario compares current yield, maximum area, and allocated mixture #2 to 2010 population. The gap between HCC and projected population is significantly reduced (population exceeds HCC by only 1,596,000 people). This is largely a result of the replacement of all cash crops with food crops.

6.8.10 Improved Yield, Expanded Area, Allocated Mixture #3 Related to Population

The eighth scenario relates improved yield, expanded area, and allocated mixture #3 to 2010 population. The difference between population and HCC is 4,467,000, similar to the result from the sixth scenario. Note that only the cereal crops grow into the expanded area, while cash crops remain at the baseline level. As usual, a 50 percent fallow factor is used on all cultivated lands.

6.10.9 Increased Yield, Maximum Area, Allocated Mixture #2 Related to 2010 Population

In the ninth scenario, all parameters are maximized to boost HCC: increased yields, maximum area, and allocated mixture #2. This is the only scenario in which HCC exceeds the projected 2010 population (a surplus of 2,760,000). The nine scenarios are summarized in Table 1.

7.0 References

American Association for the Advancement of Science (AAAS), 1983, Resource Inventory and Baseline Study Methods for Developing Countries, AAAS Publication No. 83-3, Washington, D.C., 539 p.

Arid Lands Information Center, 1980, Environmental Report on Senegal, Draft Report, University of Arizona, Tucson, 105 p.

Charreau, C., 1974, "Soils of Tropical Dry and Dry-Wet Climatic Areas of West Africa and their Use and Management", unpublished lecture notes, Cornell University, Ithaca, N.Y., 434 p.

Cogill, B., J. Marzilli, and M. McNabb, 1989, A Manual for Food Needs Assessment, Food Needs Assessment Project, Agency for International Development/Bureau for Food for Peace and Voluntary Assistance, Washington, D.C., Version 2.0.

Institut Géographique National (IGN), 1980, "Sénégal: Carte au 1:1,000,000", Paris.

Maignen, R., 1965, Notice Explicative: Carte Pedologique du Sénégal au 1/1,000,000, O.R.S.T.O.M., Dakar-Hann, 63 p.

Martin, F., 1988, "Food Security and Comparative Advantage in Senegal: a Micro-Macro Approach", Michigan State University, Dissertation.

McGahuey, M., 1990, personal communication, U.S. Agency for International Development, Washington, D.C.

Monod, T., 1963, "Après Yangambi (1956): Notes de phytogéopraphie africaine", Bull. del l'IFAN, Ser. A, 2, p. 594-619.

National Geographic Society (NGS), 1990, Atlas of the World, Washington, D.C., 133 p.

Pelissier, P., ed., 1983, Atlas du Sénégal, Les Editions Jeune Afrique, Paris, 72 p.

République du Sénégal, Ministère de l'Economie et des Finances, Direction de la Statistique, 1988, Recensement Général de la Population et de l'Habitat, Mai-Juin 1988: Résultats Préliminaires, Dakar, Senegal.

République du Sénégal, Ministère du Développement Rural, Direction de l'Agriculture, Division des Statistiques Agricoles, 1987, 1988, 1990, Résultats Definitifs de la Campagne Agricole, Dakar, Senegal.

République du Sénégal, Ministère du Développement Rural, Direction de l'Agriculture, Division des Statistiques Agricoles, 1985-1990, various reports, unpublished, Dakar, Senegal.

Roberty, G., 1962, "Carte de la Végétation Tropicale Occidentale à l'Echelle de 1:1,000,000" (map series, in color), Paris, ORSTOM.

Stancioff, A., M. Staljanssens, and G. Tappan, 1986, "Mapping and Remote Sensing of the Natural Resources of the Republic of Senegal: A Study of the Geology, Hydrology, Soils, Vegetation, and Land Use Potential", Remote Sensing Institite, South Dakota State University, SDSU-RSI-86-01, p. 653.

Traoré, M., 1983, Atlas du Mali, Les Editions Jeune Afrique, Paris, 64 p.

Trochain, J., 1957, "Accord interafricain sur la définition des types de végétation de l'Afrique tropicale", Bull. Inst. Et. Centrafri., Nouv. Sér. p. 55-93.

U.S. Agency for International Development (USAID), 1987, "An Overview of the Current USAID Program in Senegal", USAID/Senegal, Dakar, 62 p.

U.S. Bureau of the Census (BUCEN), 1990, "Methodology for Projecting the Arrondissements of Senegal", unpublished note, Center for International Research, Washington, D.C., 1 p.

United Nations Development Programme - Direction de l'Aménagement du Territoire (UNDP-DAT), 1984, "Schéma National d'Aménagement du Territoire: Version Préliminaire", Dakar, Senegal, 750 p.

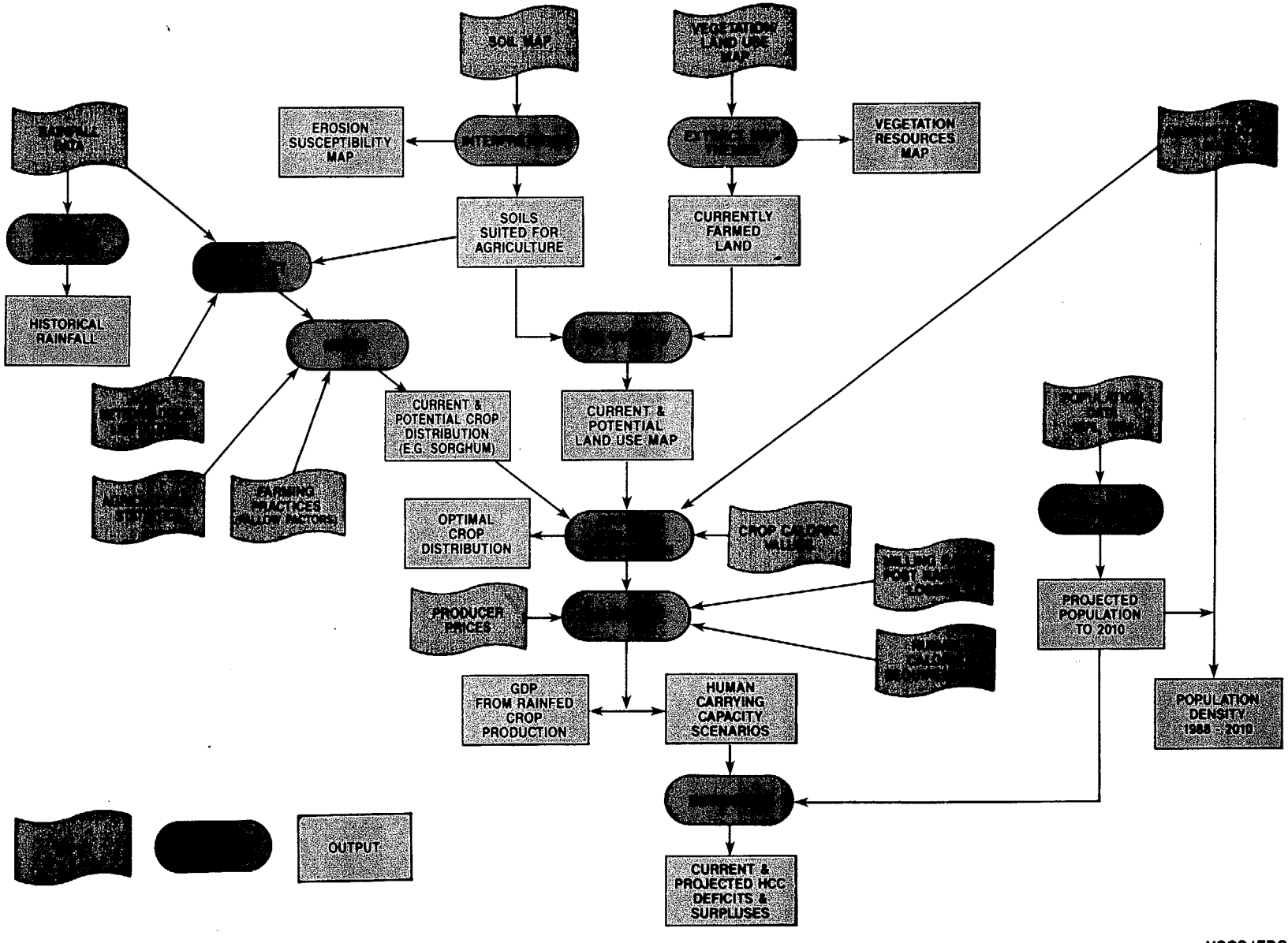
Westin, F., 1990, "Crops for Moderate Potential Soils", unpublished notes, Brookings, South Dakota, 3 p.

World Bank, 1989a, Sub-Saharan Africa: From Crisis to Sustainable Growth, The World Bank, Washington, D.C., 300 p.

World Bank, 1989b, "Senegal Country Strategy Paper", unpublished, The World Bank, Washington, D.C.

APPENDIX A - Figures/Tables

HCC PROCESSING ALGORITHM



IPS3 - 6 - 91 Figure 1

USGS/EDC
TIO

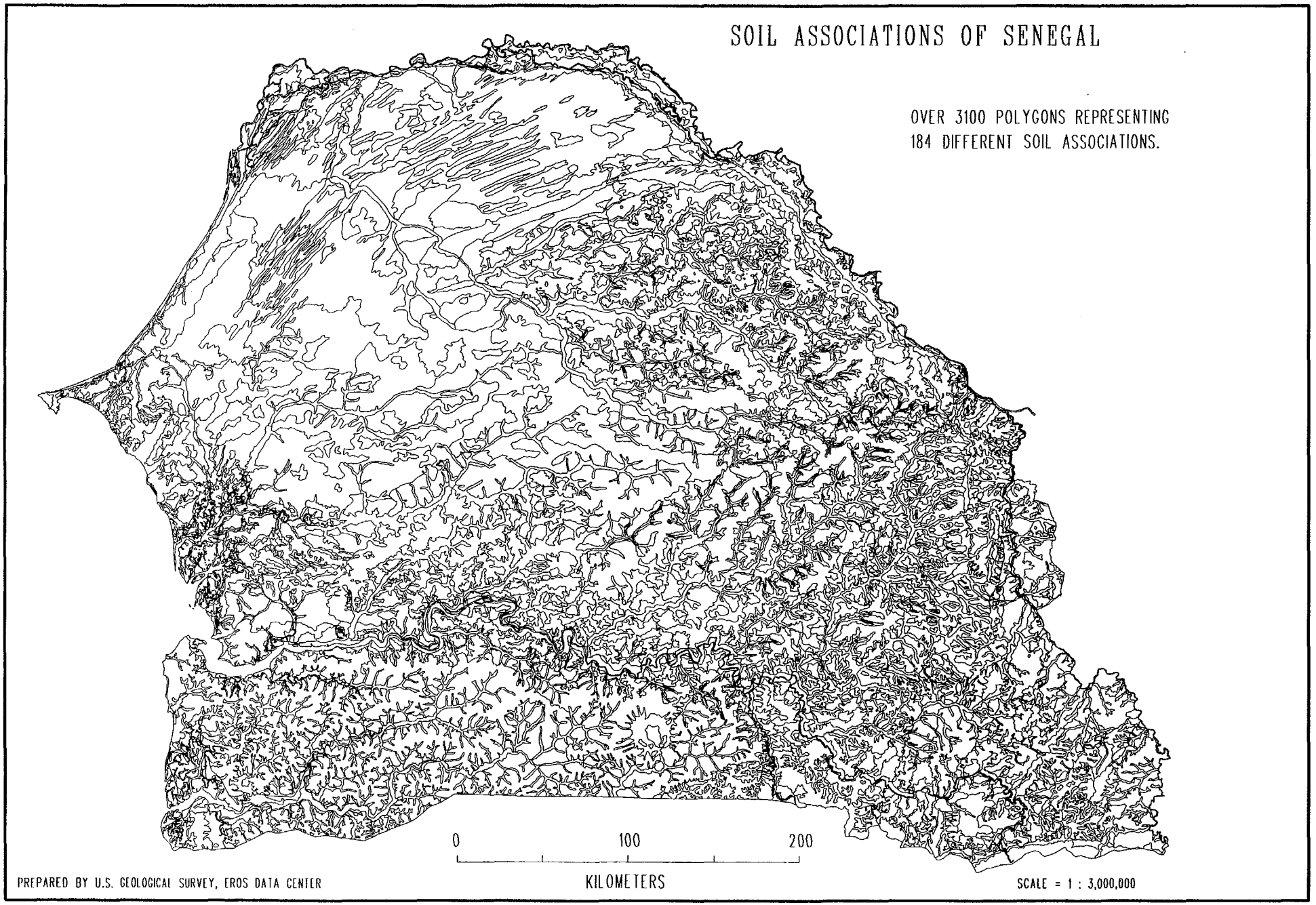

SOIL ASSOCIATIONS OF SENEGAL
OVER 3100 POLYGONS REPRESENTING
184 DIFFERENT SOIL ASSOCIATIONS.
0
100
200
KILOMETERS
PREPARED BY U.S. GEOLOGICAL SURVEY, EROS DATA CENTER
SCALE = 1 : 3,000,000

Figure 2 a

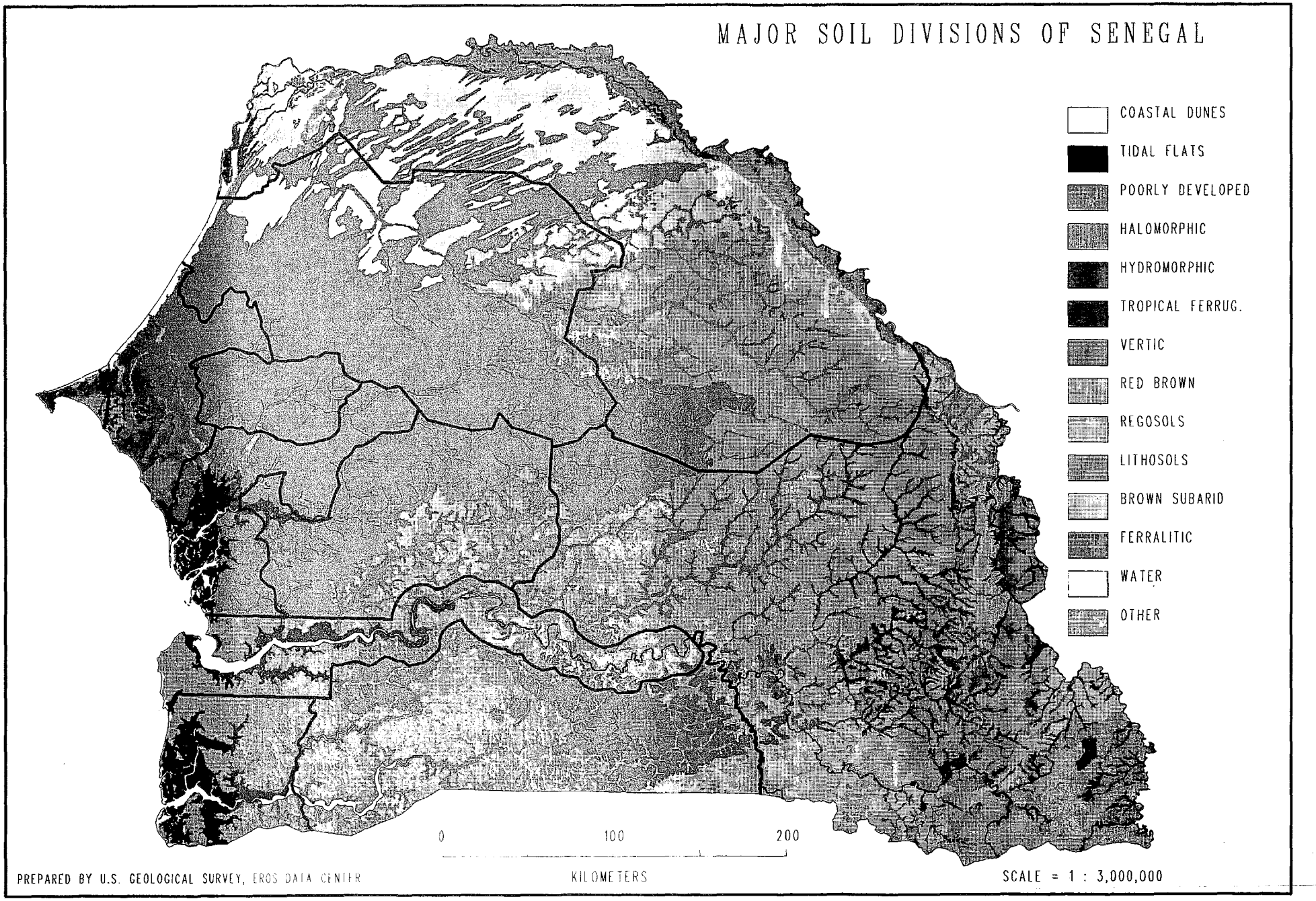

MAJOR SOIL DIVISIONS OF SENEGAL
COASTAL DUNES
TIDAL FLATS
POORLY DEVELOPED
HALOMORPHIC
HYDROMORPHIC
TROPICAL FERRUG.
VERTIC
RED BROWN
REGOSOLS
LITHOSOLS
BROWN SUBARID
FERRALITIC
WATER
OTHER
0
100
200
KILOMETERS
PREPARED BY U.S. GEOLOGICAL SURVEY, EROS DATA CENTER
SCALE = 1 : 3,000,000

Figure 2b

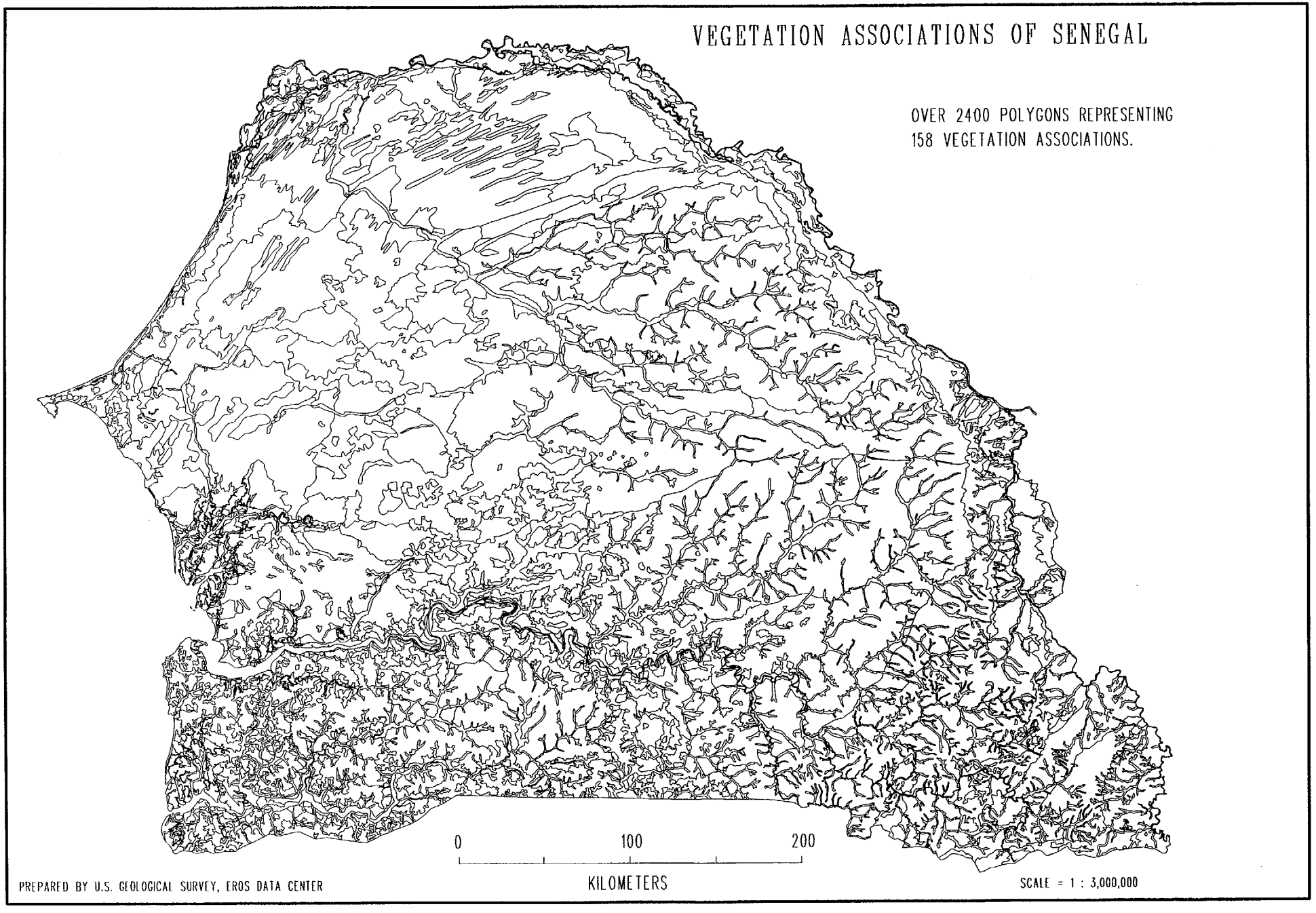

VEGETATION ASSOCIATIONS OF SENEGAL
OVER 2400 POLYGONS REPRESENTING
158 VEGETATION ASSOCIATIONS.
0
100
200
KILOMETERS
PREPARED BY U.S. GEOLOGICAL SURVEY, EROS DATA CENTER
SCALE = 1 : 3,000,000

Figure 3

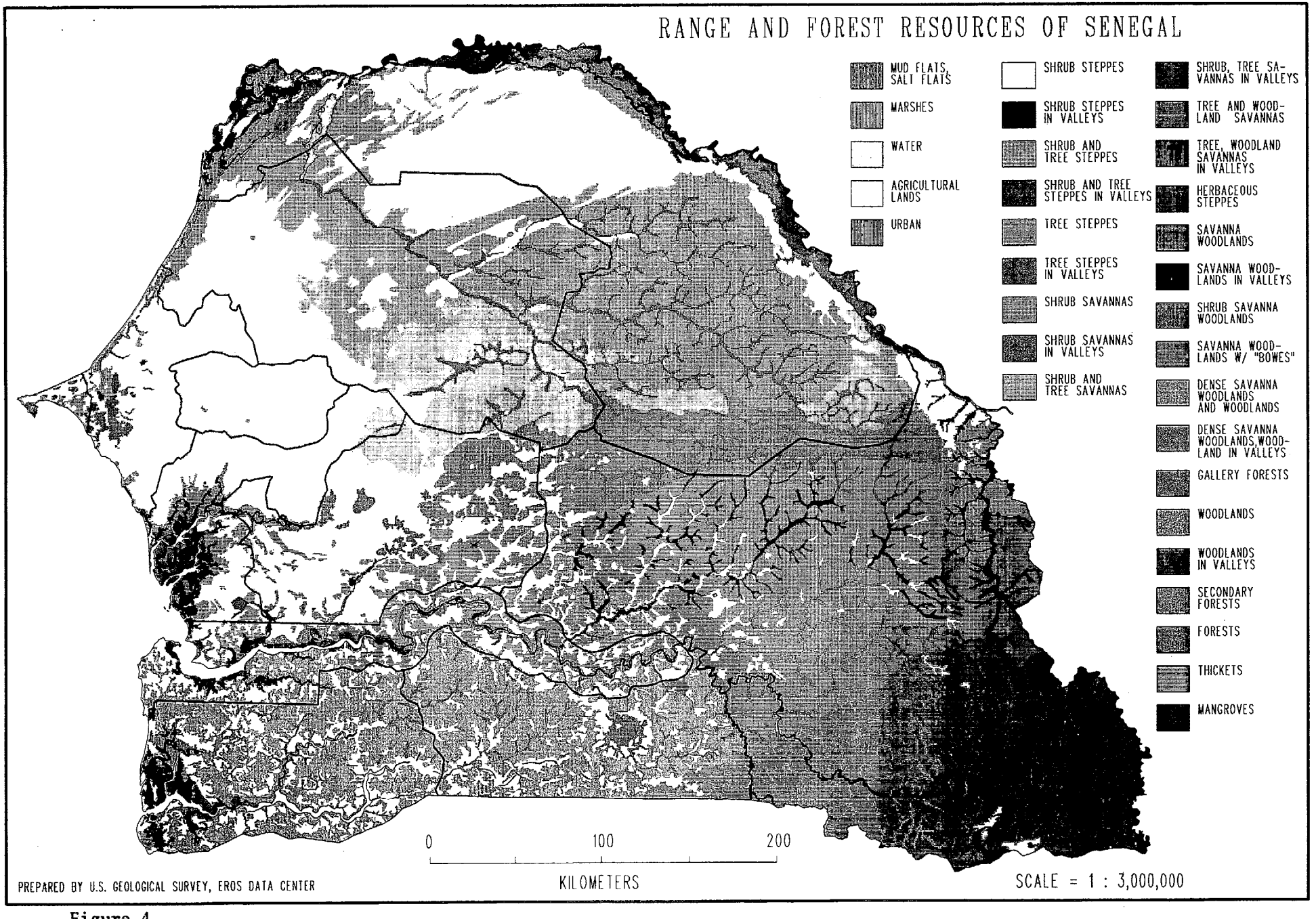

RANGE AND FOREST RESOURCES OF SENEGAL
MUD FLATS, SALT FLATS
MARSHES
WATER
AGRICULTURAL LANDS
URBAN
SHRUB STEPPES
SHRUB STEPPES IN VALLEYS
SHRUB AND TREE STEPPES
SHRUB AND TREE STEPPES IN VALLEYS
TREE STEPPES
TREE STEPPES IN VALLEYS
SHRUB SAVANNAS
SHRUB SAVANNAS IN VALLEYS
SHRUB AND TREE SAVANNAS
SHRUB, TREE SAVANNAS IN VALLEYS
TREE AND WOODLAND SAVANNAS
TREE, WOODLAND SAVANNAS IN VALLEYS
HERBACEOUS STEPPES
SAVANNA WOODLANDS
SAVANNA WOODLANDS IN VALLEYS
SHRUB SAVANNA WOODLANDS
SAVANNA WOODLANDS W/ "BOWES"
DENSE SAVANNA WOODLANDS AND WOODLANDS
DENSE SAVANNA WOODLANDS, WOODLAND IN VALLEYS
GALLERY FORESTS
WOODLANDS
WOODLANDS IN VALLEYS
SECONDARY FORESTS
FORESTS
THICKETS
MANGROVES
0
100
200
KILOMETERS
SCALE = 1 : 3,000,000
PREPARED BY U.S. GEOLOGICAL SURVEY, EROS DATA CENTER

Figure 4

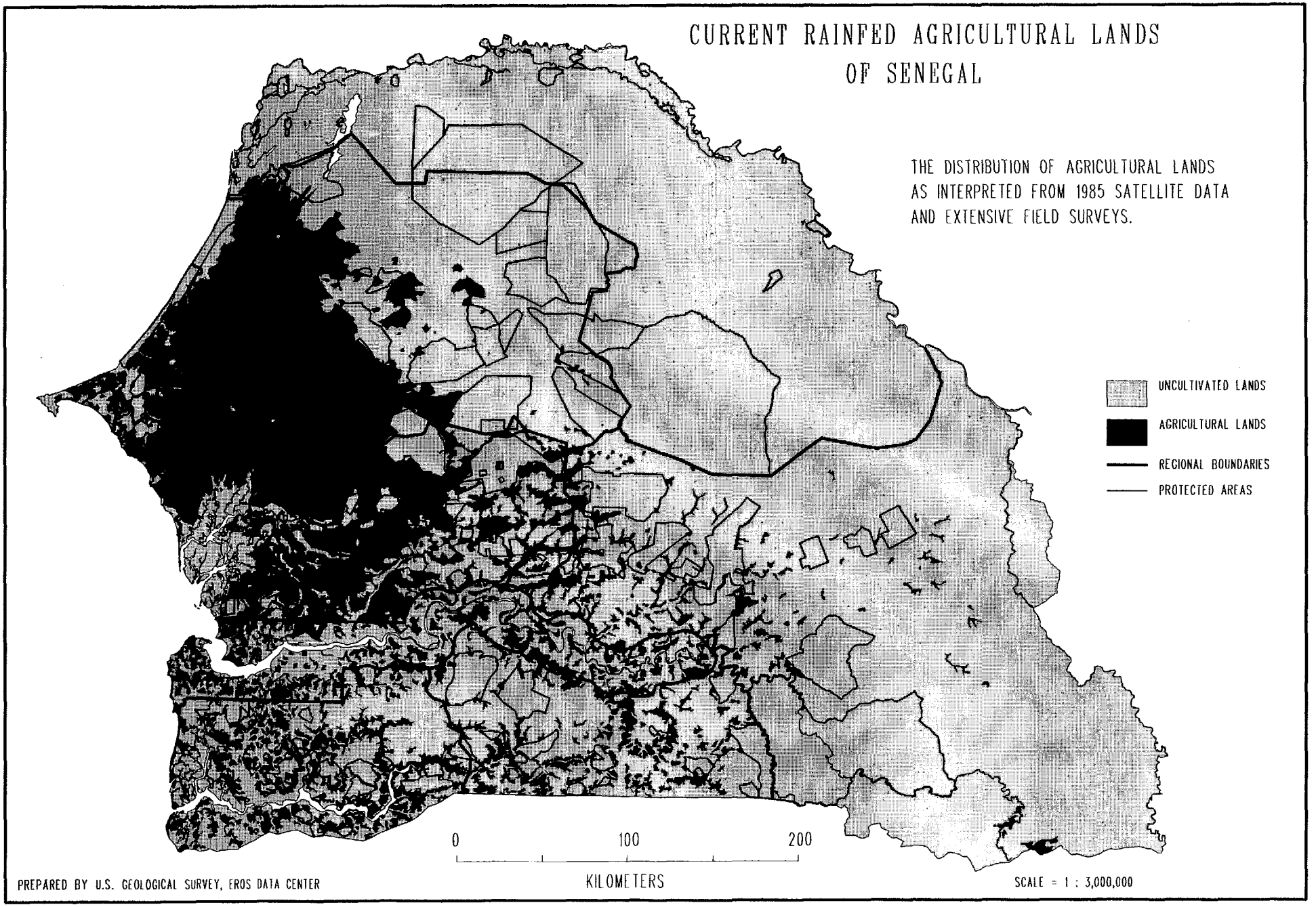

CURRENT RAINFED AGRICULTURAL LANDS
OF SENEGAL
THE DISTRIBUTION OF AGRICULTURAL LANDS
AS INTERPRETED FROM 1985 SATELLITE DATA
AND EXTENSIVE FIELD SURVEYS.
UNCULTIVATED LANDS
AGRICULTURAL LANDS
REGIONAL BOUNDARIES
PROTECTED AREAS
0
100
200
KILOMETERS
PREPARED BY U.S. GEOLOGICAL SURVEY, EROS DATA CENTER
SCALE = 1 : 3,000,000

Figure 5

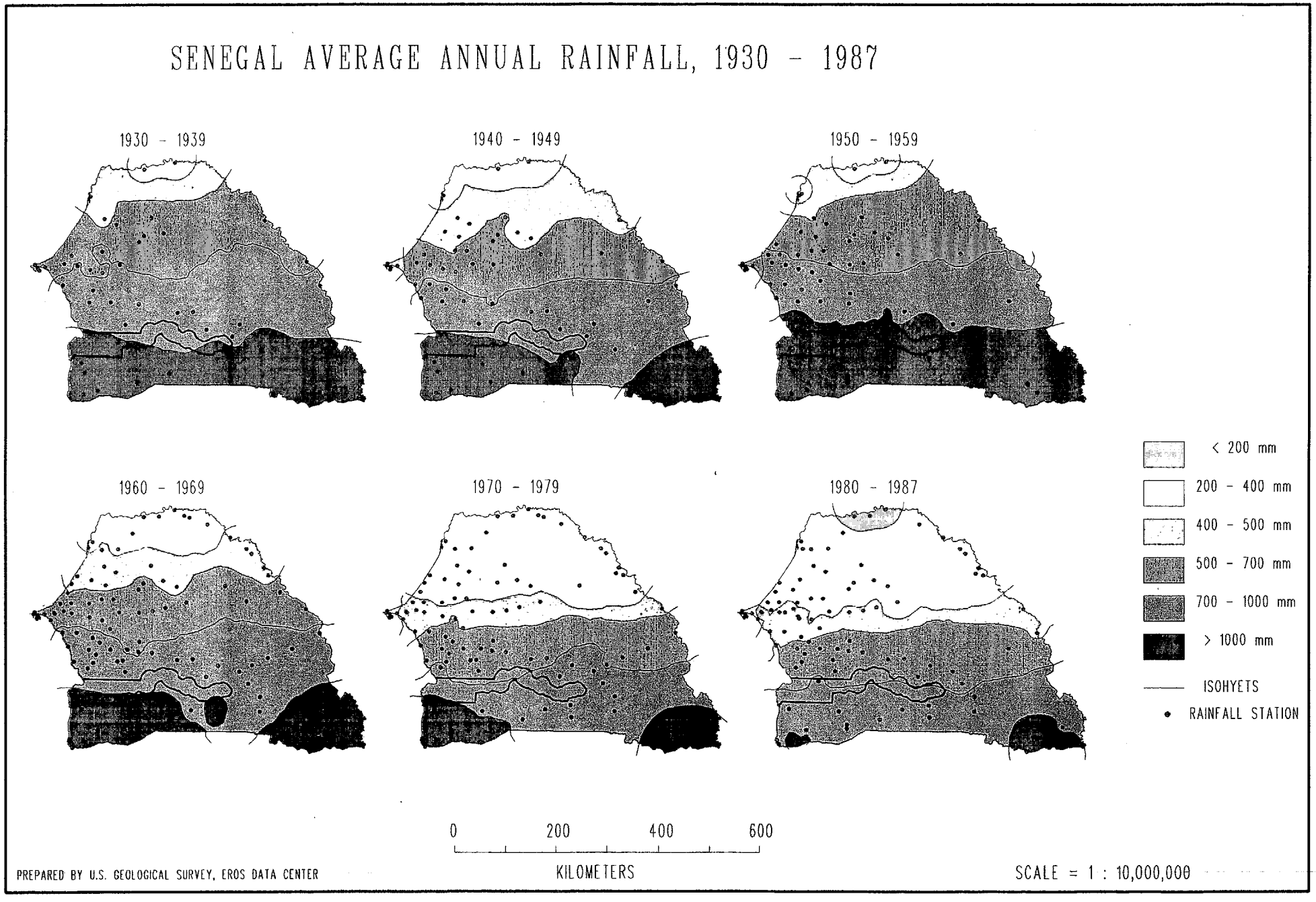

SENEGAL AVERAGE ANNUAL RAINFALL, 1930 - 1987
1930 - 1939
1940 - 1949
1950 - 1959
1960 - 1969
1970 - 1979
1980 - 1987
< 200 mm
200 - 400 mm
400 - 500 mm
500 - 700 mm
700 - 1000 mm
> 1000 mm
ISOHYETS
RAINFALL STATION
0
200
400
600
KILOMETERS
PREPARED BY U.S. GEOLOGICAL SURVEY, EROS DATA CENTER
SCALE = 1 : 10,000,000

Figure 6

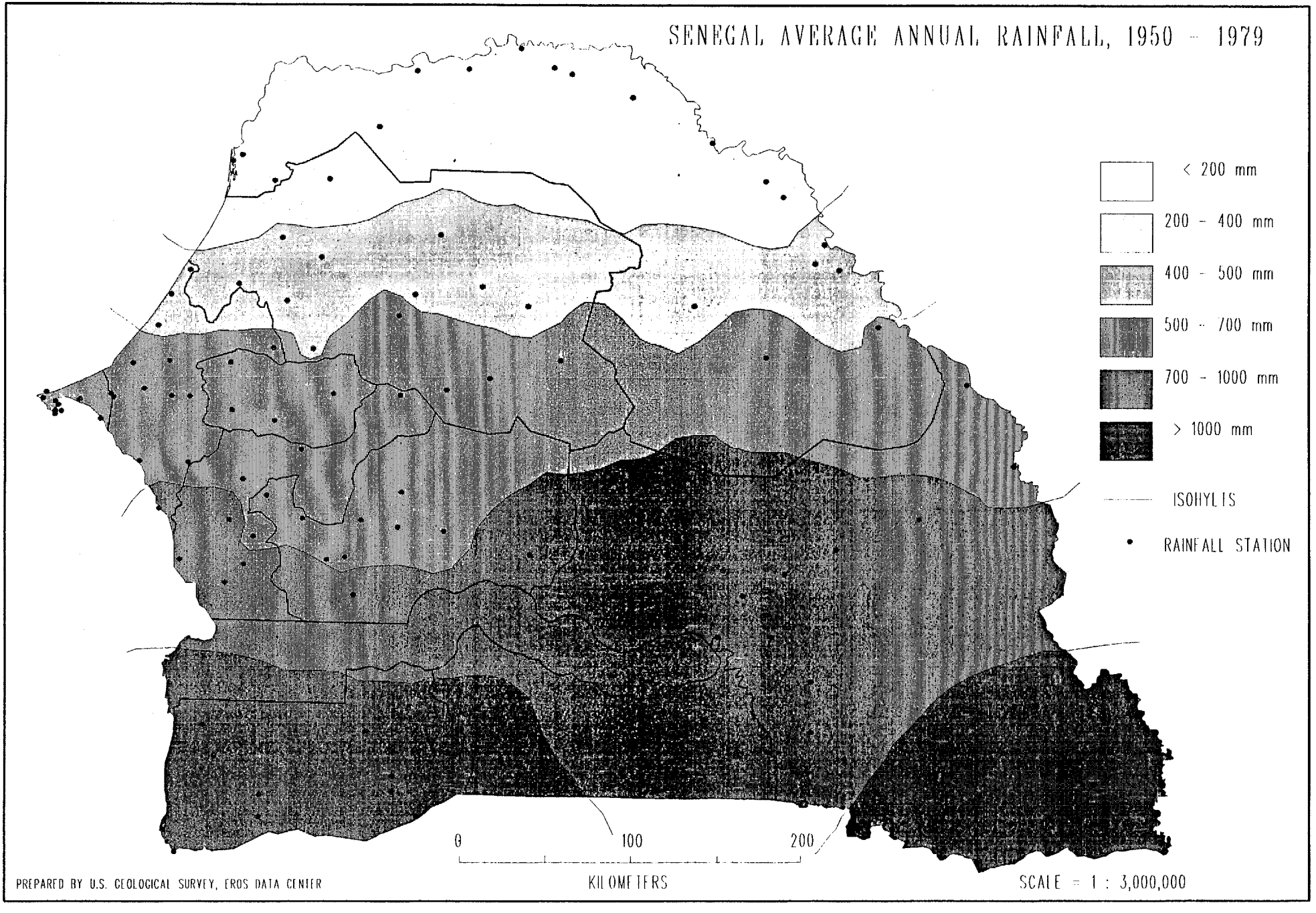

SENEGAL AVERAGE ANNUAL RAINFALL, 1950 - 1979
< 200 mm
200 - 400 mm
400 - 500 mm
500 - 700 mm
700 - 1000 mm
> 1000 mm
ISOHYETS
RAINFALL STATION
0
100
200
KILOMETERS
PREPARED BY U.S. GEOLOGICAL SURVEY, EROS DATA CENTER
SCALE = 1 : 3,000,000

Figure 7

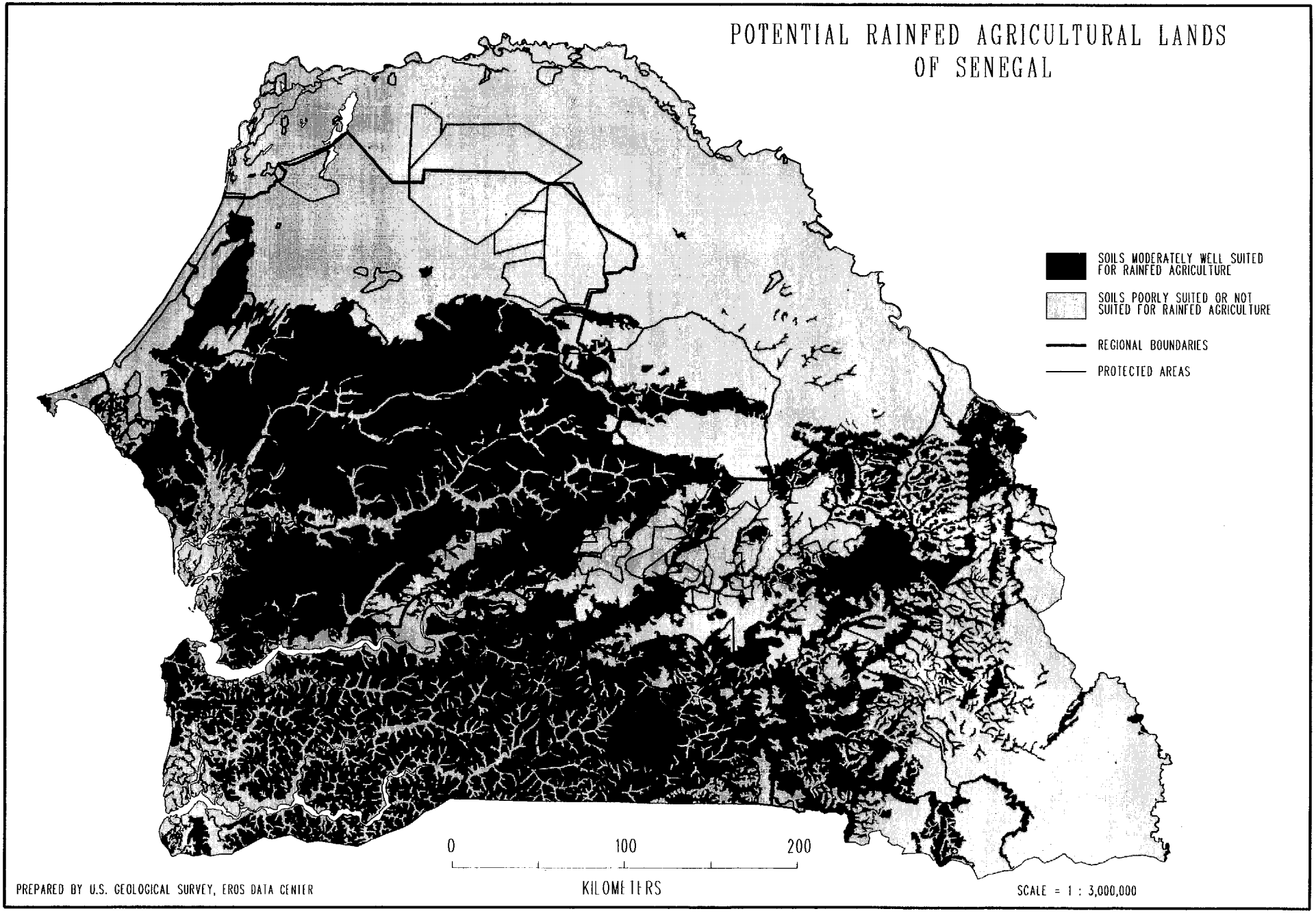

POTENTIAL RAINFED AGRICULTURAL LANDS
OF SENEGAL
SOILS MODERATELY WELL SUITED FOR RAINFED AGRICULTURE
SOILS POORLY SUITED OR NOT SUITED FOR RAINFED AGRICULTURE
REGIONAL BOUNDARIES
PROTECTED AREAS
0
100
200
KILOMETERS
PREPARED BY U.S. GEOLOGICAL SURVEY, EROS DATA CENTER
SCALE = 1 : 3,000,000

Figure 8

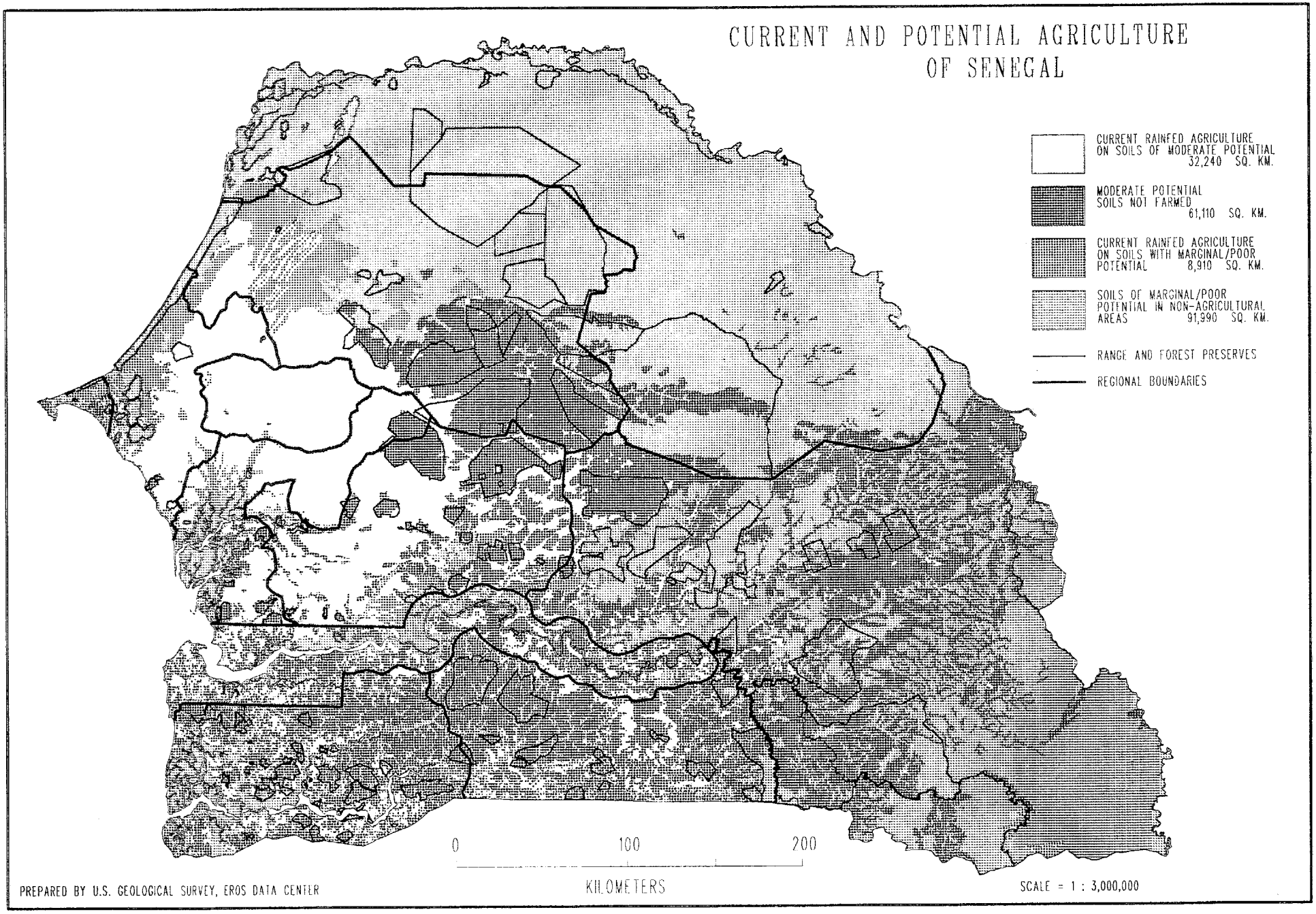

CURRENT AND POTENTIAL AGRICULTURE
OF SENEGAL
CURRENT RAINFED AGRICULTURE ON SOILS OF MODERATE POTENTIAL 32,240 SQ. KM.
MODERATE POTENTIAL SOILS NOT FARMED 61,110 SQ. KM.
CURRENT RAINFED AGRICULTURE ON SOILS WITH MARGINAL/POOR POTENTIAL 8,910 SQ. KM.
SOILS OF MARGINAL/POOR POTENTIAL IN NON-AGRICULTURAL AREAS 91,990 SQ. KM.
RANGE AND FOREST PRESERVES
REGIONAL BOUNDARIES
0
100
200
KILOMETERS
PREPARED BY U.S. GEOLOGICAL SURVEY, EROS DATA CENTER
SCALE = 1 : 3,000,000

Figure 9

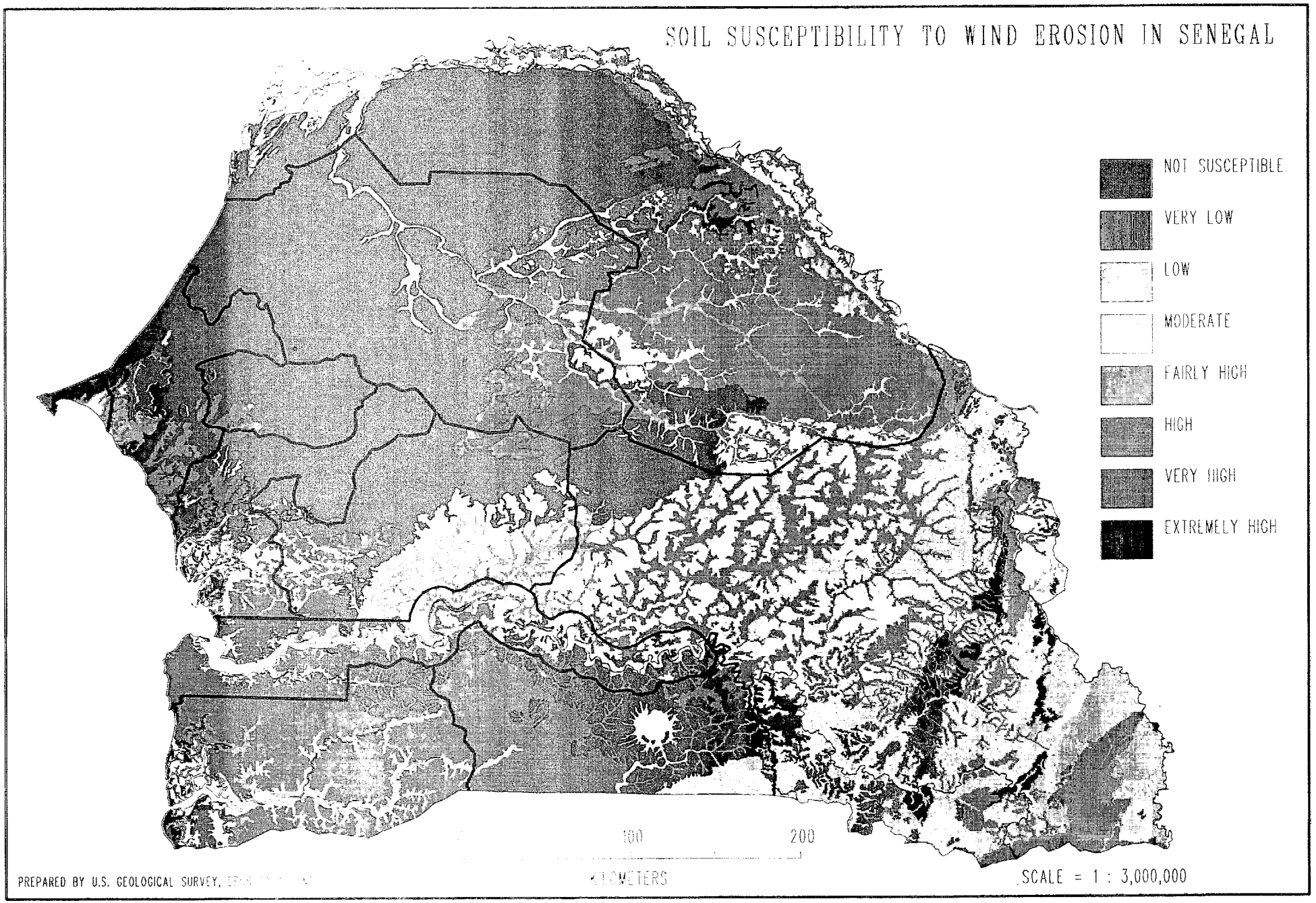

SOIL SUSCEPTIBILITY TO WIND EROSION IN SENEGAL
NOT SUSCEPTIBLE
VERY LOW
LOW
MODERATE
FAIRLY HIGH
HIGH
VERY HIGH
EXTREMELY HIGH
100
200
KILOMETERS
SCALE = 1 : 3,000,000
PREPARED BY U.S. GEOLOGICAL SURVEY,

Figure 10

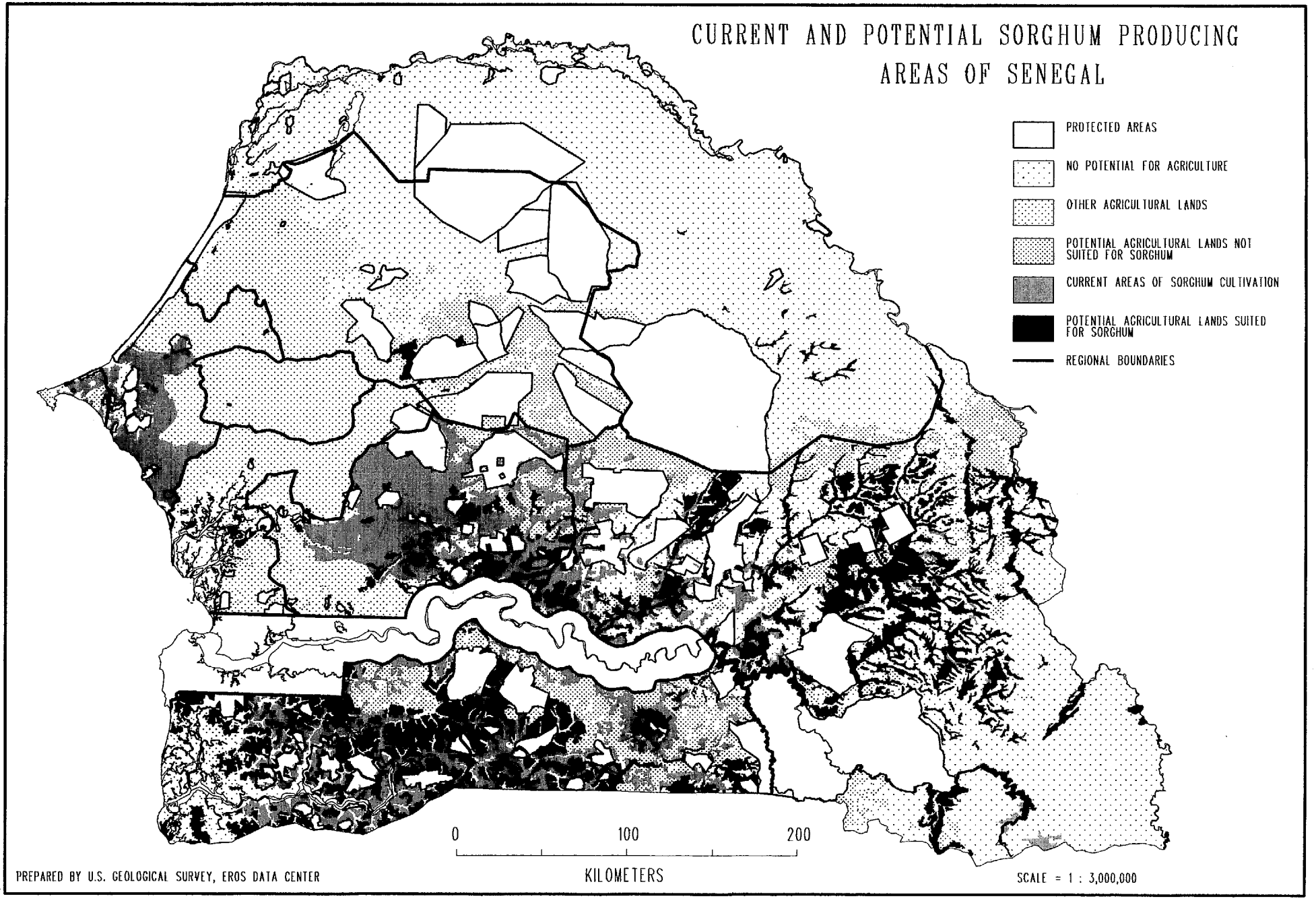
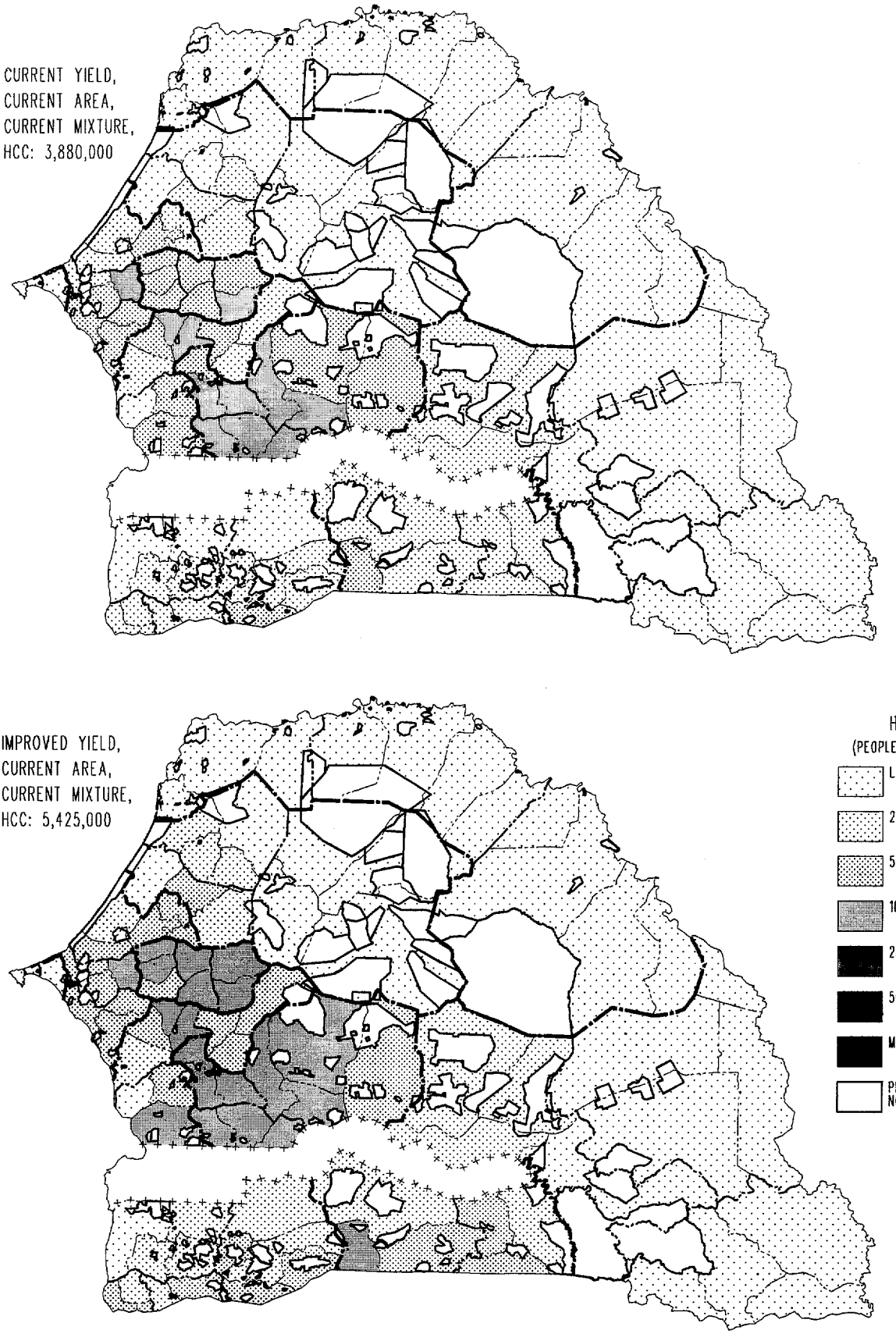

CURRENT AND POTENTIAL SORGHUM PRODUCING AREAS OF SENEGAL
PROTECTED AREAS
NO POTENTIAL FOR AGRICULTURE
OTHER AGRICULTURAL LANDS
POTENTIAL AGRICULTURAL LANDS NOT SUITED FOR SORGHUM
CURRENT AREAS OF SORGHUM CULTIVATION
POTENTIAL AGRICULTURAL LANDS SUITED FOR SORGHUM
REGIONAL BOUNDARIES
0
100
200
KILOMETERS
PREPARED BY U.S. GEOLOGICAL SURVEY, EROS DATA CENTER
SCALE = 1 : 3,000,000

Figure 11

HUMAN CARRYING CAPACITY BY RAINFED CEREAL GRAIN PRODUCTION IN SENEGAL



PREPARED BY U.S. GEOLOGICAL SURVEY, EROS DATA CENTER

SCALE = 1 : 4,500,000

Figure 12a

HUMAN CARRYING CAPACITY BY RAINFED CEREAL GRAIN PRODUCTION IN SENEGAL

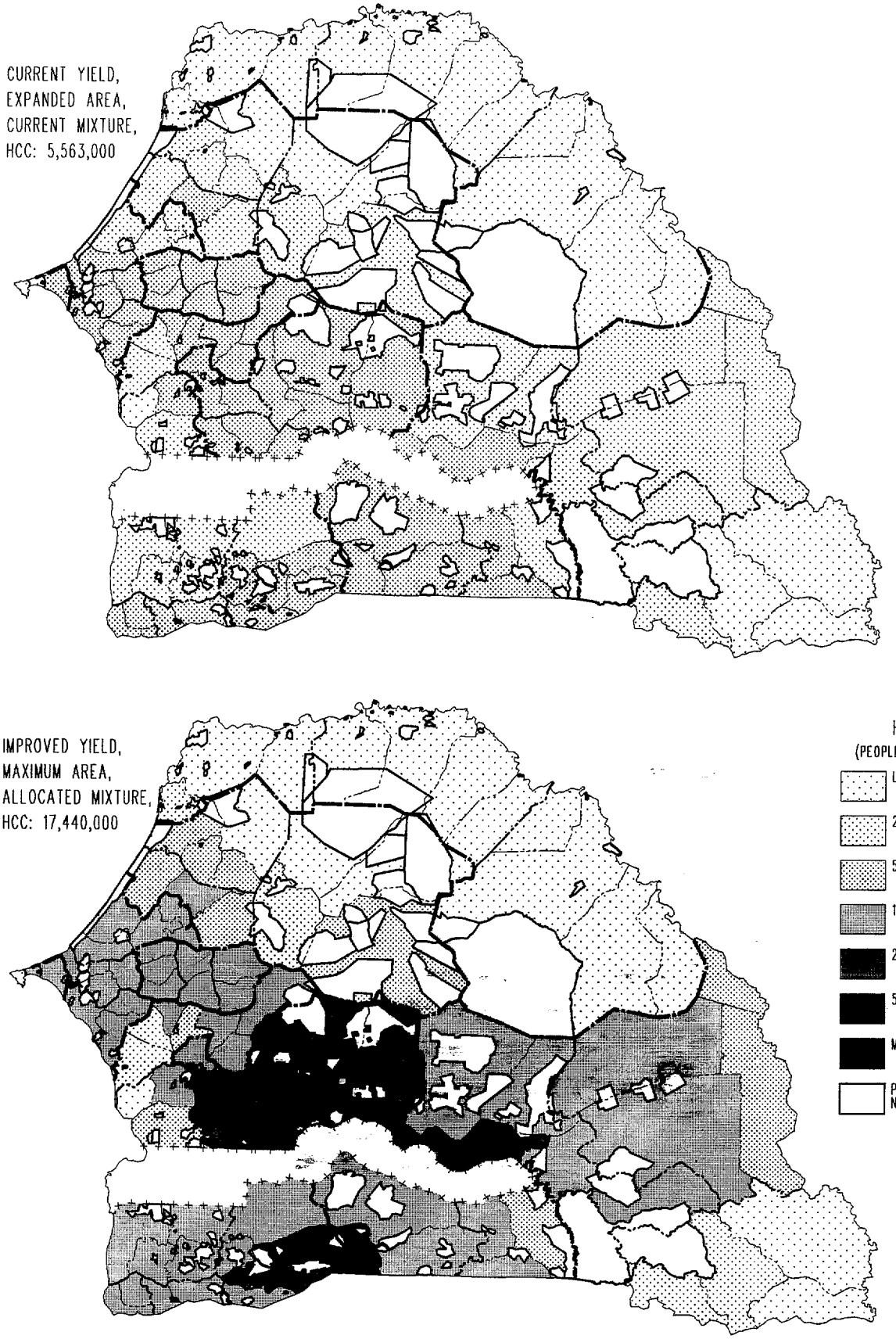


Figure 12b

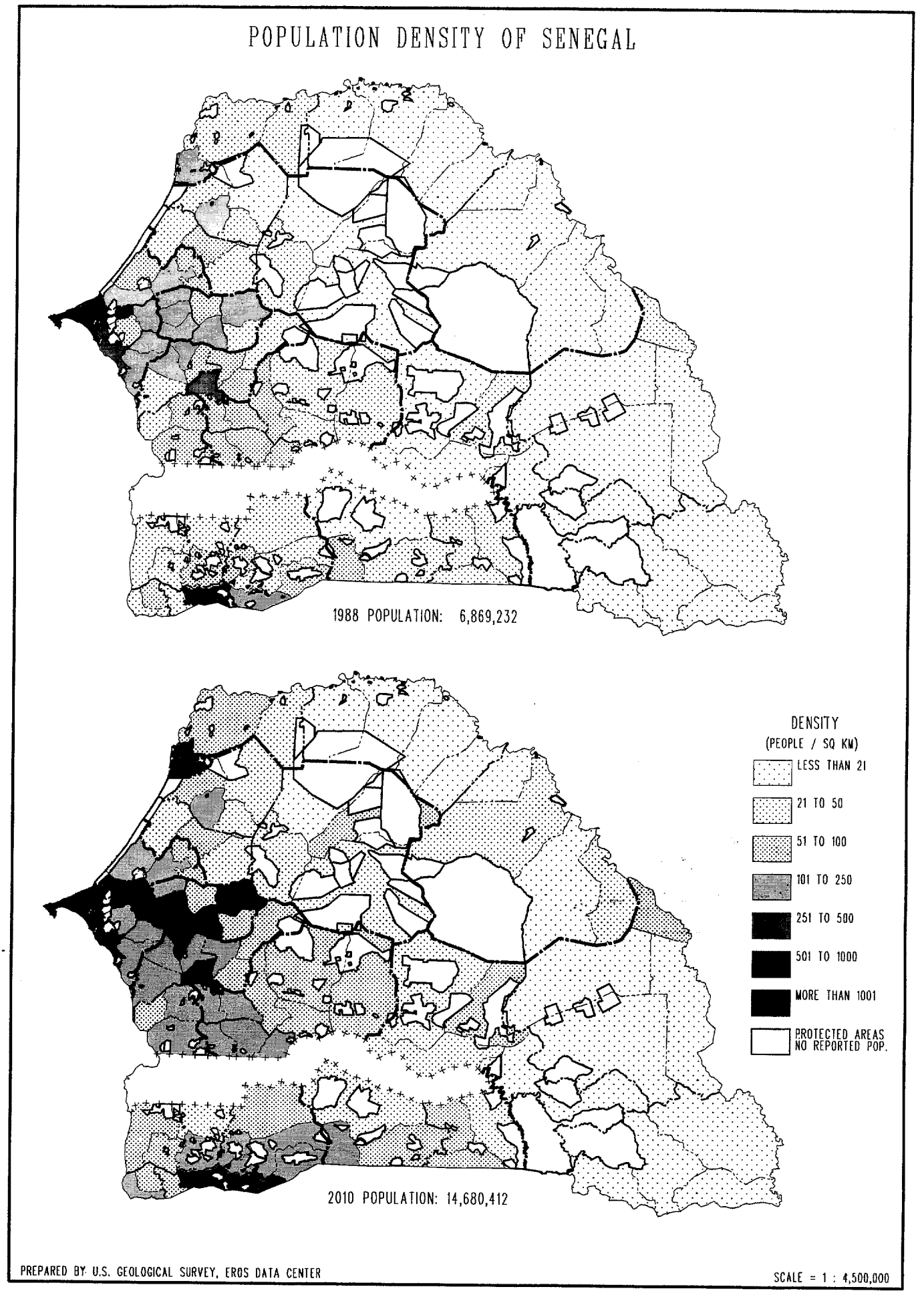


Figure 13a (top); 13b (bottom)

HUMAN CARRYING CAPACITY FROM RAINFED CEREAL GRAIN PRODUCTION RELATED TO POPULATION

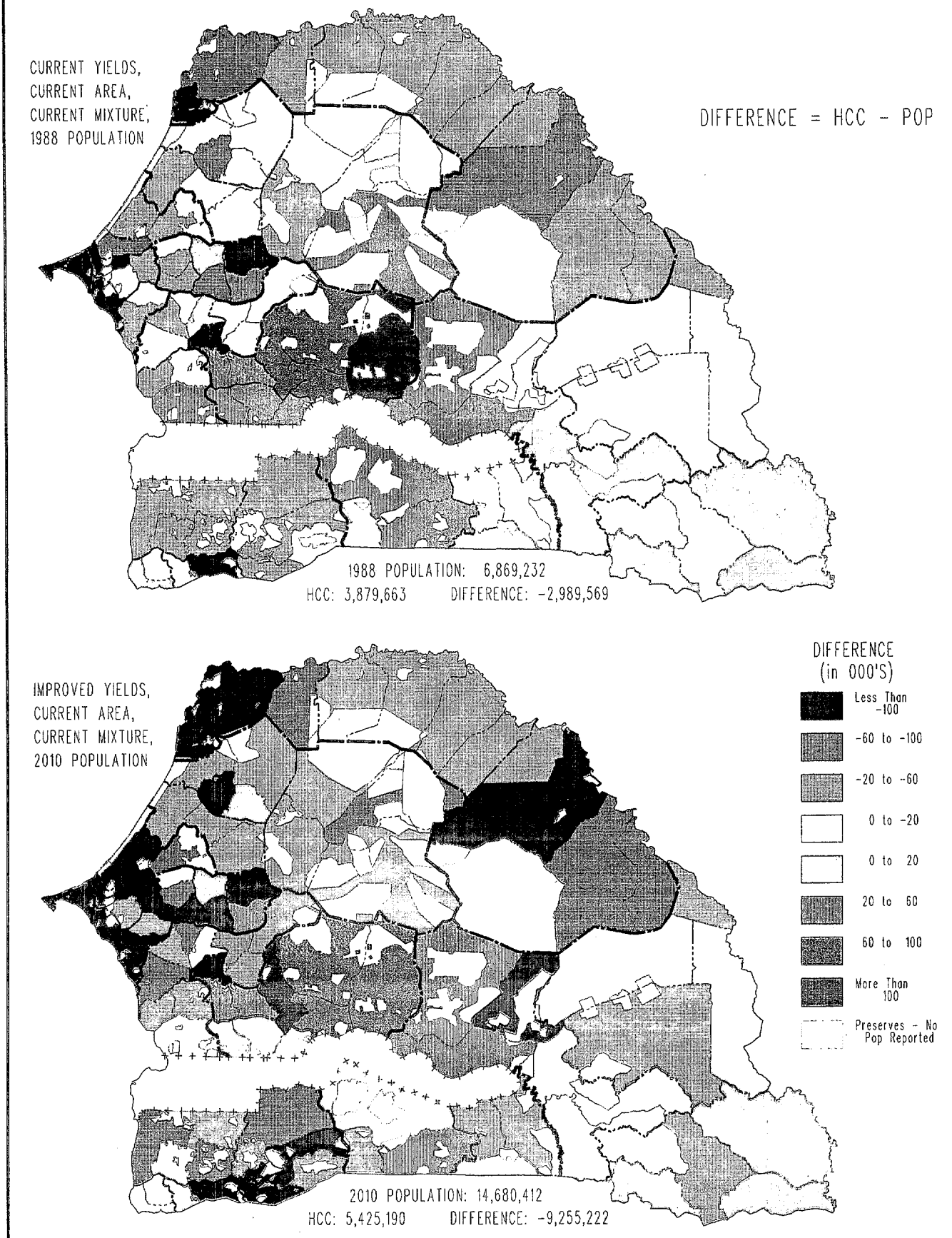


Figure 14a

HUMAN CARRYING CAPACITY FROM RAINFED CEREAL GRAIN PRODUCTION RELATED TO POPULATION

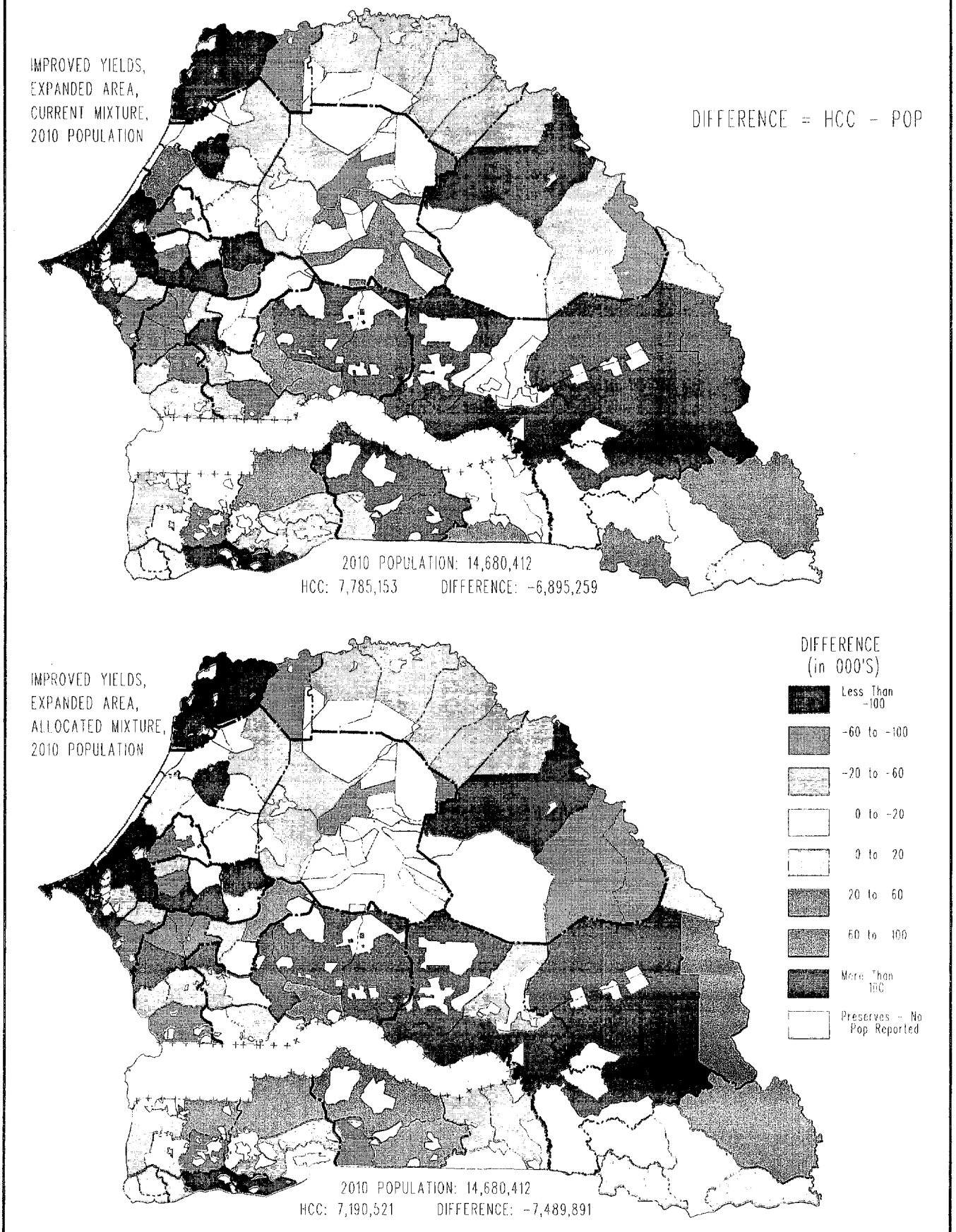


Figure 14b

Table 1. Summary of Development Alternatives and Resulting Human Carrying Capacities

Scenario	GDP-FCFA (000,000's) Cash	Cereal	Total	HCC(a)	DIFF(a,b) (HCC-POP)
1 (cy-ca-cm)	62,589	65,940	128,529	3,880	-2,989
2 (iy-ca-cm)	70,392	91,372	161,764	5,425	-9,255
3 (cy-ea-cm)	85,113	97,233	182,346	5,563	-9,117
4 (iy-ea-cm)	96,293	134,997	231,290	7,785	-6,895
8 (iy-ea-am3)	70,483	170,903	241,386	10,213	-4,467
5 (iy-ea-am1)	127,677	118,724	246,401	7,191	-7,489
6 (cy-ma-am3)	62,671	173,749	236,420	10,341	-4,339
7 (cy-ma-am2)	0	214,317	214,317	13,084	-1,596
9 (iy-ma-am2)	0	284,585	284,585	17,440	2,760

NOTES: Pop 1988 = 6,869; Pop 2000 = 10,540; Pop 2010 = 14,680

(a) all HCC, POP, and DIFF figures in 000's
(b) POP @ 1988 for Diff #1 and @ 2010 for Diff's #2-9

Description of the scenarios:

1 (cy-ca-cm) : Current Yield, Current Area, Current Crop Mixture
2 (iy-ca-cm) : Improved Yield, Current Area, Current Crop Mixture
3 (cy-ea-cm) : Current Yield, Expanded Area, Current Crop Mixture
4 (iy-ea-cm) : Improved Yield, Expanded Area, Current Crop Mixture
8 (iy-ea-am3): Improved Yield, Expanded Area, Allocated Mixture #3
5 (iy-ea-am1): Improved Yield, Expanded Area, Allocated Mixture #1
6 (cy-ma-am3): Current Yield, Maximum Area, Allocated Mixture #3
7 (cy-ma-am2): Current Yield, Maximum Area, Allocated Mixture #2
9 (iy-ma-am2): Improved Yield, Maximum Area, Allocated Mixture #2

where: ea => expansion to non-farmed ag land retains 50% in natural vegetation
ma => expansion to non-farmed ag land retains 15% in natural vegetation
am1 => allocation of both cereal crops and cash crops
am2 => allocation of cereal crops only, NO cash crops grown
am3 => allocation of cereal crops only, with cash crops retaining original areas

APPENDIX B - Memorandum of December 19, 1991,

from Rod Kite, USAID/Senegal

The GIS: Senegal Mission Experience and Application

At the time this pilot project was initiated the USAID/Senegal Mission was in the midst of developing a series of sector analyses to be used as background for preparing its five-year development strategy for Senegal (CPSP). Thus, the HCC "process" gave the USAID/Senegal Mission access to GIS (Geographic Information System) technology which proved to be an extremely valuable tool, and at a time when Mission attention was focused on information needs, analyses and presentation.

The fact that the Mission was so deeply involved in developing the CPSP when results from this analysis began to emerge provided a special advantage which, under other circumstances might not have occurred, because primary focus was on the data and the analysis and not on the technology itself. The high quality of the treatment and presentation of the data underlying the HCC prototype model made it possible for those who were not "subject-specialists" to visualize the importance of the underlying constraints and to see the potentials from both a qualitative (i.e. soil quality, climatic change) and a geographic perspective. Both proved to be useful to the CPSP process because under DFA guidelines (Development Fund for Africa) the Mission was required to develop a strategy which was focused by sector as well as geographically. Since the GIS technology is so well suited to this type of analysis and because its "product" arrived at a time when its applicability was immediately clear, the GIS approach was easily and quickly institutionalized. It has subsequently proven very useful as a way of communicating basic (but sometimes not easily understood) information about the agricultural sector in Senegal.

While the facility with which a mass of spatially detailed resource information could be integrated with population, population distribution, population growth, food requirements and food production potentials across time made it possible to quickly and easily develop alternative scenarios, the power of the device as a communication tool was probably the greatest <u>immediate</u> benefit to the Mission. Once the Mission had completed the CPSP it was presented to and discussed with the GOS and with all of the major donor agencies operating in Senegal. Partially because the maps produced as part of this exercise made the reasoning behind the CPSP choices so clear, the Strategy was immediately and universally accepted as appropriate and necessary. Although it is not correct to attribute changes in other donor programs to either this exercise or to USAID's CPSP, the other donors <u>are</u> now beginning to review their own strategies. (The basis maps and this report were presented to the Prime Minister by the American Ambassador and the Mission Director as part of a presentation of the new Mission Strategy. Copies were also given to the Minister of Rural Development and Hydrology, and copies were given to the Mission's principle collaborators - the World Bank, the European Economic Community (FED) and the French Central Bank for Economic Cooperation. The report itself has been fairly widely distributed

within the GOS and among the many donor agencies in Senegal. Many of these agencies, such as FAO, have also sent copies to their home offices.)

There are three important longer-term benefits from this exercise:

the development of and experience with a GIS within the Mission;

the availability and easy access to information previously available but not especially accessible; and,

given the two, the ability to extend the analysis.

The GIS approach has now been integrated into the Mission's Program Impact Monitoring System and will continue to provide a framework within which the Mission, especially the Natural Resources Office, will develop systems to measure and analyze the impacts of the current strategy.

Rapport Technique

MODELE GEOGRAPHIQUE DE LA CHARGE HUMAINE ALIMENTABLE PAR L'AGRICULTURE SOUS PLUIE: ETUDE PILOTE DU SENEGAL

Préparé sous contrat USAID No AFR-0510-P-IC-7022

Soumis à:

Bureau des Ressources Techniques
Bureau pour l'Afrique
Agence Américaine pour le Développement International
Washington, D.C.

et

Mission USAID/Sénégal
Agence Américaine pour le Développement International
Dakar, Sénégal

Soumis par:

EROS Data Center
National Mapping Division
U.S. Geological Survey
Sioux Falls, South Dakota U.S.A.

Première édition: Mars 1991
Deuxième édition: Mai 1992

MODELE GEOGRAPHIQUE DE LA CHARGE HUMAINE ALIMENTABLE PAR L'AGRICULTURE SOUS PLUIE: ETUDE PILOTE DU SENEGAL

Auteurs:

Donald G. Moore
EROS Data Center - U.S. Geological Survey

G. Gray Tappan, Stephen M. Howard, Ronald W. Lietzow, et C. Andrew Nadeau
EROS Data Center - Hughes STX Corporation

William Renison et Jonathan Olsson
Bureau pour l'Afrique - Agence pour le Développement International

Rod Kite
USAID/Senegal - Agence pour le Développement International

(Traduit de l'anglais par Anne Espinasse-Gellner)

REMARQUES:

Ce document est un rapport interne qui n'a pas été revu ni corrigé pour satisfaire à la nomenclature et aux normes de l'U.S. Geological Survey.

Toute mention de noms de marques ou de fabriquants dans ce rapport est purement descriptive et ne constitue pas un endossement de l'U.S. Geological Survey.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES.....iii

RESUME POUR LA DIRECTION.....iv

1.0 Introduction.....1

2.0 Les Conditions Physiques, Démographiques et Agricoles.....2
2.1 Le Climat.....2
2.2 La Physionomie.....3
2.3 La Population.....3
2.4 L'Agriculture.....4

3.0 L'Emploi d'un Système d'Information Géographique pour l'Analyse sur la Base des Ressources de la Charge Humaine Alimentable.....5

4.0 Le Modèle: Estimer la Charge Humaine Alimentable.....5

5.0 Les Sources de Données.....6
5.1 Les Données de Ressources Naturelles.....7
5.1.1. Les Sols.....7
5.1.2. La Végétation.....7
5.1.3. L'Utilisation et la Couverture des Terres.....8
5.1.4. Le Climat.....9
5.2 Les Données Démographiques.....9
5.3 Les Données des Divisions Administratives.....9
5.4 Les Données Agricoles.....10
5.5 Les Données de Santé.....10
5.6 Les Données Diverses.....11

6.0 La Méthodologie et l'Analyse.....11
6.1 La Situation Géographique des Terres Actuellement Cultivées Sous Pluie.....11
6.2 La Détermination de la Pluviomètrie Annuelle Moyenne.....12
6.3 L'Identification des Terres Pouvant Supporter une Agriculture Sous Pluie.....13
6.3.1. Le Potentiel Inhérent aux Sols.....13
6.3.2. L'Aptitude Liée au Climat.....14
6.3.3. La Carte des Terres Pouvant Etre Cultivées Sous Pluie....14
6.4 Les Utilisations Actuelles et Potentielles des Terres Agricoles..14
6.5 La Susceptibilité des Sols à l'Erosion Eolienne.....15
6.6 La Distribution Actuelle et Potentielle de Cultures Particulières.....15
6.7 Les Ressources Forestières et Pastorales.....17
6.8 La Charge Humaine Alimentable par l'Agriculture Sous Pluie.....18
6.8.1. Les Données et Hypothèses de Départ.....18
6.8.1.1. La Production.....18
6.8.1.2. Les Rendements.....19
6.8.1.3. Les Surfaces Cultivées.....19
6.8.1.4. Les Associations Culturales.....20
6.8.1.5. Les Valeurs des Productions Agricoles.....21

6.8.2. La Charge Portable par les Rendements, les Superficies et les Associations Culturales Actuels.....21
6.8.3. Les Projections avec Acroissement des Rendements, les Superficies Actuelles, et les Associations Culturales Actuelles.....22
6.8.4. Les Projections pour le Modèle avec les Rendements Actuels,des Superficies Accrues et les Associations Culturales Actuelles.....23
6.8.5. Les Projections pour le Modèle avec des Rendements et des Superficies Accrus et les Associations Culturales Actuelles.....23
6.8.6. Les Projections pour le Modèle des Rendements et des Superficies Accrus et les Associations Culturales #1.....24
6.8.7. Les Projections pour le Modèle avec les Rendements Actuels, la Superficie Maximale et les Associations Culturales #3.....24
6.8.8. Les Projections pour le Modèle avec les Rendements Actuels, La Superficie Maximale et les Associations Culturales #2.....24
6.8.9. Les Projections pour le Modèle avec des Rendements et Superficies Accrus et les Associations Culturales #3.....24
6.8.10. Les Projections pour le Modèle avec des Rendements Accrus, la Superficie Maximale et les Associations Culturales #2.....25
6.9 La Densité de Population.....25
6.9.1. L'Actuelle Densité de Population.....25
6.9.2. La Densité de Population Projetée.....26
6.10 La Charge Humaine Portable par rapport à la Population.....27
6.10.1. Rendements, Superficies et Associations Culturales Actuels Par Rapport à la Population de 1988.....27
6.10.2. Rendements Accrus, Superficies et Associations Culturales Actuelles Par Rapport à la Population de 2010.....28
6.10.3. Rendements Actuels, Superficies Accrues et Associations Culturales Actuelles Par Rapport à la Population de 2010.28
6.10.4. Rendements Accrus, Superficies Accrues et Associations Culturales Actuelles Par Rapport à la Population de 2010.28
6.10.5. Rendements Accrus, Superficies Accrues et associations Culturales #1 Par Rapport à la Population de 2010.....28
6.10.6. Rendements Actuels, Superficie Maximale, Associations Culturales #3 Par rapport à la Population de 2010.....28
6.10.7. Rendements Actuels, Superficie Maximale et Associations Culturales #2 Par Rapport à la Population de 2010.....29
6.10.8. Rendements Accrus, Superficies Accrues, Associations Culturales #3 Par Rapport à la Population de 2010.....29
6.10.9. Rendements Accrus, Superficie Maximale, Associations Culturales #2 Par Rapport à la Population de 2010.....29

7.0 Références.....30

Appendice A - Tableaux et Figures.....(Voir la version anglaise)

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

Figure 1. Organigramme de l'Algorithme pour Calculer la Charge Humaine Portable

Figure 2a. Les Associations de Sols au Sénégal

Figure 2b. Les Divisions Pédologiques Majeures du Sénégal

Figure 3. Les Associations Végétales au Sénégal

Figure 4. Les Ressources Forestières et Pastorales du Sénégal

Figure 5. Les Terres Actuellement Cultivées Sous Pluie au Sénégal

Figure 6. La Pluviomètrie Annuelle Moyenne au Sénégal pour 1930-1987

Figure 7. La Pluviomètrie Annuelle Moyenne au Sénégal pour 1950-1979

Figure 8. Les Terres Pouvant Etre Cultivées Sous Pluie au Sénégal

Figure 9. Les Terres Actuellement Cultivées et Potentiellement Cultivables Sous Pluie

Figure 10. La Susceptibilité des Sols à l'Erosion Eolienne

Figure 11. Les Régions Actuellement ou Potentiellement Productrices de Sorgho au Sénégal

Figures 12a et 12b. La Charge Humaine Portable par les Cultures Céréalières Sous Pluie

Figures 13a et 13b. La Densité de Population au Sénégal

Figures 14a et 14b. Rapport de la Charge Humaine Portable par la Production Céréalière Sous Pluie à la Population

Tableau 1. Récapitulatif des Propositions (Modèles) de Développement et des Charges Humaines Portables Correspondantes

55

RESUME POUR LA DIRECTION

MODELE GEOGRAPHIQUE DE LA CHARGE HUMAINE ALIMENTABLE
PAR L'AGRICULTURE SOUS PLUIE: ETUDE PILOTE DU SENEGAL

Définition du Problème

La Mission au Sénégal de l'Agence Américaine pour le Développement International (USAID/Sénégal) avait besoin d'évaluer les potentiels agricoles du Sénégal par culture et par région pour pouvoir effectuer une Analyse du Secteur Agricole (ASA), dans le cadre du Country Program Strategic Plan, ou CPSP (Programme de Plan Stratégique de Pays). L'analyse fut limitée aux céréales et cultures pour l'exportation cultivées sous pluie. Les propositions de développement considérées pour augmenter la production agricole sous pluie consistaient à augmenter les surfaces cultivées, à accroître le niveau de la technologie utilisée (et par ce biais les rendements), ou à combiner les deux alternatives.

Les différentes propositions ont été évaluées en tant que prévisions de la production agricole mesurée en termes de charge humaine portable (CHP) et produit domestique brut (PDB). L'information ainsi obtenue devait être diffusée sous forme de statistiques nationales et supra-nationales et de cartes thématiques donnant les distributions nationales. Les résultats devaient fournir l'information nécessaire à une planification au niveau national.

On s'est intéressé aux questions spécifiques suivantes:

- Quels sont les potentiels pour une production céréalière et celle de cultures de rente?

- Quel est le niveau actuel de réalisation de ces potentiels?

- Quelle augmentation de la production résulterait d'un investissement dans chacune des différentes propositions de développement?

- Quelle est la relation entre la production escomptée et la croissance démographique?

- Comment sont répartis ces potentiels à l'intérieur du pays?

Stratégie

Le Bureau des Ressources Techniques (TR) du Bureau pour l'Afrique à Washington (AID/W) a répondu à la requête de l'USAID/Sénégal pour une assistance analytique. Les accords déjà existants entre le Centre de Données EROS (CDE) de l'U.S. Geological Survey (USGS) et le U.S. Bureau of Census (BUCEN) ont facilité la mise en place d'une réponse au moment opportun. Une rencontre des experts de l'USAID/Sénégal, du TR et du EDC a eu lieu à l'EDC pour clarifier les hypothèses spécifiques, définir le cadre du travail analytique pour

dériver l'information, et stipuler les données nécessaires pour la modélisation.

Les données ont été acquises à partir d'une multitude de sources. De nombreuses données étaient déjà répertoriées sous forme de fichiers digitaux cartographiques produits par AGRHYMET, FEWS, BUCEN et USGS. L'accès à ces données de base fut essentiel à l'accomplissement dans le délai requis de l'analyse. Les autres données disponibles provenaient des études financées par l'AID et furent fournies par USAID/Sénégal.

L'EDC a effectué les analyses au moyen d'un système d'information géographique (SIG) en suivant le cadre analytique prescrit. Ceci a nécessité des interactions fréquentes avec l'USAID/Sénégal et le TR pour discuter toute une série d'hypothèses et de décisions tout au long de l'analyse.

Produits

Les produits initiaux furent donnés à l'USAID/Sénégal dans les trois mois qui suivirent l'initiation du projet. Des cartes de la taille d'une page pour assister le CPSP, des cartes nationales à plus grande échelle et des tableaux de données statistiques furent remis. Une base de données informatiques fut aussi mise en service à Dakar. Les données comprennaient des statistiques globales et des limites/démarquations cartographiques permettant à la Mission USAID de continuer à corriger les paramètres clés dans le contexte des modèles d'interprétation afin d'obtenir les nouveaux résultats pour chacune des propositions de développement.

Les cartes choisies sont présentées dans ce document pour montrer l'existence et l'étendue des ressources naturelles et socio-économiques du Sénégal. Ces cartes et l'information tabulée associée ont servis de données de base pour le modèle analytique. Elles constitueront aussi une référence utile lors de la mise en place du programme de développement agricole, du fait qu'elles donnent des informations relatives à la biodiversité, aux contraintes environnementales, et à la co-existence des ressources. Les cartes présentées dans ce rapport ont été réduites par rapport à leur échelle d'origine au 1:1.000.000 ème.

Les estimations de la charge humaine portable (CHP) et du produit domestique brut (PDB) ont été calculées pour les diverses propositions de développement. La CHP par la production céréalière sous pluie varie de 3,9 million de personnes pour la production actuelle à 17,4 million de personnes si toutes les terres cultivables étaient utilisées. De la même manière, le PDB pour les cultures à l'exportation varie de 0 à 128 milliard de FCFA. La CHP pour deux propositions de développement particulièrement intéressantes était: (1) d'accroître la superficie des terres cultivées pour nourrir 5,6 million de personnes; et (2) d'augmenter les rendements des terres actuellement cultivées pour pouvoir nourrir 5,4 million d'habitants. Les CHP potentielles pour les modèles choisis ont été rapportés à la population actuelle et à celle estimée pour l'an 2010.

L'information des cartes thématiques est donnée sous forme de tableaux statistiques sommés par arrondissement, département, région et pays. Ces

tabulations sont nécessaires si l'on veut poursuivre les analyses au niveau économique quantitatif et au niveau des effets. Les tableaux ont été remis à l'USAID/Sénégal sous forme électronique et imprimée. Seulement les statistiques sommées au niveau national sont inclues dans ce rapport.

Le cadre analytique fut délibérément conçu de façon à servir de point de départ pour les analyses plus approfondies de l'USAID/Sénégal et des Ministères Sénégalais. Des abrégés de la base de données et de plusieurs des modèles de programmation linéaire utilisés pour générer les produits présentés dans ce rapport ont été remis à l'USAID/Sénégal. Ces produits offrent la possibilité d'effectuer des analyses supplémentaires sur place et d'affiner les applications du modèle. Ces techniques servent de véhicule pour la continuation d'une politique de dialogue permanent avec le gouvernement sénégalais et les autres agences donatrices.

Importance de l'Etude

L'USAID/Sénégal a demandé et reçu l'information et le cadre analytique dont elle avait besoin pour prendre des décisions dans le cadre de son programme d'assistance économique de 1991-1996. Notre effort a produit les meilleures informations possibles à partir des données disponibles dans un délai adéquat. La procédure suivie intégrait les connaissances de terrain du personnel de la Mission à celles des experts de l'AID/Washington et des agences clés du gouvernement fédéral américain. Cette coopération entre les différentes agences fut essentielle à l'obtention de résultats crédibles répondant aux besoins particuliers de la Mission.

L'intérêt a long terme pour l'AID dépasse les résultats numériques et cartographiques obtenus spécifiquement pour ce pays. La procédure suivie rompt de façon significative avec les études analytiques efectuées dans le passé par l'AID et pointe dans une nouvelle direction pour les programmes de support du Fond de Développement pour l'Afrique (DFA). L'AID est en train de passer du projet individuel à une approche plus large centrée sur le programme. L'approche du Systéme d'Information Géographique (SIG) en évaluant les divers aspects sectoriels et intersectoriels établit une base permettant d'ordonner par ordre de priorité et de structurer les programmes d'investissements de l'USAID, et de suivre leurs effets sur le terrain.

Le SIG est une méthode efficace pour relier connaissances et bases de données, et pour établir une mémoire institutionnelle. Le système fournit une ligne efficace de communication entre techniciens de ressources et preneurs de décisions. L'utilisation des progrès techniquess devrait encourager une intégration plus large des données dans le processus de prise de décisions pour une exploitation sage et prolongée des ressources d'un pays.

MODELE GEOGRAPHIQUE DE LA CHARGE HUMAINE ALIMENTABLE PAR L'AGRICULTURE SOUS PLUIE: ETUDE PILOTE DU SENEGAL

1.0 Introduction

L'objectif à long terme de l'Agence Américaine pour le Développement International (USAID) au Sénégal est d'aider ce pays "à atteindre son but d'autonomie alimentaire, c'est-à-dire à être capable de nourrir sa population à partir de la production nationale et du commerce extérieur même en période de sécheresse" (USAID, 1987). Au programme de la Mission s'inscrivent des projets de diversification et d'augmentation de la production de céréales.

De tels projets contribuent à l'augmentation de la production alimentaire du Sénégal en valeur absolue. Mais ce pays, comme la plupart des pays africains sub-sahariens, en fait connaît un déclin à long terme de la production alimentaire par habitant puisque la croissance démographique y surpasse la croissance agricole. Cette tendance s'observe actuellement en dépit d'un accroissement significatif des superficies cultivées au cours des dernières décennies. Si le Sénégal veut progresser de façon significative vers son but d'autonomie alimentaire, il doit sérieusement analyser ses ressources physiques et ses options en matière de politique socio-économique, et agir rapidement pour surmonter les principaux obstacles. Si l'on veut étudier les différentes possibilités de réduire l'écart entre la quantité de nourriture produite et la demande d'une population sans cesse croissante, on doit d'abord évaluer le potentiel des ressources de base du Sénégal afin de pouvoir établir une limite supérieure réaliste de la charge humaine alimentable par ce pays et de pouvoir identifier quelles mesures auront les meilleurs résultats.

Les estimations au niveau national du potentiel agricole et de la charge humaine portable du point de vue des ressources de la terre d'un pays ont souvent été tirées de cartes très générales à petite échelle (typiquement 1:5.000.000 ème) donnant les sols, la végétation, l'utilisation des sols et les précipitations. Dans la plupart des cas, ces données générales sont les seules qui soient disponibles dans le cas d'une couverture synoptique nationale. Les analyses et conclusions dérivées de ces cartes représentent des généralisations grossières. La Commission Economique pour l'Afrique des Nations Unies a reconnu que les données portant sur les ressources nationales et l'environnement sont, lorsqu'elles sont disponibles, au mieux très rudimentaires (World Bank, 1989a). Quand c'est possible, la gestion des ressources et la planification doivent être établies sur des banques de données solides donnant des estimations correctes de la qualité et de l'emplacement des ressources individuelles (AAAS, 1983).

L'information de base concernant les ressources du Sénégal s'est accrue de façon substantielle en 1986 lors de la publication des résultats du projet sur 3 ans financé par l'USAID d'inventaire intégré des ressources (Stancioff, Staljanssens, et Tappan, 1986). Au niveau national, des cartes détaillées des ressources ont été produites pour le Plan National de l'Aménagement du Territoire (PNAT), elles comprennaient aussi des inventaires géologiques, hydrologiques, pédologiques, de la végétation et de l'utilisation des terres. La banque de données des ressources au Sénégal est l'une des plus détaillées

et des plus complètes pour l'Afrique sub-saharienne. Malgré cela, le principal problème a été le manque de savoir faire pour relier cette information concernant les ressources à la gestion de ces ressources, pour traduire ces données en termes économiques et pour interpréter l'information spatiale multisectorielle de façon compréhensible.

L'USAID/Sénégal a récemment accompli un énorme progrès en intégrant l'information portant sur les ressources naturelles dans ses efforts d'évaluation des projets et de planification stratégique. Dans le cadre de la préparation du CPSP (Plan Stratégique du Programme Pays), la Mission a initié une étude pour déterminer l'impact des différentes hypothèses de développement sur la charge humaine alimentable à partir de la production agricole sous pluie. a Mission a requis l'assistance technique du EROS Data Center (EDC) de l'U.S. Geological Survey (USGS) et du Bureau USAID pour l'Afrique, Bureau des Ressources Techniques (AFR/TR) pour l'aider à interpréter et à intégrer les données géographiques multisectorielles et l'aider à construire un modèle utilisant un Système d'Information Géographique (SIG).

Le but de la présente étude était d'effectuer une étude du pays au niveau de la planification portant sur les relations existantes et projetées sous les différentes hypothèses de développement entre la charge humaine alimentable et l'agriculture sous pluie. Ceci signifiait rapporter la situation présente de l'agriculture sous pluie et les situations potentielles sous les diverses hypothèses de développement à la population actuelle et projetée. Le modèle est basé sur les ressources et compte énormément sur un inventaire détaillé et intégré des ressources du Sénégal. L'étude s'efforce de fournir des réponses et des directives pour l'Analyse du Secteur Agricole (ASA) par la Mission, laquelle fait partie du CPSP (Plan Stratégique du Programme de Pays).

Parmi les questions de base concernant le développement de l'agriculture, on compte: la Mission doit-elle continuer à fournir une aide majeure au secteur agricole?; quelles sont les possibilités d'augmenter la production agricole au Sénégal?; quelle est la charge humaine alimentable par l'agriculture sous pluie?; quelle est la superficie de terres arables encore en friche au Sénégal?; le Sénégal peut-il réduire de façon significative le manque de nourriture dans le contexte d'une population sans cesse croissante?; quel est le potentiel pour un développement agricole prolongé au moyen d'une gestion améliorée des ressources naturelles?; quelles seraient les conséquences de ne rien faire pour augmenter la généralisation de la pratique d'une agriculture auto-supportive?; quelles sont les tendances et relations prévues (pour l'année 2010) entre les différentes possibilités de production de nourriture et la demande pour cette nourriture d'une population continuellement croissante?; quelles sont les limites de l'expansion agricole compte tenu de la nécessité de préserver la biodiversité des écosystèmes naturels du Sénégal?

2.0 Les Conditions Agricoles, Physiques et Démographiques

2.1 Le Climat

Bien que le Sénégal soit un pays relativement petit couvrant 196.722 km^2 (NGS, 1990), il s'étend sur trois zones écologiques différentes, sahélienne, soudanienne et guinéenne. Ces régions bioclimatiques résultent de différences

extrêmes de la pluviométrie annuelle entre la zone semi-aride au nord (200 mm de pluies annuelles en moyenne entre 1950 et 1979) et la zone bien arrosée au sud (1500 mm). La Gambie forme une enclave de 11.295 km^2 le long du fleuve Gambie dans la zone soudanienne. La pluviométrie annuelle est presque entièrement limitée à la saison estivale humide qui dure jusqu'à six mois au sud et seulement trois mois au nord. Comme beaucoup de ses voisins sahéliens le Sénégal souffre de précipitations extrêmement variables. Alors que les pluies peuvent en quantité approcher la normale pour une certaine année, elles peuvent fortement en différer par les dates où elles ont débuté ou se sont terminées ou par leur périodicité, surtout dans le centre et le nord du Sénégal. De telles variations désorganisent complètement les pratiques culturales et peuvent engendrer des rendements catastrophiquement bas.

2.2 La Physionomie

La topographie du Sénégal est relativement plate sauf pour le massif modérément élevé du sud-est. La plupart du pays est formé d'un bassin d'effondrement à sédiments tertiaires. Il y a quatre fleuves principaux qui coulent vers l'ouest et se jettent dans l'Océan Atlantique, le Sénégal, le Saloum, la Gambie, la Casamance. Ils sont larges avec de nombreux méandres et de vastes estuaires.

Du point de vue géologique le Sénégal comprend deux structures primaires. La première, au sud-est, correspond à un relief élevé et disséqué composé de roches paléozoïques et précambriennes plissées et faillées. Il s'agit là des roches du "Socle Africain", essentiellement des quartzites, des granites et des schistes granitisés. La seconde constitue toute la partie occidentale et le nord-est du pays. Il s'agit de la formation du "Continental Terminal" couvrant de loin la majeure partie du pays. La couche sédimentaire est composée de grès hétérogènes argileux d'épaisseur variable. Elle forme un bas plateau et des plaines recouvertes par des sédiments apportés par le vent, des alluvions et ici et là par des affleurements latéritiques (Stancioff, Staljanssens et Tappan, 1986).

2.3 La Population

La population du Sénégal est estimée (1988) à 6.88 millions d'habitants avec un taux de croissance annuelle de 2.7% (République du Sénégal, 1988). Le taux de croissance a été relativement stable depuis le premier recensement national de 1976. Environ 61% de la population est rurale et la majorité des gens dépendent de l'agriculture pour leur subsistance.

Alors que le taux de croissance globale de la population est stable, il diffère de la population urbaine à la population rurale. La croissance démographique urbaine était en moyenne de 3.83% sur les 12 ans séparant les recensements de 1976 et 1988, tandis que la population rurale augmentait en moyenne de 2.07%. Ceci suggeste une migration importante et continuelle de la population rurale vers les villes (République du Sénégal, 1988). En conséquence la distribution de la population sénégalaise devient de plus en plus biaisée. Les régions du centre ouest croissent aux dépens du reste du pays. Et ceci se produit en dépit des efforts du Gouvernement Sénégalais pour décentraliser les industries de la Région de Dakar vers les autres Régions.

A mesure que la population globale augmente, la densité de population elle aussi augmente. En 1976, il y avait en moyenne 25 personnes au kilomètre carré. En 1988, il y avait 35 personnes au kilomètre carré. La répartition inégale de la population fait que six départements administratifs avaient plus de 100 habitants au kilomètre carré en 1988 (République du Sénégal, 1988).

La population sénégalaise est composée d'au moins 12 groupes éthniques, les principaux étant: Wolof, Serer, Toucouleur, Manding, Diola et Peul. Les Wolof constituent une majeure part de la population, plus d'un tiers du total. En dépit de leur diversité, une certaine harmonie règne au sein des peuples sénégalais (Arid Lands Information Center, 1980).

2.4 L'Agriculture

L'agriculture est l'activité économique dominante du Sénégal employant environ 70% des travailleurs. Elle consiste essentiellement à cultiver sous pluie des cultures dont le cycle végétatif coïncide avec la courte durée de la saison humide. Les types de cultures et leur distribution sont étroitement corrélés à la quantité, la répartition et la fréquence des pluies. Les cultures dans la moitié nord du pays sont particulièrement sujettes aux effets de pluies irrégulières et à la sécheresse. En plus de l'agriculture sous pluie, deux autres types d'agriculture traditionnelle sont pratiqués. L'un exploite l'inondation par les eaux de ruissellement des bas fonds. Ce type se rencontre dans le sud humide et est associé à la culture du riz. Le second consiste à l'agriculture de décrue et est essentiellement associé au fleuve Sénégal. Une agriculture non traditionnelle par irrigation est aussi pratiquée principalement le long du fleuve Sénégal là où l'eau est disponible toute l'année (Pélissier, 1983).

L'agriculture joue un rôle essentiel à la fois pour l'économie nationale et en tant que fournisseur national de nourriture. L'agriculture sous pluie produit des cultures de rente, essentiellement l'arachide et des cultures vivrières principalement le millet et le sorgho. L'économie a virtuellement dépendu de l'arachide pendant des décennies, celle-ci étant presque uniquement cultivée pour l'exportation. Les conditions climatiques et le cours mondial de l'arachide sont les facteurs dominants déterminant la balance du commerce du Sénégal. Il existe un manque chronique de vivres pour le pays et la plupart de ceux-ci doivent être importés pour satisfaire les besoins alimentaires de la population.

Les performances du secteur agricole et par conséquent la santé économique du Sénégal ont été pauvres depuis l'indépendance du pays en 1960. D'après la Banque Mondiale (1989b), la cause de ces pauvres performances peut être attribuée à de mauvaises politiques agricoles, à des ressources naturelles médiocres, à de mauvaises conditions climatiques, au choc des prix de l'énergie des années 70, au taux d'accroissement démographique élevé et à la chute des cours mondiaux. L'accroissement rapide de la population exacerbé par les migrations internes a accéléré la déforestation, a diminué l'utilisation des périodes de jachère et a entrainé la dégradation des sols.

3.0 L'Emploi d'un Système d'Information Géographique pour l'Analyse sur la Base des Ressources de la Charge Humaine Alimentable

Pour pouvoir analyser la charge humaine alimentable sous diverses hypothèses de développement agricole il est nécessaire d'intégrer et de corréler des données multi-sectorielles socio-économiques et physiques. Sur le plan physique, les atouts des ressources nationales, à savoir sols, végétation, climat, et leurs limites doivent être évalués. Sur le plan socio-économique, les données démographiques, les pratiques culturales et d'utilisation des sols, les infrastructures, les données de prix des denrées alimentaires, et les besoins alimentaires doivent être intégrées. Ces données disparâtres ont toutes une caractéristique commune qui les relie les unes aux autres: elles peuvent être définies dans un système géographique de référence et se prêtent par conséquent à une analyse géographique.

La démarche suivie a consisté à tirer parti des techniques automatisées pour entrer, stocker, manipuler, analyser et représenter l'information à références géographiques. Le SIG est un système à base informatique comprennant ordinateur, logiciel, et graphes capables d'intégrer et d'analyser des couches de données multiples. On a utilisé un SIG pour rassembler et analyser les données spatiales détaillées recueillies pour cette étude. Les systèmes de traitement choisis pour cette étude étaient ARC/INFO et PC-ARC/dBASE, tous deux des logiciels généraux pour système d'information géographique.

Un SIG offre l'avantage supplémentaire de pouvoir contribuer aux processus de planification, modèlisation et de conception des politiques d'une organisation. Un SIG est particulièrement approprié pour répondre à diverses questions conditionnelles qui ne peuvent être facilement visualisées par aucun autre moyen. En changeant quelques-unes des hypothèses de base contribuant au modèle, on peut immédiatement voir les conséquences. Cette flexibilité peut devenir particulièrement intéressante lors des discussions avec l'administration sénégalaise pour confirmer les résultats de cette étude.

Du point de vue administratif un SIG peut rassembler en un seul lieu toutes les ressources informatiques d'une organisation. Ceci peut accroître la mémoire institutionelle de l'organisation au-delà des changements de personnel.

4.0 Le Modèle: Estimer la Charge Humaine Alimentable

Le modèle pour calculer la charge humaine alimentable fut développé en collaboration par le personnel technique de l'USAID/Sénégal, du Bureau de l'USAID pour l'Afrique et l'USGS. La première ébauche du modèle fut étudiée et modifiée par des experts respectivement de l'agriculture, du développement et des ressources naturelles du Sénégal.

Le but de l'étude était de développer et d'utiliser un modèle qui estime la charge humaine que la production céréalière sous pluie peut nourrir. Le modèle devait avoir une portée nationale mais rester capable d'intégrer des données statistiques et cartographiques détaillées. On doit souligner que le modèle n'estime que la charge humaine nourrissable par la production céréalière sous pluie. Par conséquent sont exclus d'autres types importants

d'agriculture, à savoir, les cultures irriguées, les cultures de décrue et les cultures maraîchères. Sont aussi exclus le bétail pour la production de vivres et la pêche.

L'agriculture sous pluie est actuellement la plus importante activité agricole au Sénégal à la fois du point de vue économique et alimentaire. On estime que 80% des besoins calorifiques du régime alimentaire de base sénégalais proviennent des céréales (Cogill et al., 1989). Ainsi du point de vue alimentaire, le modèle décrit compte pour 80% de la charge humaine portable/alimentable par toutes les sources de nourriture.

La charge humaine portable est définie comme la production annuelle totale de calories d'une région agricole particulière divisée par les besoins annuels en calories de la consommation humaine. On a utilisé pour cette étude un chiffre minimum requis de 2300 calories par jour et par personne (Cogill et al., 1989) dont 80 % provenant des céréales (1840 calories).

De façon à évaluer la charge humaine actuellement et potentiellement alimentable par l'agriculture sous pluie, il était nécessaire de considérer la situation actuelle de la production alimentaire au Sénégal et les diverses possibilités de développement. Il existe essentiellement deux façons d'augmenter la production agricole: a) soit augmenter les rendements par l'emploi d'une technologie plus avancée, b) soit accroître la superficie mise en culture. Ces deux possibilités ont été étudiées séparément ou en combinaison, dans les deux cas un certain nombre d'hypothèses de passage s'avéraient nécessaires pour la construction du cadre analytique.

Estimer la charge humaine portable par les niveaux de production actuels nécessite l'entrée de données telles que l'emplacement et la superficie de chaque culture, les rendements meuniers, les pertes après récolte, les chiffres de production et de rendement par culture, la valeur calorifique des principales cultures vivrières, les pratiques agricoles de jachère et les besoins de la consommation humaine. Les estimations de la charge portable pour les divers scénarios augmentant la production agricole reposent presque entièrement sur les interprétations pédologiques et climatiques identifiant les zones où les cultures peuvent ou ne peuvent pas pousser. Il était par conséquent nécessaire de pouvoir se fier aux sources de données multiples et de pouvoir les intégrer. La Figure 1 présente les sources de données, les processus utilisés pour intégrer et analyser les données et les produits résultants.

5.0 Les Sources de Données

Les données requises par le modèle se répartissent en six groupes distincts: les ressources naturelles, la démographie, l'infrastructure administrative et politique, l'agriculture, la santé et les autres données. Le présent chapitre décrit l'origine et les caractéristiques de chacun de ces types de données.

5.1 Les Données de Ressources Naturelles

5.1.1 Les Sols

Les données pédologiques comptent parmi les ressources naturelles essentielles en raison de leur importance pour les interprétations agricoles. Il y a eu deux enquêtes pédologiques du Sénégal, l'une faite par l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer) (Maignien, 1965) en utilisant une échelle au 1:1.000.000 ème et l'autre achevée en 1986 par la South Dakota State University (SDSU) à une échelle plus précise au 1:500.000 ème (Stancioff, Staljanssens, et Tappan, 1986). Les deux enquêtes ont toutes deux utilisées le système français/ORSTOM de classification pédologique. L'étude rapportée ici a utilisé les résultats de l'enquête détaillée réalisée par SDSU et financée par l'USAID/Sénégal.

La carte pédologique produite par SDSU (Carte Morpho-pédologique du Sénégal) fut préparée à partir d'interprétations manuelles des images Landsat du Sénégal. Les images multidatées du Scanner Multispectral de Landsat (MSS) acquises dans les années 1970 et le début des années 80 ont servi à délimiter les types physionomiques, lesquels furent ensuite subdivisés en association de sols. Les caractéristiques physiques et chimiques de chaque association pédologique ont été répertoriées lors d'enquêtes de terrain réalisées sur l'ensemble du pays de 1982 à 1985. Les délimitations pédologiques furent vérifiées ou corrigées à l'aide d'enquêtes conventionnelles.

Il en a résulté un inventaire détaillé des sols nationaux en plus d'une masse considérable de données associées portant sur les attributs pédologiques. Ces données correspondent à 11 paramètres pédologiques de premier ordre (par exemple, pente, profondeur du sol, texture) et 10 paramètres de second ordre (dont la perméabilité, la capacité de rétention en eau, la susceptibilité à l'érosion éolienne, la fertilité chimique). Ces fichiers de données constituent la base des interprétations agricoles. La taille minimum d'un polygone sol est d'environ 4 kilomètres carrés.

Afin de pouvoir utiliser ces données pédologiques dans un SIG, les cartes et les attributs associés aux sols ont été numérisés par EDC au moyen de ARC/INFO. La Figure 2 donne la densité spatiale de la couverture pédologique suite à la numérisation.

5.1.2. La Végétation

Les discussions concernant le développement agricole doivent prendre en considération les conséquences de la mise en culture (en particulier son extension) sur la végétation naturelle. Les plans de développement agricole doivent en effet être jugés en fonction de la nécessité de préserver l'environnement naturel et de maintenir la biodiversité de la région. Le Gouvernement du Sénégal a fait de gros efforts depuis l'indépendance pour préserver d'importantes portions du territoire en tant que réserves naturelles. La présente étude prend en considération l'étendue actuelle et l'état des formations naturelles végétales.

Avant l'enquête par SDSU (Stancioff, Staljanssens et Tappan, 1986), les cartes nationales de la végétation du Sénégal étaient à la fois périmées et trop générales. La meilleure part de ces inventaires anciens fut publiée en 1962 dans la série de cartes de la végétation de l'Afrique Occidentale Tropicale (Roberty, 1962). Des enquêtes plus récentes, elles aussi à financement français, ont donné des cartes détaillées de certaines régions du Sénégal, mais n'ont pas couvert la totalité du territoire national.

L'enquête de SDSU a résulté dans la publication d'une carte détaillée de la couverture végétale: Carte du Couvert Végétal au 1:500.000 ème (Stancioff, Staljanssens et Tappan, 1986). La procédure cartographique était la même que celle employée pour la carte pédologique décrite ci-dessus. La carte de la végétation est basée sur une classification physionomique des types de végétation, utilisant la convention "Yangambi" pour la nomenclature de la végétation tropicale africaine (Trochain, 1957; Monod, 1963). De plus, la carte de la végétation donne des informations floristiques, subdivisant les formations végétales en groupements. Ainsi, la carte est fondée sur un système combinant physionomie et floristique.

La carte de la végétation date déjà puisque elle est dérivée des images Landsat recueillies au plus tard en 1982, et sur des enquêtes de terrain réalisées de 1982 à 1985. Néanmoins, elle constitue l'une des meilleures références spatiales disponibles du couvert végétal. On estime que la végétation a légèrement changé dans les régions soumises à une forte pression de l'agriculture. On estime toutefois que ces changements n'ont aucun effet significatif sur les résultats de la présente étude réalisée à l'échelle nationale.

Comme la carte des sols, la carte de la végétation a été numérisée au EDC pour être utilisable dans le SIG. Une carte généralisée de la couverture végétale est présentée dans la Figure 3.

La carte de la végétation produite par SDSU donnent les forêts et les pâturages officiellement protégés. Les limites ont été numérisées par l'EDC en tant que couche individuelle pour être utilisée dans le modèle. On a aussi produit une carte généralisée à partir de la banque de données de la végétation pour la présente étude. Cette carte est intitulée "Les Ressources Forestières et Pastorales du Sénégal", elle est présentée dans la Figure 4.

5.1.3. L'Utilisation et la Couverture des Terres

L'enquête par SDSU a produit une Carte de l'Occupation et l'Utilisation du Sol du Sénégal au 1:500.000 ème. Les délimitations des différentes utilisations/couvertures sont essentiellement les mêmes que celles des formations végétales de la carte de la végétation, mais associées à différents polygones donnant l'information sur les attributs. Les attributs relatent les différents types de pratiques culturales et les associations de cultures pratiquées dans le début des années 80.

L'information donnant l'utilisation et la couverture des terres est une couche essentielle du modèle considéré. Ce type d'information spatiale fait souvent défaut aux enquêtes sur les ressources nationales des pays africains. Pour

notre étude, elle a été la clé permettant de repérer et de mesurer les surfaces cultivées sous pluie. Nous n'avons pas utilisé l'information concernant les associations culturales fournie par l'enquête de SDSU, lui préférant les données plus récentes (1986-1989) dérivées des statistiques rapportées par l'administration sénégalaise. Les données d'attributs associés à l'utilisation et la couverture des terres ont été encodées par l'EDC et attachées au polygone du couvert végétal.

5.1.4. Le Climat

Les pluies qui apportent l'humidité disponible dans les sols est un facteur limitant très important de la croissance de la végétation naturelle et cultivée dans l'environnement de l'Afrique Occidentale. Comprendre les régimes climatiques de la région en particulier la pluviomètrie est absolument essentiel si l'on veut considérer les possibilités de production actuelle et potentielles. La pluviomètrie joue un rôle primordial pour déterminer "quelle culture peut pousser où".

Le modèle a utilisé les données de pluviomètrie fournies par le Centre Régional AGRHYMET (Agriculture-Hydrologie-Météorologie). Des condensés de la pluviomètrie sur dix jours en provenance de chaque station météorologique du Sénégal ont servi au calcul des statistiques de la pluviomètrie annuelle moyenne au Sénégal. La présente étude a analysé les données de pluviomètrie pour la période allant de 1930 à 1987. Calculs et interprétations de ces données sont discutés plus loin.

5.2 Les Données Démographiques

Les données démographiques ont été ajoutées au cadre analytique à des fins de comparaison de la population actuelle et projetée aux estimations de la charge humaine portable. Les données démographiques ont été dérivées des résultats préliminaires du recensement de 1988 (République du Sénégal, 1988). Des taux de croissance prélimminaires pour la période actuelle et projetés pour le futur furent déduits par le Bureau Américain du Recensement (BUCEN) de la comparaison entre les chiffres du premier recensement national de 1976 et les chiffres préliminaires du recensement de 1988. Les chiffres de population et les taux de croissance sont rapportés par arrondissement, une unité administrative du quatrième ordre. Les statistiques démographiques ont ensuite été subdivisées en deux catégories urbaine et rurale. Pour notre étude nous n'avons utilisé que les totaux (urbain + rural) par arrondissement. Les calculs et les projections dérivées de ces données sont discutés plus loin.

5.3 Les Données des Divisions Administratives

Le Sénégal est divisé selon une hiérarchie d'unités politiques, le résultat de la réorganisation interne qui a suivi l'indépendance. Les grandes lignes de cette hiérarchie administrative sont décrites ci-après suivant la nomenclature française officielle. A l'intérieur de ses limites d'état (limites de premier ordre), le pays est divisé en 10 régions (limites de second ordre); les régions sont subdivisées en départements (limites de troisième ordre); la subdivision suivante est l'arrondissement (quatrième ordre); les

arrondissements sont ensuite divisés en communauté rurale (cinquième ordre); la communauté rurale est composée de terres administrées par les villages (sixième ordre).

Plusieurs des données recueillies pour cette étude l'ont été par arrondissement. La carte administrative officielle (Carte Administrative) du Sénégal fut produite par un effort conjoint du Gouvernement du Sénégal et du Programme de Développement des Nations Unies (UNDP-DAT, 1984). Les tracés administratifs ont été numérisés jusqu'à l'arrondissement (il y a 93 arrondissements au Sénégal).

5.4 Les Données Agricoles

Les données agricoles qui ont été utilisées pour cette étude se répartissent en deux groupes: les statistiques agricoles et les prix. Les statistiques agricoles ont constitué l'une des principales sources ayant servi à déterminer la charge humaine portable actuelle ou projetée. La charge humaine portable fut calculée en rapportant les quantités de vivres produites aux besoins de la consommation humaine. Les données agricoles utilisées provenaient du Ministère de l'Agriculture (République du Sénégal, 1987, 1988, 1990). Ces données consistaient en statistiques sur les produits agricoles par arrondissement pour les années 1986, 1987 et 1989. Ces statistiques que ce soit pour des cultures vivrières ou pour des cultures pour l'exportation particulières comprennaient les rendements, les superficies cultivées et la production. Le pourcentage de chaque culture dans les associations culturales a été dérivé des données brutes. Les pertes après la récolte pour l'ensemble des cultures furent estimées à 15% (Cogill et al., 1989). Les taux meuniers furent déterminés et reportés par région (Martin, 1988).

On n'a pas relaté les régions laissées en jachère une année donnée, ce qui constitue un indicateur de l'intensité d'utilisation des cultures. Le facteur jachère a été estimé à partir de photographies aériennes des principales régions agricoles du Sénégal et des statistiques agricoles rapportées par le Gouvernement du Sénégal (discussions supplémentaires ci-après).

Les données de prix agricoles étaient celles déjà utilisées par l'USAID/Sénégal; à l'origine elles proviennent des Rapports Mensuels des Prix du CSA. Ont été utilisés pour cette étude les prix moyens à la production en FCFA (CFA Francs) par kilogramme pour la période allant d'octobre 1989 à juillet 1990. Ces données prix sont spécifiques de chaque culture et rapportées par région.

5.5 Les Données de Santé

Le seul aspect des données de santé requis par cette analyse était les besoins de l'alimentation humaine. Ces données ont été tirées de l'Analyse des Besoins Alimentaires réalisée par l'USAID (Cogill, 1989). L'analyse donne les besoins alimentaires minimum requis pour le Sénégal (2300 calories par personne par jour), et le pourcentage de calories, calculé comme une moyenne nationale, provennant des céréales (estimé à 80%).

5.6 Les Données Diverses

Plusieurs types de données polygonales, linéaires et ponctuelles ont aussi été intégrés dans les cartes finales pour servir de références aux cartes thématiques. Il s'agit des routes, cités, villes, rivières, lacs et autres points de repère géographique. La plupart de ces structures de repérage ont eté numérisées à partir de Operational Navigation Charts (ONC) et de la carte: Sénégal: Carte au 1:1.000.000 ème (IGN, 1980), une carte routière d'usage commun.

6.0 La Méthodologie et l'Analyse

Cette section décrit les différentes étapes de la procédure suivie pour dériver les estimations finales de la charge humaine alimentable par la production céréalière sous pluie (cf. Figure 1). Elle décrit la démarche suivie pour intégrer toutes les différentes sources de données mentionnées ci-dessus. Les hypothèses faites au niveau des données ou des opérations effectuées sur les données sont stipulées.

Les produits intermédiaires cartes et tableaux sont décrits. Ces produits de transition sont dérivés les uns des autres pour la production des résultats finaux. La discussion ne s'appesantit pas sur les séquences de commandes et de processus ARC/INFO utilisés pour produire ces cartes et ces tableaux. Dans certains cas toutefois les termes clés de l'analyse géographique sont mentionnés lors de la description du processus de compilation des cartes.

6.1 La Situation Géographique des Terres Actuellement Cultivées Sous Pluie

Une des premières nécessités après la collecte des données et la numérisation de la carte source fut de répondre à la question: Où sont situées les terres actuellement cultivées sous pluie au Sénégal? Ce qui signifiait identifier et délimiter toutes les régions désignées comme à "agriculture sous pluie". L'information descriptive ou statistique décrivant une unité cartographique sera dans la suite de ce rapport désignée par le terme "attribut". Ces informations, initialement attributs de la carte de l'utilisation et de l'occupation du sol (Section 5.1.3.) ont été associées à la carte du couvert végétal (cf. Section 5.1.2). La procédure a consisté à utiliser ARC/INFO pour identifier les polygones d'agriculture sous pluie parmi tous les polygones de couvert végétal. Tous les polygones appariés aux attributs désirés ont reçu une couleur (jaune sur la carte originale). Tous les autres polygones ne correspondant pas aux attributs désirés ont reçu une seconde couleur, gris.

Le résultat fut une nouvelle carte intitulée "Terres Actuellement Cultivées Sous Pluie Au Sénégal" (Figure 5). Des structures de référence ont été ajoutées à la carte pour accroître son utilité. Ces structures comprennent les réserves naturelles, les limites administratives jusqu'au niveau de l'arrondissement, les routes et les villes.

Plusieurs hypothèses ont dû être faites au sujet des données et de la carte dérivée. En premier lieu, les polygones agricoles ont été délimités sur la base de données recueillies au plus tard en 1982. Par conséquent le terme "actuel" réfère à l'information disponible la plus récente. On a postulé que

les superficies cultivées sous pluie et leurs emplacement n'ont pas fondamentalement changé pour l'échelle de cette carte entre 1982 et 1988, 1988 étant l'année désignée comme la référence actuelle.

La carte exclut les cultures irriguées, les cultures de décrue ou le maraîchage, ces types d'agriculture appartenant à la classe colorée en gris. L'agriculture sous pluie inclut à la fois des cultures vivrières et des cultures de rente. Les champs individuels et les terres en jachère n'ont pas été individuellement repérés lors de l'enquête originelle et ne peuvent donc pas être représentés ici. Les terres en jachère sont considérées comme faisant parti de l'agriculture sous pluie.

6.2 La Détermination de la Pluviométrie Annuelle Moyenne

La distribution des cultures est très liée au climat. En Afrique tropicale, la pluviomètrie est un des principaux facteurs limitants. La répartition saisonnière des pluies et leur abondance déterminent la production agricole. Toutes deux varient fortement d'une année à l'autre.

La procédure suivie pour cette étude fut de produire une série de cartes (Figure 6) récapitulant les quantités annuelles moyennes de pluies tombées au Sénégal pendant les six dernières décennies de 1930 à 1987. Des cartes supplémentaires furent produites, donnant les pluviomètries moyennes annuelles sur les 30 ans de 1950 à 1979 (Figure 7).

Les données de pluviomètrie ont été fournies par le Centre Régional AGRHYMET. On a d'abord calculé les moyennes décadaires (sur 10 ans) à partir des données pluviomètriques sur 10 jours rapportées par chaque station météorologique à l'aide de RAINMAN, un système d'exploitation des banques de données pluviomètriques développé pour le Projet d'Alerte Précoce des Famines (FEWS) financé par l'AID. Une surface de valeurs à trois dimensions fut ensuite calculée au moyen d'une interpolation automatée des données de pluviomètrie à référence géographique ponctuelle effectuée par le logiciel SURFER de génération de surface et de représentation graphique. L'interpolation était basée sur une procédure utilisant l'inverse de la distance au carré et créant une grille complète de valeurs. La taille des mailles fut fixée à 1/10 ème de degré de longitude et de latitude. L'étape finale a consisté à convertir ces valeurs de précipitations en lignes ou contours de même valeur pour produire des isohyètes de précipitations annuelles moyennes ayant un pas de 100 mm.

Dans un esprit de simplicité seulement un jeu d'isohyètes de 100 mm est montré sur les cartes. Les critères ayant servi à les choisir correspondaient aux besoins en pluie spécifiques de certaines cultures (par exemple, il est généralement reconnu que l'arachide et le mil précoce demandent au minimum 400 mm). Les cartes décadaires donnent les stations météorologgiques qui ont fourni les données ponctuelles pour la production de chaque carte. La série de cartes de pluviomètries annuelles décadaires (Figure 6) illustre la dérive accentuée des isohyètes vers le sud au cours du temps.

Afin de présenter une moyenne à plus long terme, Les cartes de la Figure 7 donnent la pluviomètrie sur les 30 ans de 1950 à 1979. Cette période a été utilisée par d'autres enquêteurs au Sénégal et fut choisie pour le modèle de

la charge humaine portable. Elle allie les années 50 et 60 relativement humides aux années 70 sèches. La présente étude s'est concentrée sur les isohyètes 400 mm et 500 mm. L'isohyète 400 mm (ligne rouge grasse) fut choisi pour délimiter le seuil minimum de l'agriculture sous pluie au Sénégal. L'isohyète 500 mm est donné pour comparaison, comme requis par l'USAID/Sénégal. Finalement, on donne aussi pour comparaison les positions des isohyètes 400 et 500 mm pour chacune des décades.

6.3 L'Identification des Terres Pouvant Supporter une Agriculture Sous Pluie

La pluviomètrie et les sols sont les deux facteurs déterminant si une terre donnée est arable ou non. La pluviomètrie est suffisante sur la majeure partie du Sénégal pour permettre de la cultiver, mais en de nombreux endroits les sols sont trop pauvres ou insuffisamment formés. Cette section décrit la procédure paramètrique suivie pour déterminer le potentiel des sols pour être cultivés sous pluie.

6.3.1. Le Potentiel Inhérent aux Sols

L'étude initiale réalisée par Stancioff, Staljanssens et Tappan (1986) a évalué tous les sols en fonction de leurs aptitudes agricoles. Ces aptitudes ont été estimées à partir d'une évaluation des paramètres caractérisant le sol faite conjointement à celle du régime climatique de la zone dans laquelle il se trouve. Les paramètres pédologiques de premier ordre sont ceux qui sont observés ou mesurés, à savoir, la pente, la texture, la profondeur, la teneur en cailloux, pierres, roches et matériaux grossiers, le drainage, le pH, la salinité, la teneur sodique et l'érosion réelle. Les paramètres de premier ordre sont alors combinés pour produire les paramètres de second ordre. Ceux-ci comprennent la perméabilité, la susceptibilité à l'érosion éolienne ou hydrique, la fertilité chimique, la capacité de rétention en eau, l'irrigabilité potentielle, la capacité à être travaillé, et les possibilités de mécanisation. Des classes d'intervalles ont été préparées pour chaque paramètre lors de l'étude initiale.

La procédure suivie a consisté à examiner tous les paramètres de chaque association pédologique en fonction des données disponibles concernant les régimes climatiques et pluviomètriques du Sénégal, puis à classer chaque sol selon sa capacité à être cultivé sous pluie. Si l'un des paramètres constituait un handicap majeur pour le développement de cultures, l'association pédologique était classée en dessous de modérément adapté. Ainsi, l'association pédologique 0a6 est hydromorphique, faiblement développée, formée sur des matériaux gravelleux dans le centre-est du Sénégal. Elle fut jugée comme étant peu adaptée parce que la profondeur de ce sol appartient à la classe 4 pour ce paramètre, soit trop peu profond pour permettre des rendements acceptables quelle que soit la culture. De plus, le taux de matières organiques et la fertilité chimique sont faibles. Les polygones représentant cette association ont par conséquent été exclus des terres considérées pour une éventuelle expansion agricole.

Les cultures vivrières considérées dans le modèle étaient, le mil, le sorgho, le maïs, le niébé et le riz cultivé sous pluie. Les cultures pour l'exportation étaient l'arachide et le coton. Bien qu'il y ait une certaine

consommation locale de l'arachide, celle-ci a été exclusivement considérée comme une culture à l'exportation dans ce modèle. Il est clair que ces différentes cultures ont des exigences pédologiques distinctes (par exemple, l'archide préfère des sols grossiers aux sols à texture fine). Mais dans l'ensemble les exigences pédologiques sont similaires. Toutes ces cultures se comportent bien sur des sols presque plats ou doucement vallonnés, profonds, de texture moyenne et supplémentés avec des éléments fertilisant (Westin, 1990).

On a seulement considéré le composant majeur d'une association pédologique pour évaluer son aptitude à être cultivée. Le minérai de fer est un élément mineur mais extrêmement important de plusieurs des unités cartographiques puisqu'il rend toute culture impossible. Les inclusions pédologiques mineures non cartographiées (peu appropriées) ont été prises en considération pour définir les possibilités d'expansion agricole discutées plus loin.

Le jugement établissant une association pédologique comme "modérément adaptée" plutôt que "moins que modérément adapté" n'est pas objectif. Cette classification représente une interprétation des paramètres faite par des pédologues ayant une connaissance profonde du Sénégal sur le terrain et une expérience considérable de la taxonomie et des interprétations pédologiques.

6.3.2. L'Aptitude Liée au Climat

Lors de l'évaluation des potentialités agricoles des sols on a pris en considération ce que l'on savait des régimes climatiques et pluviomètriques au Sénégal. Pour être considéré come modérément adapté à l'agriculture, un sol doit recevoir à peu près 400 mm d'eau. La limite nord de l'agriculture sous pluie correspond grosso modo à l'isohyète 400 mm de pluies moyennes annuelles (pour la période 1950-1979; Figure 7). Alors que beaucoup des sols y seraient favorables, le quart nord du Sénégal est exclu de toute considération de mise en culture sous pluie en raison d'insuffisance d'eau. La carte des Terres Pouvant Etre Cultivées Sous Pluie (Figure 8) combine les caractéristiques des sols et des précipitations.

6.3.3. La Carte des Terres Pouvant Etre Cultivées Sous Pluie

La Carte des Terres Pouvant Etre Cultivées Sous Pluies (Figure 8) résulte simplement de la sélection de tous les sols présents dans la banque de données sols ayant été identifiés par l'étude de SDSU comme étant modérément adaptés à l'agriculture. Ces sols ont été colorés en vert tandis que tous les autres sols recevaient la couleur grise.

6.4 Les Utilisations Actuelles et Potentielles des Terres Agricoles

Il était facile de comparer les deux cartes décrites ci-dessus pour établir la relation entre les zones actuelles cultivées sous pluies et les zones d'expansion possible de cette agriculture sous pluie. Pour faciliter la comparaison, on les a combinées pour produire une carte des "Terres Actuellement Cultivées et Potentiellement Cultivables Sous Pluie" (Figure 9). La carte montre 4 types d'utilisations des terres: a) terres actuellement cultivées; b) terres pouvant être cultivées; c) terres actuellement cultivées

mais dont les sols sont moins que modérément adaptés; et d) terres incultes peu aptes à être cultivées.

La carte révèle que certaines zones sont actuellement cultivées alors que leurs sols sont marginalement adaptés à cet usage (colorées en orange). La plupart de ces zones sont situées dans le nord-ouest où sont cultivées des terres recevant moins de 400 mm de pluies annuelles moyennes, le minimum requis par le modèle. Certaines des associations pédologiques dans cette région ont des caractères fortement défavorables à la mise en culture, à savoir des pentes fortes, des restes d'un erg ancien. Ces régions peuvent certainement être cultivées les "bonnes" années, mais le risque d'échec total y est très élevé. Les analyses de la charge portable basée sur "les régions actuelles" définissent ces régions dites "actuelles" comme étant toutes les terres couramment cultivées sous pluie y compris ces zones de production marginale.

La carte en tant qu'instrument de prise de décision ne doit être utilisée que comme indicatrice des utilisations appropriées (ou non) des terres et non comme un document définitif de mise en place.

6.5 La Susceptibilité des Sols à l'Erosion Eolienne

Beaucoup des sols arables (ou non-arables) sont fortement sujets à l'érosion éolienne. Si elle n'est pas proprement protégée, la couche arable est emportée par le vent, d'où un déclin de la productivité. Plusieurs zones dans le "Bassin Arachidier", une région de culture intensive dans le centre- ouest du Sénégal, ont vu une dégradation irréversible due à l'érosion éolienne. Au fur et à mesure que de nouvelles terres sont défrichées et mises en culture, on doit exploiter avec précautions les sols à haut risque d'érosion éolienne.

Bien qu'elle ne soit pas directement liée à l'étude de la charge portable, une carte de la Susceptibilité des Sols à l'Erosion Eolienne (Figure 10) fut dérivée des paramètres de texture de la banque de données pédologiques. Chaque association de sols était classée dans l'un des huit groupes de susceptibilité à l'érosion éolienne. Ces classes furent définies sur la base des conditions existant en absence de couvert végétal. Cette carte n'a pas servi à exclure d'autres terres de la liste des terres cultivables. Elle a plutôt était conçue comme un instrument de planification de l'exploitation des sols et de conservation des sols. Là où les sols sont fortement érodables, on doit adopter des pratiques de maintien des brise-vent, de cultures multiples et de conservation du couvert végétal aussi longtemps que possible.

6.6 La Distribution Actuelle et Potentielle de Cultures Particulières

L'une des analyses finales nécessite qu'avant de calculer la charge humaine alimentable par l'agriculture sous pluie soit déterminée la distribution spatiale actuelle et potentielle des cultures vivrières et pour l'exportation. Par exemple: Où est le sorgho actuellement cultivé et quelle est la production? Où le sorgho pourrait-il-être cultivé sur la base de la pluviomètrie et des sols? On doit répondre à de telles questions pour toutes les cultures considérées par le modèle. Le sorgho cultivé sous pluie est une culture de subsistance de base au Sénégal. Il a été choisi pour illustrer la

procédure suivie pour déterminer la distribution actuelle et potentielle des cultures.

Le sorgho pousse bien sur toute une gamme de sols différant par leur texture et est relativement tolérant aux excès d'eau. Les principales variétés d'Afrique Occidentale (gros mil) demande au moins 700 mm de pluie pendant la saison de croissance pour que les rendements soient acceptables (Traoré, 1983).

La première étape a consisté à identifier les zones actuelles de production du sorgho. Cette identification fut réalisée sur la base des moyennes calculées à partir des statistiques rapportées par le Gouvernement du Sénégal en 1986, 1987, et 1989 (République du Sénégal, 1987, 1988, 1990). Tous les arrondissements rapportant une production de sorgho ont reçu un insigne distinctif. Un tableau des polygones attributs fut créé, donnant tous les arrondissements producteurs ou non producteurs de sorgho. Si la surface cultivée en sorgho dans un arrondissement donné était inférieure à 5% de la surface cultivée totale (toutes les cultures), on a considéré cette surface comme négligeable et que le sorgho n'était pas présent dans cet arrondissement. Chaque polygone agricole (couvert végétal) portant l'insigne distinctif fut alors reconnu comme zone de production de sorgho pour ces arrondissements producteurs.

La seconde étape a consisté à déterminer les zones pouvant produire du sorgho. La procédure étant essentiellement la même que celle consistant à déterminer les zones pouvant être cultivées sous pluie, décrite dans la Section 6.3. Les régions potentielles ont été identifiées sur la base des caractéristiques pédologiques et climatiques favorables. Les sols retenus étaient au moins modérément favorables. Et on a défini la limite nord de ces régions par l'isohyète 700 mm (pour la période 1950-1979). Finalement, les réserves forestières et pastorales ont été repérées dans les couvertures végétales précédentes afin de les exclure des zones de production.

L'étape finale a fusionné les cartes de production actuelle et potentielle de sorgho en une carte combinée; "Les Zones Productrices de Sorgho Actuelles et Potentielles au Sénégal" (Figure 11).

La procédure suivie pour le sorgho fut répétée pour toutes les autres cultures considérées dans le modèle. Les distributions respectives de chacune de ces cultures ne furent pas représentées sous forme de carte mais sous forme de tableaux de polygones attributs associant les polygones agricoles aux cultures par arrondissement.

Les contours géographiques des autres cultures ont été définis sur la base des interprétations de l'aptitude des sols (Section 6.3.1) et de la pluviomètrie annuelle moyenne. Les seuils de pluviomètrie utilisés pour les autres cultures étaient: les arachides et le mil étaient confinés aux régions recevant plus de 400 mm; le maïs était limité aux régions recevant 800 mm ou plus; pour le riz le seuil était de 1000 mm ou plus; le niébé était limité aux zones recevant entre 400 et 700 mm de précipitations. Les positions des isohyètes furent établies sur la base de la pluviomètrie moyenne annuelle pour la période allant de 1950 à 1979. Les seuils de précipitations adoptés pour

chaque culture furent déduits de la comparaison entre les cartes générales de l'UNDP-DAT (1984) donnant les distributions des cultures et les cartes de la pluviomètrie moyenne annuelle préparées par la présente étude.

Du fait des tendances actuelles à la production, les surfaces cultivées en coton et en riz sous pluie et les productions respectives ont été gardées constantes dans toutes les projections. Les chiffres de surperficies, rendements et production étaient dérivés des moyennes par arrondissement des statistiques rapportées par le Gouvernement du Sénégal en 1986, 1987 et 1989. Les réserves forestières et pastorales officielles ont été exclues de toutes les productions.

6.7 Les Ressources Forestières et Pastorales

Les scénarios proposant une expansion des terres cultivées pour augmenter la production agricole doivent prendre en compte les conséquences sur l'environnement naturel. Sur l'ensemble du Continent Africain, l'expansion agricole affecte l'habitat naturel de façon quantitative et qualitative.

Afin de fournir aux administrateurs du project une image des ressources végétales au niveau national, nous avons compilé la carte des "Ressources Forestières et Herbacées du Sénégal" (Figure 4) à partir de la banque de données de végétation (cf. Section 5.1.2). La carte représente une généralisation spatiale et thématique de la banque de données originelle. Les unités de végétation ont été généralisées par le regroupement des groupements végétales (unités floristiques) en formations végétales plus générales (unités physiognomiques). Le nombre ainsi réduits d'unités cartographiques a résulté en un nombre également réduit de polygones (généralisation spatiale). Les limites des réserves forestières et pastorales sont aussi données. Le but de la carte était de donner une image instantanée de la distribution de la végétation naturelle et de déterminer où la végétation naturelle et laquelle serait détruite par l'expansion agricole.

La carte distingue les formations herbacées des formations boisées (forêts). La distinction entre ces deux types de formation est quelque peu arbitraire, quoique les formations herbacées correspondent à des savanes relativement découvertes avec des arbres, arbustes et buissons épars tandis que les formations boisées ont un couvert arboré plus dense. Il n'existe pas de limite réelle entre ces deux formations puisque la végétation naturelle graduellement passe de la savanne clairesemée aux forêts et bois denses à mesure que l'on s'avance vers le sud dans des zones à précipitations plus élevées. La présente étude définit les formations herbacées comme ayant moins de 20% de couvert ligneux, et les formations boisées comme ayant plus de 20% de couvert ligneux. Cette division fut établie sur la base des données de l'enquête originelle (Stancioff, Staljanssens, et Tappan, 1986). D'après cette définition, les formations herbacées peuvent en fait posséder des ressources en bois considérables, et les formations boisées quant à elles peuvent offrir un précieux fourrage (les formations boisées servent de pâture à travers tout le Sénégal).

6.8 La Charge Humaine Alimentable par l'Agriculture Sous Pluie

Nous considérons maintenant les questions: Quelle est la charge humaine estimée actuellement alimentable par l'agriculture sous pluie? Quelle est la charge humaine potentiellement portable par les diverses politiques d'accroissement de la production agricole? Quelle est la distribution de la charge humaine portable pour la production sous pluie actuelle et la production potentielle projetée?

Il a d'abord fallu calculer la charge portable par les conditions actuelles de l'agriculture sous pluie. L'année 1988 constitue la ligne de base actuelle, elle a été calculée comme la moyenne des conditions agricoles ayant existé en 1986, 1987 et 1989 et à partir du recensement de 1988. On a ensuite estimé la charge humaine potentiellement portable par trois politiques basales de développement. Une de ces politiques consiste à limiter les cultures aux zones actuellement cultivées mais en augmentant les rendements au moyen d'une technologie plus perfectionnée. La seconde consiste à accroître les surfaces cultivées pour complètement utiliser le potentiel sénégalais mais tout en maintenant le même niveau d'emploi de la technologie. La troisième alternative combine les deux précédentes: accroissement des rendements et des surfaces cultivées pour estimer la charge humaine portable maximum.

6.8.1. Les Données et les Hypothèses de Départ

Le calcul de la capacité portable de départ et des capacités portables par les propositions de développement de la production agricole nécessitait un certain nombre de hypothèses concernant les données et leurs répartitions géographiques. Avant d'examiner les alternatives spécifiques, il faut discuter les hypothèses faites concernant les données de départ. On peut regrouper ces hypothèses selon: production, rendement, superficie, associations culturales et valeurs de la production.

6.8.1.1. La Production

La production actuelle a été estimée à partir des statistiques moyennes rapportées par culture (Section 5.4). Les chiffres de production sont les moyennes calculées pour les cinq cultures vivrières et les deux cultures de rente au niveau de l'arrondissement. La production nationale fut obtenue par la sommation des chiffres par arrondissement.

La production projetée (pour les propositions accroissant les surfaces cultivées) correspond au rendement multiplié par la superficie cultivée, calculé par le polygone agricole et associé aux subdivisions administratives.

Les cultures vivrières contribuant directement à la charge portable sont le mil, le sorgho, le maïs, le riz et le niébé. Les cultures de rente sont l'arachide et le coton.

Les chiffres de production ont été corrigés en fonction des pertes après récolte, des taux meuniers et des quantités de semences retenues. Le modèle estime que le coefficient de perte après récolte est de 15% pour chaque culture vivrière. Les taux meuniers utilisés étaient 0.82 pour le mil et le

sorgho, 0.72 pour le maïs, 0.67 pour le riz et 1.00 pour le niébé (Martin, 1988). Les quantités de semences retenues en kg/ha étaient: 8 pour le mil et le sorgho, 16 pour le maïs, 100 pour le riz, 18 pour le niébé, 120 pour l'arachide et 50 pour le coton.

Les rendements calorifiques par culture, après correction pour les taux meuniers étaient de 3300 calories par kg de mil ou de sorgho, 3600 pour le maïs, 3530 pour les grains de riz entiers et 3420 pour le niébé (Cogill et al., 1989).

6.8.1.2. Les Rendements

Les rendements ont aussi été dérivés des moyennes pour 1986-1989 des statistiques rapportées par le Gouvernement par arrondissement. Les rendements pour les surfaces cultivées additionnelles sous les hypothèses d'expansion agricole ont été dérivés des moyennes sur 1986-1989 des arrondissements adjacents avec une pluviomètrie similaire.

Les rendements moyens des cultures sur 1986-1989 ont été obtenus avec un niveau de technologie agricole considéré comme moyen. Les rendements pour les options d'expansion agricole utilisant une technologie plus avancée ont été calculés sur la base d'un pourcentage d'augmentation à partir des rendements actuels (1986-1989). Les limites supérieures des rendements sont fondés sur la moyenne sur 5 ans des essais de 1985/86 à 1989/90 (chiffres fournis par USAID/Sénégal à partir des données du Gouvernement du Sénégal).

6.8.1.3. Les Surfaces Cultivées

La superficie cultivée est basée sur les moyennes des statistiques rapportées par culture au niveau de l'arrondissement. Par conséquent, les chiffres de production actuelle sont aussi basés sur des moyennes.

L'agriculture sous pluie est interdite dans les réserves forestières et pastorales aussi bien pour la situation présente que les situations postulées.

La superficie cultivée pour les hypothèses d'expansion agricole a été calculée de la manière suivante:

1) Superficie Actuelle: les emplacements des surfaces cultivées fut déterminé d'après les terres actuellement utilisées pour l'agriculture. On a considéré que le facteur jachère pour un polygone agricole était 50%. Notre postulat était que pour une année donnée 50% des surfaces étaient effectivement cultivées, les 50% restant étant laissés en jachère. Ce taux de jachère est couramment pratiqué dans le Sénégal occidental. Il représente une utilisation intensive des terres. Les superficies cultivées n'ont pas été diminuées des surfaces requises par les besoins humains (soit habitat, infrastructure) ni des inclusions de sols pauvres laissés incultes. Ces dernières ont été comptées dans les superficies en jachère;

2) Superficie Additionnelle: les emplacements des surfaces cultivées additionnelles ont été déterminés à partir des sols à potentiel modéré pour la culture sous pluie (Section 6.3). Afin de maintenir en partie l'habitat local

et la biodiversité, 50% (par surface) de la végétation naturelle fut conservée. Le paysage résultant consisterait en une mosaïque de zones agricoles et naturelles. Les zones naturelles comprennent les inclusions de sols pauvres laissés incultes. On a postulé que 50% des surfaces cultivées restaient en jachère, les surfaces pour les besoins humains étant comprises dans les surfaces en jachère.

Un troisième scénario d'expansion agricole sur sols à potentiel modéré fut aussi étudié: la superficie maximale. Dans ce scénario, seulement 15 % de l'habitat naturel (savanes, forêts, etc...) est conservé, c'est-à-dire que la végétation naturelle est maintenue seulement sur les sols pauvres. Le coefficient de jachère reste de 50% pour les zones cultivées.

6.8.1.4. Les Associations Culturales

Les associations culturales actuellement pratiquées ont été déduites des moyennes des statistiques rapportées par le Gouvernement. Ces associations furent étendues aux surfaces additionnelles cultivées sous les modèles de la surperficie maximale et de l'accroissement des superficies. Elles ont été définies pour chaque culture et chaque arrondissement comme une fraction (pourcentage) de la superficie totale cultivée.

Les associations culturales ont été choisies en fonction de plusieurs hypothèses et opérations (dont l'ordre est significatif). Trois variations sur ce thème ont été mises en place:

Associations culturales #1): Ce scénario est basé sur l'allocation de cultures céréalières et pour l'exportation. Premièrement, 50% des surfaces cultivées sont laissées en jachère à chaque saison culturale. En second lieu, si le coton ou le riz sont actuellement cultivés dans un arrondissement, ils sont redistribués sur les surfaces cultivées à ces mêmes niveau. Les surperficies (et la production) de coton et riz restent constantes dans le temps, puisque encore une fois on utilise les chiffres actuels par arrondissement. Troisièmement, 50% de la superficie restante est plantée en arachide (elles peuvent être cultivées sur tous les sols à potentiel modéré). Quatrièmement, les terres restantes sont allouées à la culture des céréales sous pluie afin d'optimiser la production calorifique. La culture avec la plus haute valeur énergétique est distribuée sur 75% des surfaces restantes si elles sont situées dans une zone de pluviométrie adéquate pour cette culture. Les 25% restant reçoivent la culture classée seconde pour sa valeur énergétique de nouveau à condition que le régime pluviométrique y soit suffisant. Pour la distribution des cultures en fonction de la pluviométrie se reporter à la Section 6.6.

Associations Culturales #2): Ce modèle ne considère que les céréales (aucune culture de rente n'est cultivée). Comme avant, 50% de la superficie totale est laissée en jachère. Si le riz est cultivé dans un arrondissement, il est réalloué à ce même niveau et sa superficie de production est maintenue constante au cours du temps. Les superficies restantes sont plantées en céreales suivant la distribution 75/25 pourcent expliquée ci-dessus visant à optimiser la production calorifique.

Associations Culturales #3): Ce modèle n'alloue que des céréales, laissant les cultures pour l'exportation non modifiées sur leur superficies d'origine. La première opération consiste encore à laisser 50% de la terre arable en jachère. La seconde opération maintient le même niveau de culture et de production pour l'arachide et le coton en les réallouant sur les arrondissements. Les terres restantes sont cultivées en céréales suivant la répartition 75/25 pourcent décrite ci-dessus.

6.8.1.5. Les Valeurs des Productions Agricoles

Les valeurs des productions agricoles vivrières et pour l'exportation furent calculées pour la situation actuelle et les situations projetées par les modèles. Le calcul était basé sur les prix à la production en FCPA par kilogramme (cf. Section 5.4). Les prix utilisés pour les productions escomptées par les modèles étaient basés sur le FCFA des années 1989-1990. Les prix ont été maintenus constant pour toutes les projections.

6.8.2. La Charge Portable par les Rendements, les Superficies et les Associations Culturales Actuels

La charge humaine actuellement portable (ligne de base de 1988) fut calculée à partir des rendements actuels, des superficies actuelles, et des associations actuelles, comme on les a définis dans la Section 6.8.1. Au niveau national, la charge humaine portable calculée (estimée) était de 3.879.600 personnes.

La procédure a consisté à calculer d'abord la production agricole (en kilogrammes totaux par culture et par arrondissement) comme le produit des rendements moyens et des surfaces rapportées. Les données de rendements par arrondissement étaient ensuite converties pour les cinq cultures vivrières en valeurs énergétiques. Par exemple, pour le mil, la valeur calorifique à l'hectare fut calculée comme suit:

calories/hectare = ((rendement * 0.85) - 8) * 3300 où 0.85 est le coefficient de perte après récolte, 8 est la quantité de semence retenue par hectare et 3300 est la valeur énergétique par kg après meunerie. Le calcul a été répété pour les quatre autres cultures et a utilisé les valeurs présentées dans la Section 6.8.1.1.

Le nombre total de calories produites par hectare fut alors calculé en faisant la somme des calories par hectare pour chacune des cultures vivrières présentes dans un arrondissement.

La charge humaine portable (CHP) par hectare et par arrondissement fut ensuite calculée au moyen de l'équation suivante:

CHP = (Kcal / 671.6 Kcal par personne-par an)

où Kcal est le total de kilocalories produites par hectare et par arrondissement, 671.6 Kcal par personne-par an sont les besoins humains chaque année en céréales. Cette valeur fut calculée au préalable suivant:

$$\frac{2300 \text{ cal}}{\text{personne jour}} * \frac{365 \text{ jour}}{\text{année}} * \frac{\text{Kcal}}{1000 \text{ cal}} * \frac{0.8 \text{ cal provenant des céréales}}{1 \text{ calorie requise}}$$

Finalement il s'est avéré plus facile d'exprimer CHP en termes de personnes au kilomètre carré. La CHP par hectare fut donc multipliée par 100 afin de convertir les unités en kilomètres carrés.

Les résultats sont résumés sous forme de carte (Figures 12a et 12b). La gamme des valeurs de la CHP en kilomètres carrés fut subdivisée en sept classes. Les régions agricoles actuelles sont aussi présentées à titre de références.

Bien que le principal objectif de cette étude ait été d'estimer la charge humaine portable par l'agriculture sous pluie, on a réalisé une série de calculs en parallèle pour estimer la valeur de la production agricole sous pluie pour la situation présente et les situations projetées par les modèles. Pour la situation présente, utilisant les rendements actuels, les superficies actuelles et les associations culturales actuelles, la valeur de la production fut estimée par le produit de la valeur à la production (FCFA/kg) de chaque culture par la production totale (kg) par culture par arrondissement. Ceci fut fait pour les cultures vivrières puis les cultures de rente. Les valeurs de production furent additionnées sur toutes les cultures présentes dans chaque arrondissement. Ces chiffres furent ensuite rassemblés au niveau national. Le résultat fut un rapport sur la valeur à la production des céréales cultivées sous pluie, estimée à 65.9 milliard FCFA, la valeur à la production des cultures de rente estimée à 62.6 milliard FCFA et la valeur à la production totale estimée à 128.5 milliard FCFA.

6.8.3. Les Projections après Accroissement des Rendements et des Superficies et Amélioration des Associations Culturales

Le second modèle agricole a étudié la charge humaine portable par des rendements et des superficies accrus et des associations culturales améliorées. Les rendements furent déduits de La Direction des Statistiques (République du Sénégal, 1985-1990). Ces rapports indiquent que des rendements plus élevés pourraient résulter de l'utilisation d'une technologie plus avancée. La charge portable au niveau national pour ce modèle de rendements plus élevés fut estimée à 5.425.200 personnes. La valeur à la production totale fut évaluée à 161.8 milliard FCFA. Se reporter à la Figure 12a.

La procédure pour calculer cette charge humaine portable reflète la précédente (Section 6.8.2). La seule différence fut la substitution des nouveaux chiffres de rendements par la multiplication des rendements actuels par un pourcentage d'augmentation. Une politique d'utilisation des technologies avancées pour accroître les rendements présuppose que les sols aient les caractéristiques désirées de fertilité, structure et de capacité de rétention d'eau et que ces caractéristiques puissent être maintenues. Sans apports et mesures de conservation conséquents, cette politique peut s'avérer difficile à maintenir à long terme sur de vastes surfaces. Les sols ferrugineux et ferralitiques, qui sont les sols dominants au Sénégal, sont sujets à la dégradation une fois que la végétation naturelle a été défrichée pour faire place à de nouvelles cultures. Les études de l'ORSTOM ont montré que ces sols

voient des pertes d'éléments nutritifs et de structure, lesquelles entraînent une réduction de la capacité de rétention en eau. Charreau (1974) a indiqué que l'élimination de la végétation pérenne entraîne des pertes quantitatives et qualitatives de matières organiques. Celles-ci causent une réduction de la productivité des sols et donc des chutes de rendements. Les taux de matières organiques apparaissent être le paramètre critique pour juger de la productivité d'un sol.

Notre modèle n'a pas considéré les scénarios de déclin de la productivité des sols dûs aux pratiques culturales. Des études futures élaborant la présente étude devraient tirer parti de la vaste bibliographie sahélienne et considérer des scénarios de réduction de la productivité des sols dûs à leur dégradation. Notre intention était de souligner ici le besoin urgent pour des pratiques d'exploitation des sols permettant de maintenir le développement agricole et d'accroître les rendements. Ceci n'aura pas lieu tant que les petits propriétaires n'adopteront pas des pratiques ayant des effets à court-, moyen et long terme sur la fertilité et la conservation des sols, la conservation de leur capacité de rétention en eau, et la gestion du couvert végétal (McGahuey, 1990).

Cf. Tableau 1 pour un résumé de ce scénario et des scénarios suivants.

6.8.4. Les Projections pour le Modèle avec les Rendements Actuels, des Superficies Accrues et les Associations Culturales Actuelles

Le troisième modèle consistait à estimer la charge portable pour une situation ayant les rendements et les associations culturales actuels mais des superficies accrues. La charge portable fut estimé à 5.563.000 habitants au niveau national; la valeur totale à la production pour les cultures vivrières et les cultures de rente fut évaluée à 182.3 milliard FCFA. Cette proposition de développement agricole est récapitulée sous forme de carte (Figure 12b).

Le modèle pour accroître les surfaces cultivées fut présenté dans la Section 6.8.1.3. La charge humaine portable fut estimée de la façon décrite ci-dessus, les chiffres actuels de rendements pour les surperficies actuellement cultivées et pour les superficies additionnelles étant convertis en valeurs énergétiques, celles-ci étant alors divisées par les besoins humains annuels en céréales.

6.8.5. Les Projections avec des Rendements et des Superficies Accrus pour les Associations Culturales Actuelles

Le quatrième modèle consistait à calculer la charge portable en situation de rendements et superficies accrus, les associations culturales restant les mêmes. La charge portable au niveau national fut estimée à 7.785.000 personnes; la valeur à la production totale fut évaluée à 231.3 milliard FCFA. Les superficies d'expansion agricole sont superposées en gris à l'information donnant la charge portable. On rappelle au lecteur que ce modèle d'expansion agricole conserve 50% de la couverture végétale naturelle.

La procédure est similaire à celle utilisée dans le scénario précédent, elle substitue aux rendements leurs pourcentages d'accroissement comme on l'a expliqué dans la Section 6.8.3.

6.8.6. Les Projections avec des Rendements et des Superficies Accrus et les Associations Culturales #1.

Le cinquième scénario intègre des rendements et des superficies accrus et les associations culturales de type #1. Ce modèle de développement s'efforce d'optimiser la valeur énergétique des cultures céréalières par l'emploi de meilleures associations culturales. Il met aussi l'accent sur la poursuite de la culture de l'arachide pour l'exportation. La charge portable estimée au niveau national pour ce modèle était de 7.191.000 personnes; la valeur totale à la production fut évaluée à 246.4 milliard FCFA.

La procédure pour distribuer les cultures sur les superficies actuelles et additionnelles pour ces associations culturales fut présenté dans la Section 6.8.1.4.

6.8.7. Les Projections avec les Rendements Actuels, la Superficie Maximale et les Associations Culturales #3

Le sixième scénario associe les rendements actuels à la superficie maximale et aux associations culturales #3. Dans ce modèle de superficie maximale pratiquement toutes les terres qui peuvent être cultivées le sont, l'habitat naturel étant réduit à 15% de la superficie des sols à potentiel modéré. L'habitat naturel est aussi conservé sur les sols pauvres, les réserves, et dans les régions recevant en moyenne moins de 400 mm de précipitations annuelles. Dans le type #3 d'associations culturales (Section 6.8.1.4.), seulement les céréales sont redistribuées (pour optimiser la production de calories), les cultures de rente étant conservées sur les surfaces de production originelles.

La charge portable au niveau national fut estimée à 10.341.000 personnes, la valeur à la production totale à 236.4 milliard de FCFA.

6.8.8. Les Projections avec les Rendements Actuels, la Superficie Maximale et les Associations Culturales #2.

Le septième scénario combine les rendements actuels à la superficie maximale et aux associations culturales #2. La seule différence entre ce modèle et le précédent est la redistribution des cultures céréalières sur toutes les superficies cultivées, les cultures de rente ayant été éliminées. Cette élimination entraîne un saut de la CHP à 13.084.000 personnes; la valeur à la production totale fut estimée à 214.3 milliard de FCFA.

6.8.9. Les Projections avec des Rendements et des Superficies Accrus et les Associations Culturales #3.

Le huitième scénario concerne des rendements et des superficies accrus avec les associations végétales #3. Il représente une variation des scénarios 2 et 4. Les cultures de rente restent cultivées sur les mêmes superficies que

87

celles du scénario 2, superficies actuelles (cf. 6.8.3.), mais les céréales sont distribuées sur les superficies additionnelles du scénario 4 (cf. 6.8.5.). Il est important de remarquer que les cultures pour l'exportation occupent les superficies actuelles (moyennes de 1986, 1987 et 1989) et ne sont pas étendues aux nouvelles surfaces. La CHP fut estimée à 10.213.000 personnes; la valeur à la production totale à 241.4 de FCFA.

6.8.10. Les Projections avec Rendements Accrus, la Superficie Maximale et les Associations Culturales #2

Dans le neuvième scénario, tous les paramètres sont maximisés de façon à pousser la CHP aux limites des ressources. Le modèle combine des rendements accrus, la superficie maximale et les associations culturales #2. Il s'agit d'une variante du septième scénario, la différence étant les rendements accrus. La CHP fait un bond jusqu'à 17.440.000 personnes et la valeur à la production totale est de 284.6 FCFA (la valeur à la production des cultures de rente est 0).

Il faut noter que les scénarios comprennant la superficie maximale rejettent le besoin fondamental de conserver l'habitat naturel et laissent peu de place pour les autres activités telle que l'élevage, la production forestière, etc.

6.9 La Densité de Population

La phase finale du modèle s'intéresse à la question: Quelle est la relation entre les estimations de la charge humaine portable et la population actuelle ou future au Sénégal? Il s'agit de la question fondamentale - relier la charge humaine portable par l'agriculture sous pluie aux réalités d'aujourd'hui et de demain. La comparaison est le point essentiel permettant de mesurer l'écart entre la production et la demande d'une population sans cesse croissante. Finalement c'est l'un des moyens de mesurer les progrès du Sénégal vers son objectif d'autonomie alimentaire.

Introduire les données démographiques nécessite de les traiter sous une forme qui puisse être liée à la charge humaine portable (habitants au kilomètre carré). La solution a consisté à produire des cartes de densité actuelle de population et de densités projetées par arrondissement, à partir des chiffres de populations rurale et urbaine dérivés des données préliminaires du recensement de 1988.

6.9.1. L'Actuelle Densité de Population

L'actuelle carte de "la Densité de Population au Sénégal" (Figure 13a) est basée sur les chiffres de population totale rapportés par arrondissement. Le modèle fait deux hypothèses simplificatrices en ce qui concerne la distribution de la population à l'intérieur d'un arrondissement; 1) la population est répartie uniformément dans un arrondissement; et 2) il n'y a personne dans les réserves forestières et pastorales. La première opération a consisté à superposer les limites administratives sur les zones protégées (réserves). La superficie de chaque arrondissement fut alors corrigée par soustraction des superficies des zones protégées. La densité de population

exprimée en habitants au kilomètre carré, fut alors calculée comme suit pour chaque arrondissement:

$$\text{Densité de Population} = \frac{\text{Population de l'Arrondissement}}{\text{Superficie Corrigée de l'Arrondissement}}$$

La gamme des valeurs de la densité de population fut subdivisée en sept classes afin de produire une carte choropleth.

6.9.2. La Densité de Population Projetée

L'USAID/Sénégal avait demandé que les charges humaines portables estimées pour les différents modèles soient mises en relation avec la population projetée pour l'an 2010. La carte de la densité de population projetée (Figure 13b) fut produite suivant les hypothèses et la procédure juste décrites. On a toutefois effectué une série de calculs préalables pour obtenir une projection de la population par arrondissement.

BUCEN (1990) a fait une première estimation de la population pour l'an 2001. La procédure a utilisé une méthodologie classique pour projeter la population rurale résiduelle des diverses régions d'un pays. La méthode consiste à extrapoler la variation des proportions d'une région donnée à la population de l'ensemble du pays. Par exemple, si une région ou un arrondissement comptait 10% de la population totale en 1976 et 11% en 1988, on escompte que 12% de la population y résideront en l'an 2000. De la même manière, si la population y était de 12% en 1976 et de 11% en 1988, il est projeté qu'elle y sera de 10% en l'an 2000. Un problème se pose quand une région voit sa population diminuer plus rapidement; ainsi une région avec 4% en 1976 et 2% en 1988 aurait théoriquement en l'an 2000 une population nulle. Pour les taux de croissance extrêmement négatifs, on a donc utilisé les taux réels observés entre les recensements pour calculer les projections, ce qui surestime légèrement la population. On a compensé cette surestimation en multipliant les augmentations de toutes les régions montrant un accroissement de la population par un facteur réduisant proportionnellement la somme des augmentations afin de la rendre égale à la croissance totale pour le pays.

Pour le Sénégal, chaque arrondissement a reçu un code et fut ensuite traité comme si il s'agissait d'une région à part entière. On a alors calculé la proportion de la population totale du Sénégal en date des recensements d'avril 1976 et mai 1988 résidant dans chaque arrondissement et le taux moyen de variation annuelle fut extrapolé à 1990 et à chacune des années suivantes jusqu'en 2001. On a corrigé les quelques taux négatifs de croissance, les augmentations étant classées pour compenser les corrections et tous les résultats étant alors arrondis à la centaine la plus proche. Le dernier programme informatique calcule les corrections nécessaires pour que les sommes des projections urbaines et rurales égalent le total projeté pour le pays.

Les projections pour l'année 2010 furent calculées au EDC par extrapolation linéaire des taux de croissance, par arrondissement, résultants de la comparaison des variations de la démographie entre le recensement de 1988 et

94

les projections pour 2001. Ces projections démographiques pour 2010 furent converties en densité de population comme on l'a expliqué plus haut.

6.10 La Charge Humaine Portable en Fonction de la Population

La procédure précédente convertit les statistiques démographiques actuelles (1988) et projetées (2010) en densité de population. Il est alors possible de faire la comparaison finale: rapporter les neuf scénarios de charge humaine portable (Section 6.8.) à la population. Cette comparaison consiste à calculer la différence entre la charge humaine portable et la population actuelle ou projetée par arrondissement comme suit:

CHP - Population

où les nombres positifs (habitants par arrondissement) sont signe d'arrondissements où la charge humaine portable est supérieure à la population effective (surplus de production), et où des valeurs négatives signifient que la population de ces arrondissements dépasse la charge humaine portable (déficit de production). Il s'agit là d'un indicateur de la capacité de l'agriculture sous pluie à nourrir la population. La gamme des résultats fut subdivisée en huit classes qui sont présentées sous forme de carte dans les Figures 14a et 14b.

La comparaison fut effectuée pour les neuf modèles de développement agricole. Le lecteur doit interpréter les résultats avec précautions. Tout d'abord, il est rappelé au lecteur que la charge humaine portable ne considère que la production céréalière et ne représente donc pas la charge humaine totale alimentable par toutes les sources de production vivrière. Il est certain qu'il existe d'autre sources importantes de nourriture, l'élevage, la pêche, l'agriculture maraîchère, l'agriculture irriguée, etc... De plus les revenus rapportés par les cultures pour l'exportation sont aussi utilisés pour acheter de la nourriture produite localement ou importée.

Les projections démographiques ne prennent pas en considération les mouvements de population vers les régions rurales en voie d'expansion. Pour les modèles avec superficies cultivées accrues ou maximale, la population rurale sera probablement plus dense que celle estimée par les projections tandis qu'au niveau national la population totale ne devrait pas varier de façon significative.

6.10.1. Rendements, Superficies et Associations Culturales Actuels Par Rapport à la Population de 1988

Le modèle considérant les rendements, les superficies et les associations culturales actuels (cf. Section 6.8.2.) a été comparé à la population correspondante (1988). La carte résultante (Figure 14a) montre que la charge humaine portable est en général supérieure à la population résidant dans le centre et le sud-est du Sénégal, là où la population est essentiellement rurale et la densité de population est relativement faible. Dans le reste du pays, la population en générale dépasse la charge humaine portable. Au niveau national, la différence entre la charge humaine portable totale (3.879.600) et la population de 1988 (6.869.232) révèle que la population dépasse la charge

humaine portable par 2.989.632 habitants. Il s'agit d'une mesure de la situation existant en 1988 au Sénégal.

6.10.2. Rendements Accrus, Superficies et Associations Culturales Actuelles par Rapport à la Population de 2010

Le modèle associant des rendements accrus aux superficies et associations culturales actuelles fut comparé à la projection démographique de 2010. Cela suppose que les rendements peuvent effectivement être augmentés des quantités citées plus haut dans les 20 prochaines années. En dépit de l'amélioration des rendements, la croissance démographique dépasse les augmentations de la capacité de production, si bien que pour la plupart des arrondissements du pays la population y excède la capacité de production (Figure 14a). Au niveau national, la population de 2010 (14.680.412) a un excédent de 9.255.212 personnes par rapport à la charge portable (5.425.200). L'écart alimentaire s'est creusé par rapport à la situation actuelle.

6.10.3. Rendements Actuels, Superficies Additionnelles et Associations Culturales Actuelles par Rapport à la Population de 2010

Le troisième modèle de développement agricole, soit la combinaison des rendements actuels, de superficies accrues et des associations culturales actuelles a été comparé à la population projetée pour 2010. La charge portable aurait un excédent au niveau national de 9.117.000 personnes.

6.10.4. Rendements Accrus, Superficies Accrues et Associations Culturales Actuelles par rapport à la Population de 2010

On a rapporté le quatrième modèle, lequel associe des rendements et superficies accrus aux associations culturales actuelles, à la population de 2010. Des surplus de nourriture se rencontrent dans le sud-est et le centre du Sénégal, mais ils sont plus que compensés par les déficits existants dans la majeure part du reste du pays (Figure 14b). Néanmoins au niveau national l'écart alimentaire était significativement réduit dans ce modèle. La population projetée pour 2010 excède la CHP par 6.895.000 personnes.

6.10.5. Rendements Accrus, Superficies Accrues et Associations Culturales #1 par Rapport à la Population de 2010

La cinquième comparaison rapporte la charge humaine portable par le modèle alliant rendements et superficies accrus aux associations culturales #1, à la population de 2010 (Figure 14b). La charge portable est quelque peu réduite par rapport au modèle précédent, d'où un plus grand écart entre la population et la CHP (7.490.000). Ceci est dû à l'intensification de la culture des arachides pour l'exportation au détriment des cultures vivrières.

6.10.6. Rendements Actuels, Superficie Maximale, Associations Culturales #3 par Rapport à la Population de 2010

La sixième comparaison mesure la différence entre le modèle associant les rendements actuels à la superficie maximale et aux associations culturales #3, et la population de 2010. Cette différence a diminué de façon significative

(population excède la CHP par 4.339.000 personnes) en raison de la limitation des cultures pour l'exportation aux superficies actuellement cultivées et de l'expansion maximale possible des cultures vivrières.

6.10.7. Rendements Actuels, Superficie Maximale et Associations Culturales #2 par Rapport à la Population de 2010

La septième comparaison rapporte le modèle alliant les rendements actuels à la superficie maximale et aux associations culturales #2, à la population de 2010. L'écart entre la CHP et la population projetée est significativement réduit (la population excède la CHP par seulement 1.596.000 personnes). Ceci est largement dû au fait que toutes les cultures pour l'exportation ont été remplacées par des cultures vivrières.

6.10.8. Rendements Accrus, Superficies Accrues, Associations Culturales #3 par Rapport à la Population de 2010

Le huitième modèle qui combine rendements accrus, superficies accrues et associations culturales #3 a été comparé à la population de 2010. La différence entre la population et la CHP est de 4.467.000, soit similaire à celle obtenue avec le sixième modèle. Il faut noter que seulement les céréales sont cultivées sur les superficies additionnelles tandis que les cultures de rente demeurent limitées aux zones actuelles de culture. Comme d'habitude, 50% des terres cultivées sont laissées en jachère.

6.10.9. Rendements Accrus, Superficie Maximale, Associations Culturales #2 par Rapport à la Population de 2010

Dans le neuvième modèle tous les paramètres sont optimisés pour augmenter la CHP: rendements accrus, superficie maximale et associations culturales #2. Il s'agit du seul cas où la CHP excède la population projetée pour 2010 (un surplus de 2.760.000). Les neuf modèles sont récapitulés dans le Tableau 1.

7.0 Références

American Association for the Advancement of Science (AAAS), 1983, Resource Inventory and Baseline Study Methods for Developing Countries, AAAS Publication No. 83-3, Washington, D.C., 539 p.

Arid Lands Information Center, 1980, Environmental Report on Senegal, Draft Report, University of Arizona, Tucson, 105 p.

Charreau, C., 1974, "Soils of Tropical Dry and Dry-Wet Climatic Areas of West Africa and their Use and Management", unpublished lecture notes, Cornell University, Ithaca, N.Y., 434 p.

Cogill, B., J. Marzilli, and M. McNabb, 1989, A Manual for Food Needs Assessment, Food Needs Assessment Project, Agency for International Development/Bureau for Food for Peace and Voluntary Assistance, Washington, D.C., Version 2.0.

Institut Géographique National (IGN), 1980, "Sénégal: Carte au 1:1,000,000", Paris.

Maignen, R., 1965, Notice Explicative: Carte Pedologique du Sénégal au 1/1,000,000, O.R.S.T.O.M., Dakar-Hann, 63 p.

Martin, F., 1988, "Food Security and Comparative Advantage in Senegal: a Micro-Macro Approach", Michigan State University, Dissertation.

McGahuey, M., 1990, personal communication, U.S. Agency for International Development, Washington, D.C.

Monod, T., 1963, "Après Yangambi (1956): Notes de phytogéopraphie africaine", Bull. del l'IFAN, Ser. A, 2, p. 594-619.

National Geographic Society (NGS), 1990, Atlas of the World, Washington, D.C., 133 p.

Pelissier, P., ed., 1983, Atlas du Sénégal, Les Editions Jeune Afrique, Paris, 72 p.

République du Sénégal, Ministère de l'Economie et des Finances, Direction de la Statistique, 1988, Recensement Général de la Population et de l'Habitat, Mai-Juin 1988: Résultats Préliminaires, Dakar, Senegal.

République du Sénégal, Ministère du Développement Rural, Direction de l'Agriculture, Division des Statistiques Agricoles, 1987, 1988, 1990, Résultats Definitifs de la Campagne Agricole, Dakar, Senegal.

République du Sénégal, Ministère du Développement Rural, Direction de l'Agriculture, Division des Statistiques Agricoles, 1985-1990, various reports, unpublished, Dakar, Senegal.

Roberty, G., 1962, "Carte de la Végétation Tropicale Occidentale à l'Echelle de 1:1,000,000" (map series, in color), Paris, ORSTOM.

Stancioff, A., M. Staljanssens, and G. Tappan, 1986, "Mapping and Remote Sensing of the Natural Resources of the Republic of Senegal: A Study of the Geology, Hydrology, Soils, Vegetation, and Land Use Potential", Remote Sensing Institite, South Dakota State University, SDSU-RSI-86-01, p. 653.

Traoré, M., 1983, Atlas du Mali, Les Editions Jeune Afrique, Paris, 64 p.

Trochain, J., 1957, "Accord interafricain sur la définition des types de végétation de l'Afrique tropicale", Bull. Inst. Et. Centrafri., Nouv. Sér. p. 55-93.

U.S. Agency for International Development (USAID), 1987, "An Overview of the Current USAID Program in Senegal", USAID/Senegal, Dakar, 62 p.

U.S. Bureau of the Census (BUCEN), 1990, "Methodology for Projecting the Arrondissements of Senegal", unpublished note, Center for International Research, Washington, D.C., 1 p.

United Nations Development Programme - Direction de l'Aménagement du Territoire (UNDP-DAT), 1984, "Schéma National d'Aménagement du Territoire: Version Préliminaire", Dakar, Senegal, 750 p.

Westin, F., 1990, "Crops for Moderate Potential Soils", unpublished notes, Brookings, South Dakota, 3 p.

World Bank, 1989a, Sub-Saharan Africa: From Crisis to Sustainable Growth, The World Bank, Washington, D.C., 300 p.

World Bank, 1989b, "Senegal Country Strategy Paper", unpublished, The World Bank, Washington, D.C.