

UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI

TEZĂ DE ABILITARE

*Noi adsorbanti low-cost obținuți din materiale vegetale
utilizați pentru eliminarea coloranților cationici din ape*

Domeniu: Inginerie chimică

Dr. ing. Giannin Emanuel Moșoarcă

2022

REZUMAT

Teza de abilitare este structurată pe două părți, având la bază 12 articole științifice principale publicate ca prim autor sau autor de corespondență, în reviste indexate în baza de date Web of Science (7 din quartila Q1) sau în alte baze de date internaționale.

În *prima parte a tezei de abilitare* sunt prezentate principale realizări profesionale, academice și științifice, ulterioare obținerii titlului de doctor inginer.

După susținerea publică a tezei de doctorat în octombrie 2004, activitatea de cercetare științifică s-a încadrat în domeniul ingineriei chimice și ingineriei mediului, fiind în strânsă concordanță cu activitatea didactică. O direcție de cercetare importantă, dezvoltată în principal în ultimii ani a vizat adsorbția unor coloranți din soluții apoase pe materiale adsorbante de tip-low cost noi obținute din deșeuri vegetale.

Activitatea de cercetare care face obiectul acestei teze de abilitare s-a axat pe: obținerea unor noi materiale adsorbante low-cost din deșeuri vegetale, caracterizarea adsorbanților obținuți, testarea performanțelor acestora în reținerea unor coloranți din soluții apoase și optimizarea procesului de adsorbție.

Apele naturale sunt afectate de deversările de ape reziduale industriale, netratate sau tratate necorespunzător. Coloranții reprezintă o clasă de compuși utilizați pe scară largă în diverse industrii. Cea mai mare parte din acești coloranți sunt substanțe toxice cu caracter cancerigen și mutagen, prin urmare eliminarea acestora din efluenții industriali este o prioritate.

Multe metode au fost folosite pentru a îndepărta coloranții cationici din apele reziduale. Una din cele mai utilizate metode este adsorbția datorită numeroaselor avantaje tehnice și economice precum: selectivitate și eficiență ridicate, simplitate și flexibilitate în funcționare, aplicabilitate bună (chiar și la o concentrație scăzută de colorant), calitate ridicată a efluenților tratați, gamă largă de materiale adsorbante sintetice și naturale disponibile, posibilitatea de reutilizare a adsorbantului și costuri relativ mici.

Costurile legate de materialul adsorbant reprezintă aproximativ 70% din costurile totale ale procesului de adsorbție. Identificarea și utilizarea de noi biomateriale adsorbante care sunt ușor de utilizat și sunt disponibile în natură în cantități mari duce la o scădere pronunțată a costurilor și reprezintă o problemă de actualitate. Materiale naturale pe bază de plante și deșeurile agricole conțin celuloză, hemiceluloză, lignină, polifenoli, pigmenți vegetali și proteine care au diferite grupe funcționale (hidroxil, carboxil, amino) care pot oferi locuri active pentru legarea coloranților și pot face posibil procesul de adsorbție. În plus, aceste materiale

sunt foarte ieftine, ușor disponibile în cantități mari și nu necesită etape preliminare suplimentare de tratare și activare.

Un alt avantaj major al procesului de adsorbție este faptul că poate fi ușor optimizat și modelat. Metoda Taguchi este folosită pentru a optimiza diferite procese fără creșterea costurilor. Comparativ cu alte metode, abordarea de ierarhizare oferită de această metodă permite mai bine vizualizarea condițiilor optime și necesită mai puține date experimentale.

Studiile s-au axat pe testarea performanțelor unor noi adsorbanți low-cost de a îndepărta coloranții albastru de metilen și violet cristal din soluții apoase. Acești adsorbanți au fost obținuți prin procesarea minimă (fără tratament chimic sau termic) a unor materiale vegetale ușor disponibile în natură în cantități mari.

Pentru obținerea materialelor adsorbante s-au utilizat frunze de liliac (*Syringa vulgaris* L.), frunze de zmeur (*Rubus idaeus* L.), frunze de afin (*Vaccinium myrtillus* L.), partea aeriană de ghimpe (*Xanthium spinosum*), păstai de fasole (*Phaseolus vulgaris* L.), partea aeriană de talpa-gâștii (*Leonurus cardiaca* L.).

Pentru a caracteriza materialele adsorbante s-au efectuat: analiza FTIR pentru a identifica principalele grupări funcționale ale adsorbantului, analiza SEM pentru a studia morfologia suprafeței materialului adsorbant, analiza de culoare în sistem $CIEL^*a^*b^*$ pentru a pune în evidență modificarea culorii materialului adsorbant după adsorbție. De asemenea, a fost determinat și punctul de sarcină zero.

Analiza FTIR a materialelor adsorbante obținute a indicat că principale componente ale acestora sunt celuloza, hemiceluloza și lignina. Analiza SEM, înainte și după adsorbția coloranților albastru de metilen și violet cristal, a arătat că suprafața materialelor adsorbante prezintă mulți pori cu forme și dimensiuni diferite care oferă un număr mare de locuri active disponibile pentru adsorbția coloranților. După adsorbție moleculele de colorant au umplut acești pori și suprafața adsorbanților a devenit mai netedă fiind acoperită de molecule de albastru de metilen și respectiv, violet cristal.

Analiza culorii cu ajutorul parametrilor $CIEL^*a^*b^*$ poate fi un criteriu util pentru analiza procesului de adsorbție, dovedindu-se faptul că adsorbantul a reținut coloranții din ape. Adsorbanții au avut inițial o culoare naturală caracteristică materialelor vegetale din care au fost obținute. În timpul procesului de adsorbție, culoarea colorantului din apă a fost transferată materialului de adsorbție. Luminozitatea adsorbanților L^* a scăzut iar parametrii de culoare a^* și b^* au fost semnificativ schimbați. Punctele caracteristice culorii inițiale a materialelor adsorbante s-au mutat, după adsorbție, în domeniul de culoare al coloranților adsorbiți. Acest fapt a confirmat reținerea acestora pe suprafața adsorbanților.

Punctul de sarcină zero (pH_{PZC}) are un rol important în caracterizarea suprafeței materialelor adsorbante și reprezintă valoarea pH-ului la care sarcina netă a suprafeței adsorbantului este zero. Informațiile date de acest parametru indică dacă un adsorbat va fi adsorbit de un adsorbant în funcție de sarcina electrică a suprafeței sale. Valorile obținute pentru acest parametru au fost: 5,77 pentru materialul adsorbant obținut din frunze de liliac, 5,6 pentru materialul adsorbant obținut din frunze de zmeur, 5,12 pentru materialul adsorbant obținut din frunze de afin, 6,64 pentru materialul adsorbant obținut din biomasa de ghimpe, 5,03 pentru materialul adsorbant obținut din păstăi de fasole, 6,58 pentru materialul adsorbant obținut din biomasa de talpa-gâștii.

A fost studiată influența principalilor parametri asupra procesului de adsorbție. Aceștia sunt: pH-ul, timpul de contact, doza de adsorbant, concentrația inițială a colorantului, temperatura și tăria ionică.

pH-ul este un parametru important care afectează sarcina suprafeței adsorbantului. Influența acestui parametru asupra capacității de adsorbție a fost urmărită în intervalul de pH 2-12. Odată cu creșterea pH-ului capacitatea de adsorbție a tuturor adsorbanților testați a crescut. La valori ale pH-ului mai mari decât pH_{PZC} au fost înregistrate cele mai bune rezultate.

Un alt parametru important care are o influență majoră asupra procesului de adsorbție este timpul de contact. O adsorbție rapidă a coloranților a avut loc în primele 10-15 minute. Timpii de echilibru obținuți pentru adsorbanții testați s-au încadrat în intervalul 30-50 de minute, fiind mai mici decât cei raportați în literatura de specialitate pentru materiale similare testate pentru adsorbția coloranților albastru de metilen și violet cristal.

Mărirea dozei de material adsorbant a condus la creșterea eficienței de eliminare a coloranților și la scăderea capacității de adsorbție. Creșterea concentrației inițiale a coloranților a avut un efect pozitiv asupra capacității de adsorbție și un efect negativ asupra eficienței de îndepărtare a acestora.

Un alt parametru care influențează procesul de adsorbție este temperatura. Aceasta a avut o influență pozitivă asupra capacității de adsorbție în toate cazurile studiate indicând faptul că procesele de adsorbție sunt endoterme, excepție făcând adsorbția colorantului albastru de metilen pe adsorbantul obținut din biomasa de ghimpe unde temperatura a avut un efect negativ.

De obicei, apele reziduale cu coloranți pot conține cantități importante de săruri și diverși ioni metalici care generează o tărie ionică ridicată afectând procesul de adsorbție. Creșterea tăriei ionice a afectat negativ procesul de adsorbție al coloranților pe materialele testate. Observații similare sunt prezente în literatura științifică și în cazul altor materiale vegetale utilizate pentru adsorbția coloranților albastru de metilen și violet cristal.

Izotermele de adsorbție Langmuir, Freundlich, Temkin, Sips și Redlich-Peterson au fost folosite pentru a descrie interacțiunile dintre adsorbat și adsorbant care au avut loc în procesele de adsorbție. Pentru a stabili izotermele adecvate care caracterizează cel mai bine procesele de adsorbție au fost calculate valorile coeficientului de determinare (R^2), suma erorii pătrate (SSE), chi-pătrat (χ^2) și eroarea relativă medie (ARE). Izoterma Langmuir a descris cel mai bine adsorbția albastrului de metilen pe adsorbantii obținuți din frunze de liliac și păstăi de fasole și de asemenea adsorbția colorantului violet cristal pe adsorbantii obținuți din frunze de liliac și biomasă de ghimpe. Izoterma Sips a descris cel mai bine adsorbția albastrului de metilen pe adsorbantii obținuți din frunze de zmeur și frunze de afin, precum și adsorbția colorantului violet cristal pe adsorbantul obținut din biomasa de talpa-gâștii. Izoterma Freundlich a caracterizat cel mai bine procesul de adsorbție al albastrului de metilen pe materialul adsorbant obținut din biomasa de ghimpe.

Au fost comparate capacitățile maxime de adsorbție ale materialelor adsorbante testate cu alte materiale adsorbante similare prezentate în literatura de specialitate ca fiind folosite pentru adsorbția celor doi coloranți din soluții apoase. S-a constatat că materialele noi care fac obiectul acestei teze au capacități de adsorbție mai mari decât alți adsorbanți.

Cinetica de adsorbție este foarte importantă deoarece oferă informații despre mecanismul de adsorbție, despre eficiența procesului și aplicabilitatea acestuia la scară industrială. Pentru a caracteriza procesul de adsorbție au fost testate modelele cinetice de pseudo-ordin 1, pseudo-ordin 2, Elovich, ordin general și Avrami. Studiile efectuate au arătat că modelul cinetic pseudo-ordin 2 descrie cel mai bine procesul de adsorbție al albastrului de metilen pe materialele adsorbante obținute din frunze de liliac, frunze de zmeur, biomasa de ghimpe și păstăi de fasole. Acest model a descris cel mai bine și adsorbția colorantului violet cristal pe adsorbantii obținuți din frunze de liliac, frunze de zmeur și biomasa de ghimpe. Modelul de ordin general s-a dovedit a fi cel mai potrivit pentru a caracteriza adsorbția albastrului de metilen pe adsorbantul obținut din frunze de afin și adsorbția colorantului violet cristal pe adsorbantul obținut din biomasa de de talpa-gâștii.

Parametrii termodinamici variația standard a energiei libere Gibbs (ΔG^0), variația standard a entalpiei (ΔH^0) și variația standard a entropiei (ΔS^0) reprezintă elemente esențiale în estimarea performanței și a mecanismului unui proces de adsorbție și sunt, de asemenea, una dintre cerințele de bază pentru caracterizarea și optimizarea unui proces de adsorbție. Valorile calculate ale acestora au indicat în toate cazurile studiate că procesele de adsorbție ale coloranților sunt procese endoterme, spontane și favorabile, excepție făcând adsorbția albastrului de metilen pe adsorbantul obținut din biomasa de ghimpe care este exoterm.

Afinitatea materialelor adsorbante pentru cei doi coloranți a fost reflectată de valorile pozitive ale ΔS^0 . Parametrii termodinamici au mai arătat faptul că adsorbția fizică este principalul mecanism implicat în proces și că interacțiunile van der Waals au un rol important în adsorbție. De asemenea, mai poate interveni și un mic efect chimic care poate îmbunătăți procesele de adsorbție.

Optimizarea proceselor de adsorbție ale coloranților albastru de metilen și violet cristal pe materialele adsorbante propuse s-a realizat prin metoda Taguci. Aceasta este una dintre cele mai eficiente metode capabile să găsească o configurație de proiectare optimizată pentru condiții multifactoriale. Au fost determinate, pentru fiecare caz studiat, condițiile optime pentru a obține cea mai mare eficiență de îndepărtare a coloranților din soluțiile apoase. De asemenea, a fost stabilită și ordinea de influență a factorilor controlabili asupra proceselor de adsorbție.

Analiza varianței ANOVA (General Model Linear) a fost utilizată pentru a evalua rezultatele modelului Taguchi și pentru a determina contribuția procentuală a fiecărui factor asupra eficienței de îndepărtare a coloranților. Rezultatele acestei analize au confirmat, în toate cazurile, aceeași ordine de influență a factorilor controlabili asupra adsorbției indicată prin metoda Taguci. Pentru a stabili acuratețea modelului Taguchi, valorile prezise ale eficienței de îndepărtare a coloranților au fost corelate cu cele experimentale. În fiecare caz analizat rezultatele au relevat o corelație foarte bună între valori (coeficienți de determinare R^2 foarte apropiați de 1) și au confirmat precizia metodei Taguchi.

Pentru a studia posibilitatea regenerării materialelor adsorbante rezultate din procesul de adsorbție al coloranților au fost efectuate studii de desorbție. Concluziile acestor studii au fost că regenerarea adsorbantilor nu este justificată din punct de vedere tehnic și economic. Acesta fapt nu este un mare dezavantaj deoarece materialele vegetale din care au fost obținuți adsorbantii sunt ieftine, necesită o prelucrare minimă și sunt disponibile în cantități mari în natură.

Toate rezultatele obținute prezentate în această teză au relevat faptul că noile materialele adsorbante propuse sunt foarte eficiente pentru îndepărtarea coloranților cationici din soluții apoase, având capacități de adsorbție mai mari decât alte materiale adsorbante similare, prezentate în literatura de specialitate.

În partea a doua a tezei de abilitare este prezentat planul de dezvoltare a carierei universitare, atât din punct de vedere didactic, cât și din punct de vedere al activităților științifice.

Teza de abilitare se încheie cu bibliografia, care conține 247 de referințe bibliografice.

SUMMARY

The habilitation thesis is structured in two parts, based on 12 main scientific articles published, as first author or corresponding author, in journals indexed in the Web of Science database (7 from quartile Q1) or in other international databases.

In the first part of the habilitation thesis, the main professional, academic and scientific achievements after obtaining the title Ph.D. engineer are presented.

After the public defense of the doctoral thesis in October 2004, the scientific research activity fell into the field of chemical engineering and environmental engineering, being in close agreement with the didactic activity. An important research direction, developed mainly in the last years, aimed at the adsorption of some dyes from aqueous solutions on new low-cost adsorbent materials obtained from vegetable waste.

The research activity that is the subject of this habilitation thesis focused on: obtaining new low-cost adsorbent materials from vegetable waste, characterizing the obtained adsorbents, testing their performance in retaining dyes from aqueous solutions and optimizing the adsorption process.

Natural waters are affected by industrial wastewater discharges, untreated or improperly treated. Dyes are a class of compounds widely used in various industries. Most of these dyes are toxic substances with a carcinogenic and mutagenic character, therefore their elimination from industrial effluents is a priority.

Many methods have been used to remove cationic dyes from wastewater and various solutions. One of the most used methods is adsorption due to the many technical and economic advantages such as: high selectivity and efficiency, simplicity and flexibility in operation, good applicability (even at a low dye concentration), high quality of treated effluents, wide range of materials synthetic and natural adsorbents available, the possibility of reusing the adsorbent and relatively low costs.

The costs related to the adsorbent material represent about 70% of the total costs of the adsorption process. The identification and use of new adsorbent biomaterials that are easy to use and available in nature in large quantities leads to a pronounced decrease in costs and represents a topical issue. Natural plant-based materials and agricultural wastes contain cellulose, hemicellulose, lignin, polyphenols, plant pigments and proteins that have different functional groups (hydroxyl, carboxyl, amino) that can provide active sites for binding dyes and make the adsorption process possible. In addition, these materials are very cheap, readily

available in large quantities and do not require additional preliminary treatment and activation steps.

Another major advantage of the adsorption process is that it can be easily optimized and modeled. The Taguchi method is used to optimize various processes without increasing costs. Compared to other methods, the ranking approach provided by this method better visualizes the optimal conditions and requires less experimental data.

The studies focused on testing the performance of new low-cost adsorbents to remove methylene blue and crystal violet dyes from aqueous solutions. These adsorbents were obtained by minimal processing (without chemical or thermal treatment) of plant materials readily available in nature in large quantities.

Lilac tree leaves (*Syringa vulgaris* L.), raspberry leaves (*Rubus idaeus* L.), bilberry leaves (*Vaccinium myrtillus* L.), the aerial part of Bathurst burr (*Xanthium spinosum*), dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) pods husk and the aerial part of motherwort (*Leonurus cardiaca* L.) were used to obtain the adsorbent materials.

In order to characterize the adsorbent materials, the following analyzes were performed: FTIR analysis to identify the main functional groups of the adsorbent, SEM analysis to study the surface morphology of the adsorbent material, color analysis in the $CIEL^*a^*b^*$ system to highlight the color change of the adsorbent material after adsorption. In addition, the point of zero charge was determined.

FTIR analysis of the adsorbent materials indicated that its main components are cellulose, hemicellulose and lignin. SEM analysis, before and after the adsorption of methylene blue and crystal violet dyes, showed that the surface of the adsorbent materials presents many pores with different shapes and sizes, which provide a large number of active sites available for dye adsorption. After adsorption, the dye molecules filled these pores and the surface of the adsorbents became smoother, being covered by molecules of methylene blue and crystal violet, respectively.

The color analysis using $CIEL^*a^*b^*$ parameters can be a useful criterion for the analysis of the adsorption process, proving that the adsorbent retained the dyes from the water. The adsorbents initially had a natural color characteristic of the plant materials from which they were obtained. During the adsorption process, the color of the dye in the water was transferred to the adsorbent material. The brightness of adsorbents (L^*) decreased and the color parameters a^* and b^* were significantly changed. The characteristic point's of the initial color of the adsorbent materials moved after adsorption into the color domain of the adsorbed dyes. This fact confirmed their retention on the adsorbents surface.

The point of zero charge (pH_{PZC}) has an important role in characterizing of adsorbent materials surface and represents the pH value at which the net charge of the adsorbent surface is zero. The information given by this parameter indicates whether an adsorbate will be adsorbed by an adsorbent depending on the electrical charge of its surface. The values obtained for this parameter were: 5.77 for the adsorbent material obtained from lilac tree leaves, 5.6 for the adsorbent material obtained from raspberry leaves, 5.12 for the adsorbent material obtained from bilberry leaves, 6.64 for the adsorbent material obtained from the Bathurst burr biomass, 5.03 for the adsorbent material obtained from dry bean pods husks and 6.58 for the adsorbent material obtained from motherwort biomass.

The influence of the main parameters on the adsorption process was studied. These parameters are: pH, contact time, adsorbent dose, initial dye concentration, temperature and ionic strength.

The pH is an important parameter that affects the adsorbent surface charge. The influence of this parameter on the adsorption capacity was followed in the range of pH 2-12. With the pH increasing, the adsorption capacity of all tested adsorbents increased. At pH values higher than pH_{PZC} the best results were recorded.

Another important parameter that has a major influence on the adsorption process is the contact time. A rapid adsorption of the dyes took place in the first 10-15 minutes. The equilibrium times obtained for the tested adsorbents were in the range of 30-50 minutes, being lower than those reported in the specialized literature for other similar materials tested on the adsorption of methylene blue and crystal violet dyes.

Increasing the adsorbent material dose led to an increase in the efficiency of removal of dyes and a decrease in the adsorption capacity. Increasing of the dyes initial concentration had a positive effect on the adsorption capacity and a negative effect on their removal efficiency.

Another parameter that influences the adsorption process is temperature. It had a positive influence on the adsorption capacity, in all cases studied, indicating that the adsorption processes are endothermic, except for the adsorption of methylene blue on the adsorbent obtained from Bathurst burr biomass where the temperature had a negative effect.

Typically, dye wastewaters may contain significant amounts of salts and various metal ions that generate a high ionic strength affecting the adsorption process. Increasing the ionic strength negatively affected the adsorption process of the dyes on the tested materials. Similar observations are present in the scientific literature in the case of other vegetal materials used for the adsorption of methylene blue and crystal violet dyes.

Langmuir, Freundlich, Temkin, Sips and Redlich-Peterson adsorption isotherms were used to describe the interactions between adsorbate and adsorbent that occurred in the adsorption processes. To establish the appropriate isotherms that best characterize the adsorption processes, the coefficient of determination (R^2), sum of square error (SSE), chi-square (χ^2) and average relative error (ARE) values were calculated. The Langmuir isotherm best described the adsorption of methylene blue on adsorbents obtained from lilac tree leaves and dry bean pods husks and also, the adsorption of crystal violet dye on adsorbents obtained from lilac tree leaves and Bathurst burr biomass. The Sips isotherm best described the adsorption of methylene blue on adsorbents obtained from raspberry leaves and bilberry leaves, as well as, the adsorption of crystal violet on the adsorbent obtained from motherwort biomass. The Freundlich isotherm best characterized the adsorption process of methylene blue on the adsorbent material obtained from Bathurst burr biomass.

The maximum adsorption capacities of the tested adsorbent materials were compared with other similar adsorbent materials presented in the specialized literature being used for the adsorption of the two dyes from aqueous solutions. The new materials that are the subject of this thesis were found to have higher adsorption capacities than other adsorbents.

Adsorption kinetics is very important because it provides information about the adsorption mechanism, the efficiency of the process and its applicability on an industrial scale. Pseudo-first order, pseudo-second order, Elovich, general order and Avrami kinetic models were tested to characterize the adsorption process. The studies carried out showed that the pseudo-second order kinetic model best describes the adsorption process of methylene blue on the adsorbent materials obtained from lilac tree leaves, raspberry leaves, Bathurst burr biomass and dry bean pods husks. This model also, best described the adsorption of the crystal violet on the adsorbents obtained from lilac tree leaves, raspberry leaves and Bathurst burr biomass. The general order model proved to be the most suitable to characterize the adsorption of methylene blue on the adsorbent obtained from bilberry leaves and the adsorption of the crystal violet dye on the adsorbent obtained from motherwort biomass.

The thermodynamic parameters the standard Gibbs free energy change (ΔG^0), the standard enthalpy change (ΔH^0) and the standard entropy change (ΔS_0) represent essential elements in estimating the performance and mechanism of an adsorption process and are also, among the basic requirements for the characterization and optimization of an adsorption process. Their calculated values indicated, in all cases studied, that dye adsorption processes are endothermic, spontaneous and favorable processes, except for the adsorption of methylene blue on the adsorbent obtained from Bathurst burr biomass which is exothermic. The affinity

of the adsorbent materials for the two dyes was reflected by the positive values of ΔS^0 . Thermodynamic parameters showed that physical adsorption is the main mechanism involved in the process and that van der Waals interactions play an important role in adsorption. Also, there may be a small chemical effect that can enhance the adsorption processes.

The optimization of the adsorption processes of methylene blue and crystal violet dyes on the proposed adsorbent materials was carried out by the Taguchi method. This is one of the most effective methods capable of finding an optimized design configuration for multifactorial conditions. For each case studied, the optimal conditions to obtain the highest dye removal efficiency from aqueous solutions were determined. The order of influence of the controllable factors on the adsorption processes was also established.

ANOVA analysis of variance (General Model Linear) was used to evaluate the results of the Taguchi model and to determine the percentage contribution of each factor on the dye removal efficiency. The results of this analysis confirmed, in all cases, the same order of influence of the controllable factors on the adsorption indicated by the Taguchi method. To establish the accuracy of the Taguchi model, the predicted dye removal efficiency values were correlated with the experimental ones. In each case analyzed, the results revealed a very good correlation between the values (determination coefficients R^2 very close to 1) and confirmed the accuracy of the Taguchi method.

In order to study the regeneration possibility of adsorbent materials resulting from the adsorption process, desorption studies were carried out. The conclusions of these studies were that regeneration of adsorbents is not technically and economically justified. This fact is not a big disadvantage because the plant materials from which the adsorbents were obtained are cheap, require minimal processing and are available in large quantities in nature.

All the obtained results presented in this thesis revealed the fact that the proposed new adsorbent materials are very effective for the removal of cationic dyes from aqueous solutions, having higher adsorption capacities than other similar adsorbent materials presented in the specialized literature.

In **the second part of the habilitation thesis**, the university career development plan is presented, both from a didactic and scientific activities point of view.

The habilitation thesis ends with the bibliography that containing 247 references.